

2016 № 3

ISSN 2313-1020

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ЕЖЕГОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

**МАТЕРИАЛЫ ТРЕТЬЕЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

г. Новосибирск, 30 марта 2016 г.

ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING

ANNUAL SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL COLLECTED ARTICLES

**Proceedings of the Third International
Scientific and Practical Conference**

Novosibirsk, 30 March 2016

НОВОСИБИРСК

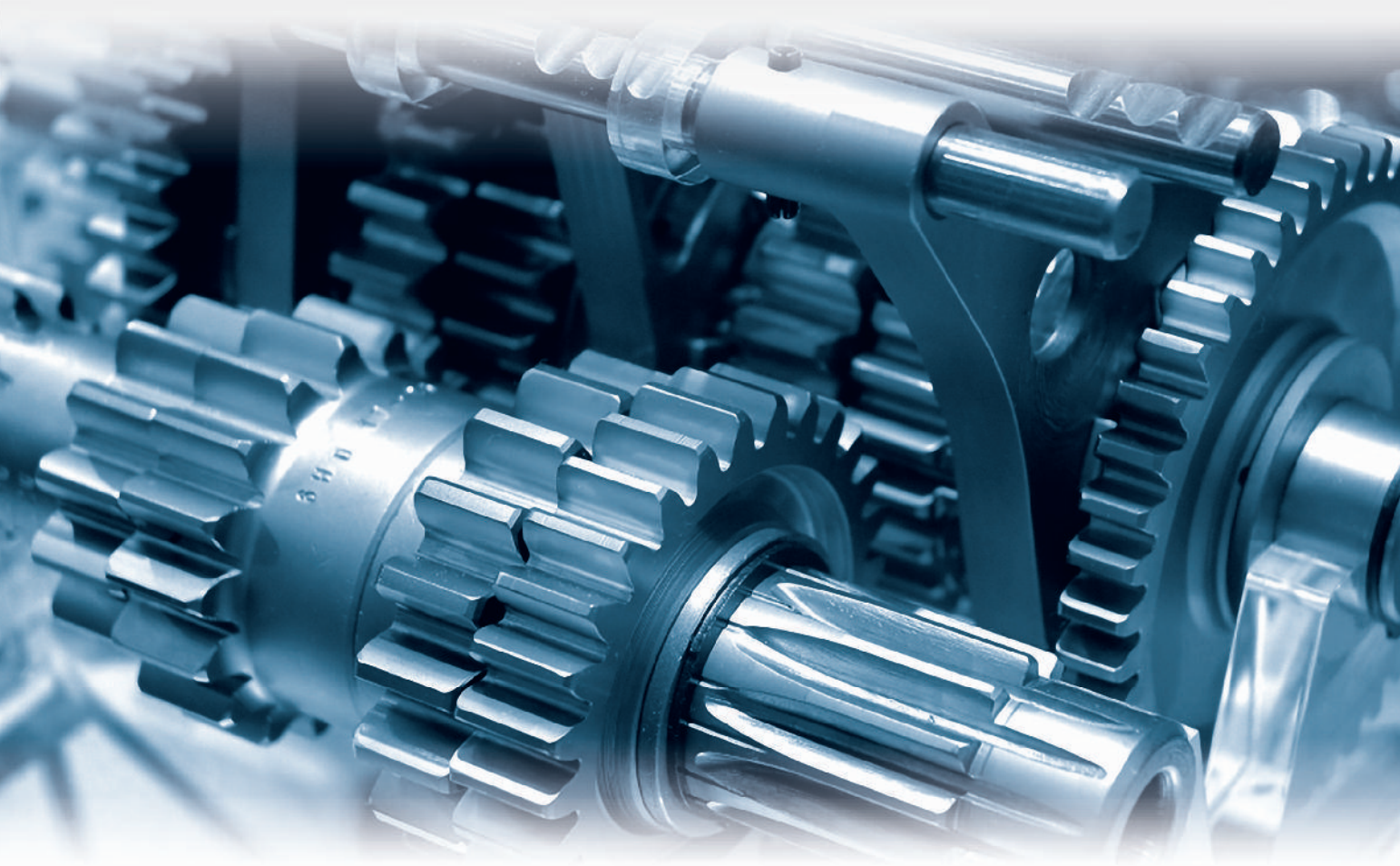


Выставка оборудования
для металлообработки и сварки

29.03–01.04 2016

Россия, Новосибирск

mashex-siberia.ru



ITE Сибирь
Россия, Новосибирск, ул. Станционная, 104
Тел.: (383) 363-00-36, 363-00-63

Генеральный
информационный партнер:

**СТАНОЧНЫЙ
ПАРК**

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ISSN 2313-1020

№3 2016 г. ЕЖЕГОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

Батаев Анатолий Андреевич - доктор технических наук, профессор, почётный работник высшего профессионального образования, ректор НГТУ, г. Новосибирск (Российская Федерация)

Члены совета

Федеративная Республика Бразилия: **Альберто Морейра Хорхе**, профессор, доктор технических наук, Федеральный университет, г. Сан Карлос

Федеративная Республика Германия: **Монико Грайф**, профессор, доктор технических наук, Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук, г. Рюссельсхайм, **Томас Хассел**, доктор технических наук, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен, **Флориан Нюрнбергер**, доктор технических наук, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен

Республика Беларусь: **Пантелеенко Ф.И.**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Украина: **Ковалевский С.В.**, доктор технических наук, профессор, Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

Российская Федерация: **Анисименко Г.Е.**, директор производственно-технической фирмы «Сигма-инструмент», г. Новосибирск, **Атапин В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г.Новосибирск, **Балков В.П.**, зам. ген.директора АО «ВНИИинструмент», канд. техн. наук, г.Москва, **Батаев В.А.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Буров В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Герасенко А.Н.**, директор ООО НПКФ «Машсервисприбор», г.Новосибирск, **Иванцовский В.В.**, доктор техн. наук, доцент, НГТУ, г. Новосибирск, **Кирсанов С.В.**, доктор техн. наук, профессор, ТПУ, г. Томск, **Коротков А.Н.**, доктор техн. наук, профессор, академик РАЕ, КузГТУ, г. Кемерово, **Кудряшов Е.А.**, доктор техн. наук, профессор, Засл. деятель науки РФ, ЮЗГУ, г. Курск, **Макаров А.В.**, доктор техн. наук, с.н.с., ИФМ УрО РАН, г.Екатеринбург, **Овчаренко А.Г.**, доктор техн. наук, профессор, БТИ АлтГТУ, г. Бийск, **Рахимянов Х.М.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Сараев Ю.Н.**, доктор техн. наук, профессор, ИФПМ СО РАН, г. Томск, **Татаркин Е.Ю.**, доктор техн. наук, профессор, АлтГТУ, г. Барнаул, **Янюшкин А.С.**, доктор техн. наук, профессор, БрГУ, г. Братск

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Скиба Вадим Юрьевич - доцент, канд. техн. наук

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Лобанов Дмитрий Владимирович - профессор, доктор техн. наук

Мартынова Татьяна Геннадьевна - доцент, канд. техн. наук

Плотникова Наталья Владимировна - доцент, канд. техн. наук

Перепечатка материалов из журнала «Актуальные проблемы в машиностроении» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

ИЗДАЕТСЯ С 2014 г.

Периодичность – 1 номер в год

ИЗДАТЕЛЬ ЖУРНАЛА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Журнал зарегистрирован в научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU.

Адрес редакции и издателя:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5
Тел. (383) 346-17-79

Сайт журнала:

<http://journals.nstu.ru/machine-building>

E-mail: machine-building@mail.ru

machine-building@corp.nstu.ru

Цена свободная

ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING

ISSN 2313-1020

№3 2016 ANNUAL SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL COLLECTED ARTICLES

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:

Vadim Y. Skeeba, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,
Department of Industrial Machinery Design, Novosibirsk State
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*, Russian Federation

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

Dmitry V. Lobanov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Department of Machine-building technology,
Bratsk State University, *Bratsk*, Russian Federation

Tatyana G. Martynova, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,
Department of Industrial Machinery Design, Novosibirsk State
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*, Russian Federation

Natalia V. Plotnikova, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,
Department of Material Science in Mechanical Engineering,
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*, Russian Federation

EDITORIAL COUNCIL

CHAIRMAN:

Anatoliy A. Bataev, D.Sc. (Engineering), Professor,
Rector, Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*, Russian Federation

MEMBERS:

The Federative Republic of Brazil:

Alberto Moreira Jorge Junior, Dr.-Ing., Full Professor, Federal University of Sao Carlos, *Sao Carlos*

The Federal Republic of Germany:

Moniko Greif, Dr.-Ing., Professor, Hochschule RheinMain University of Applied Sciences, *Russelsheim*

Florian Nurnberger, Dr.-Ing., Chief Engineer and Head of the Department "Technology of Materials",
Leibniz Universitat Hannover, *Garbsen*

Thomas Hassel, Dr.-Ing., Head of Underwater Technology Center Hanover, Leibniz Universitat Hannover, *Garbsen*

The Republic of Belarus:

Fyodor I. Panteleenko, D.Sc. (Engineering), Professor, First Vice-Rector,
Corresponding Member of National Academy of Sciences of Belarus, Belarusian National Technical University, *Minsk*

The Ukraine:

Sergiy V. Kovalevskyy, D.Sc. (Engineering), Professor, Donbass State Engineering Academy, *Kramatorsk*

The Russian Federation:

Gennadiy E. Anisimenko, Director, Scientific and Production company «Sigma-instrument», *Novosibirsk*;

Vladimir G. Atapin, D.Sc. (Engineering), Professor, Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

Victor P. Balkov, Deputy general director, Research and Development Tooling Institute «VNIINSTRUMENT», *Moscow*;

Vladimir A. Bataev, D.Sc. (Engineering), Professor, Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

Vladimir G. Burov, D.Sc. (Engineering), Professor, Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

Aleksandr N. Gerasenko, Director, Scientific and Production company «Mashservispribor», *Novosibirsk*;

Vladimir V. Ivancivsky, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

Sergey V. Kirsanov, D.Sc. (Engineering), Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, *Tomsk*;

Aleksandr N. Korotkov, D.Sc. (Engineering), Professor, Kuzbass State Technical University, *Kemerovo*;

Evgeniy A. Kudryashov, D.Sc. (Engineering), Professor, Southwest State University, *Kursk*;

Aleksey V. Makarov, D.Sc. (Engineering), Senior Researcher, M.N. Miheev Institute of Metal Physics,
Russian Academy of Sciences (Ural Branch), *Yekaterinburg*;

Aleksandr G. Ovcharenko, D.Sc. (Engineering), Professor, Biysk Technological Institute, *Biysk*;

Kharis M. Rakhimyanov, D.Sc. (Engineering), Professor, Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

Yuriy N. Saraev, D.Sc. (Engineering), Professor, Institute of Strength Physics and Materials Science,
Russian Academy of Sciences (Siberian Branch), *Tomsk*;

Evgeniy Yu. Tatarkin, D.Sc. (Engineering), Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University, *Barnaul*;

Alexander S. Yanyushkin, D.Sc. (Engineering), Professor, Bratsk State University, *Bratsk*

The magazine is issued since 2014

Publication frequency - 1 numbers a year

Data on the magazine are published in eLIBRARY.RU

Edition address: Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,

Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Tel.: (383) 346-17-79

<http://journals.nstu.ru/machine-building>; E-mail: metal_working@mail.ru

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ТРЕТЬЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

г. Новосибирск, 30 марта 2016 г.

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- Новосибирский государственный технический университет, научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология · оборудование · инструменты)», г. Новосибирск, Россия
- Выставочная компания «ITE Сибирь», г. Новосибирск, Россия

СООРГАНИЗАТОРЫ

- Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук, г. Рюссельсхайм, Федеративная Республика Германия;
- Ганноверский университет Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен, Федеративная Республика Германия;
- Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина;
- Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь;
- ОАО НПТ и ЭИ «Оргстанкинпром», г. Новосибирск, Россия;
- ООО НПФ «Машсервисприбор», г. Новосибирск, Россия;
- Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия;
- Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия;
- Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия;
- Бийский технологический институт АлГТУ им. И.И. Ползунова, г. Бийск, Россия;
- Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия;
- Томский политехнический университет, г. Томск, Россия;
- Братский государственный университет, г. Братск, Россия

ПОЧЕТНЫЙ КОМИТЕТ

Члены комитета: *Монико Грайф*, профессор, доктор, Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук (г.Рюссельсхайм), *Томас Хассел*, профессор, доктор, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница (г.Гарбсен), *Флориан Нюрнбергер*, профессор, доктор, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница (г.Гарбсен), *Буров В.Г.*, профессор, д.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), *Ковалевский С.В.*, проректор ДГМА (г.Краматорск), *Пантелеенко Ф.И.*, профессор, д.т.н., член-корреспондент НАН Беларуси, БНТУ (г. Минск), *Афанасьев В.К.*, академик РАЕН, профессор, д.т.н., зав. каф. СибГИУ (г. Новокузнецк), *Вандакуров А.Н.*, ген. директор АО "Новосибирский механический завод "Искра", (г.Новосибирск), *Герасенко А.Н.*, директор ООО НПФ «Машсервисприбор» (г.Новосибирск), *Гурьев А.М.*, профессор, д.т.н., зав. каф. АлГТУ (г. Барнаул), *Кирсанов С.В.*, профессор, д.т.н., ТПУ (г.Томск), *Марков А.М.*, профессор, д.т.н., зав. каф. АлГТУ (г.Барнаул), *Мещерякова Н.А.*, директор выставки, МВЦ «ITE Сибирь» (г. Новосибирск), *Овчаренко А.Г.*, профессор, д.т.н., зав.каф. БТИ АлГТУ (г. Бийск), *Рахмиев Х.М.*, профессор, д.т.н., зав. каф. НГТУ (г. Новосибирск), *Ситников А.А.*, д.т.н., профессор, ректор АлГТУ (г.Барнаул), *Татаркин Е.Ю.*, профессор, д.т.н., зав. каф. АлГТУ (г.Барнаул), *Янюшкин А.С.*, профессор, д.т.н., член-корреспондент САН ВШ, академик МАН ВШ, зав. каф. БГУ (г. Братск).

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

- *Батаев А.А.*, главный редактор научно-технического и производственного журнала «Обработка металлов», профессор, д.т.н., ректор НГТУ, (г. Новосибирск), **председатель;**
- *Коротков А.Н.*, академик РАЕ, профессор, д.т.н., КузГТУ (г. Кемерово), **сопредседатель.**
- *Атапин В.Г.*, зам. главного редактора журнала «Обработка металлов», профессор, д.т.н., НГТУ (г.Новосибирск), **сопредседатель;**

Члены программного комитета: *Иванцовский В.В.*, профессор, д.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), *Ленивцева О.Г.*, к.т.н., (г.Новосибирск), *Лобанов Д.В.*, д.т.н., профессор, БГУ (г. Братск), *Трегубчик П.В.*, гл. технолог ОАО «Новосибирский стрелочный завод», (г. Новосибирск), *Янюльский В.В.*, к.т.н., доцент, декан МТФ НГТУ (г.Новосибирск).

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

- *Скиба В.Ю.*, зам. главного редактора журнала «Обработка металлов», доцент, к.т.н., НГТУ (г. Новосибирск);
- *Дашкова В.А.*, Руководитель дирекции отраслевых выставок «ITE Сибирь» (г. Новосибирск).

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- Инновационные технологии в машиностроении;
- Технологическое оборудование, оснастка и инструменты;
- Материаловедение в машиностроении;
- Экономика и организация инновационных процессов в машиностроении.

ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING

Proceedings of the Third International Scientific and Practical Conference Novosibirsk, 30 March 2016

CONFERENCE ORGANIZERS

- Novosibirsk State Technical University, Scientific, Technical and Industrial Journal "Obrabotka Metallov", Novosibirsk, Russian Federation
- Exhibition company "ITE Siberia", Novosibirsk, Russian Federation

CO-ORGANIZERS

- Hochschule RheinMain University of Applied Sciences, Rüsselsheim, Germany;
- Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany;
- Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine;
- Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus;
- JSC Novosibirsk Technological, Designing and Experimental Institute "Orgstankinprom", Novosibirsk, Russian Federation;
- LLC Research-and-production and commercial company "Mashservispribor", Novosibirsk, Russian Federation;
- Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Russian Federation;
- Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation;
- I.I. Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation;
- Biysk Technological Institute, Branch of Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russian Federation;
- Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, Tomsk, Russian Federation;
- National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation;
- Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation.

HONORARY COMMITTEE

COMMITTEE MEMBERS: *Monico Greif*, Professor, DSc, High School of the Rhine-Main, University of Applied Sciences (Rüsselsheim, Germany), *Thomas Hassell*, Professor, DSc, Wilhelm Leibniz University of Hannover (Garbsen, Germany), *Florian Nürnberger*, Professor, DSc, Hanover Wilhelm Leibniz University (Garbsen, Germany), *Kovalevsky S.V.*, Professor, DSc, DSEA (Kramatorsk, Ukraine), *Panteleenko F.I.*, Professor, DSc, member of the National Academy of Sciences of Belarus, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus), *Afanasyev V.K.*, Academy of Natural Sciences, Professor, DSc, SibSIU (Novokuznetsk, Russia), *Burov V.G.*, Professor, DSc., NSTU (Novosibirsk, Russia), *Gerasenko A.N.*, Director of the LLC Research-and-production and commercial company "Mashservispribor" (Novosibirsk, Russia), *Guriev A.M.*, Professor, DSc, AltSTU (Barnaul, Russia), *Kirsanov S.V.*, Professor, DSc, TPU (Tomsk, Russia), *Markov A.M.*, Professor, DSc, Vice Rector of AltSTU (Barnaul, Russia), *Meshcheriakova N.A.*, Exhibition Director, «ITE Siberia» (Novosibirsk, Russia), *Ovcharenko A.G.*, Professor, DSc, Head of Department in BTI AltSTU (Biysk, Russia), *Rakhimyanov Kh.M.*, Professor, DSc., Head of Department in NSTU (Novosibirsk, Russia), *Tatarkin E.Y.*, Professor, DSc, AltSTU (Barnaul, Russia), *Yanyushkin A.S.*, Professor, DSc, Corresponding Member SAN VSH, Academician IHEAS, Head of Department in BSU (Bratsk, Russia).

PROGRAMME COMMITTEE

- *Bataev A.A.*, editor in chief of Scientific, Technical and Industrial Journal "Obrabotka Metallov", Professor, D.Sc. (Engineering), Rector of Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia), Chairman;
- *Korotkov A.N.*, Academician of RAE, Professor, D.Sc. (Engineering), KuzSTU (Kemerovo, Russia), co-chair;
- *Atapin V.G.*, Deputy Chief Editor of "Obrabotka Metallov", Professor, D.Sc. (Engineering), NSTU (Novosibirsk, Russia), co-chair.

COMMITTEE MEMBERS: *Ivancivsky V.V.*, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, NSTU (Novosibirsk, Russia), *Lenivtseva O.G.*, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, NSTU (Novosibirsk, Russia), *Lobanov D.V.*, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, BSU (Bratsk, Russia), *Tregubchak P.V.*, Manufacturing manager, JSC "Novosibirsk Switch Plant" (Novosibirsk, Russia), *Yanpolskiy V.V.*, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Dean, Faculty of Mechanical Engineering and Technologies, NSTU (Novosibirsk, Russia).

ORGANIZING COMMITTEE

- *Skeeba V.Yu.*, Deputy Chief Editor of "Obrabotka Metallov", Ph.D. (Engineering), Associate Professor, NSTU (Novosibirsk, Russia);
- *Dashkova V.A.*, Head of Directorate Industry Exhibitions, «ITE Siberia» (Novosibirsk, Russia).

SUBJECT OF THE CONFERENCE

- Innovative Technologies in Mechanical Engineering;
- Technological Equipment, Machining Attachments and Instruments;
- Materials Science in Machine Building;
- Economics and Organization of the Business Innovative Processes in Engineering.

СОДЕРЖАНИЕ

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Филиппов А.М., Голикова Е.О., Сидоров А.Н., Азин А.С. Проблемы при эксплуатации лопаток последних ступеней паровых турбин после восстановительного ремонта	17
Аксёнова К.В., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф. Дegrадация структуры и свойств силумина, подвергнутого электронно-пучковой обработке и многоцикловым усталостным испытаниям	23
Сидоренко С.А., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Программный продукт для автоматизации выбора рационального композиционного материала	30
Чинахов Д.А., Григорьева Е.Г., Майорова Е.И. Влияние расхода защитного газа на форму наплавляемого валика при восстановлении изношенных деталей	37
Вальтер А.В., Аксенов В.В., Чернухин Р.В. Определение величины и характера геометрических погрешностей оболочки модуля сопряжения опытного образца геохода	42
Родина А.А., Колодин А.Н. Автоматизация выбора технологического оборудования гальванического производства	48
Козырев Н.А., Кибко Н.В., Уманский А.А., Титов Д.А. Влияние никеля и углеродфторсодержащей добавки на структуру и свойства наплавляемой стали 25Х5ФМС	54
Козырев Н.А., Титов Д.А., Кибко Н.В. Изучение влияния состава порошковой проволоки ПП-Нп-35В9Х3СФ на свойства наплавляемого валика	60
Зверев Е.А., Скиба В.Ю., Трегубчак П.В., Вахрушев Н.В., Парц К.А., Жигулев А.К. Оценка работоспособности износостойких плазменных покрытий после высокотемпературного воздействия токами высокой частоты	65
Левчук А.Ю., Глейм В.Р., Плотников К.П., Ча Г.О., Скиба В.Ю. Использование автоматизированного сварочного комплекса для изготовления водонагревательных котлов	71
Иванцовский В.В., Зверев Е.А., Вахрушев Н.В., Бандюров И.В. Исследование адгезионной прочности плазменных металлокерамических износостойких покрытий	77
Ольшанецкий В.Е., Овчинников А.В., Джуган А.А. Возможность использования несферических титановых порошков для аддитивных технологий	82
Поддубный В.И., Кряжев Ю.А., Горин Е.Ю. Разработка 3D-модели динамического процесса резания торцевой фрезой в прикладном пакете ResurDyn	88
Марков А.М., Черданцев П.О., Гайст С.В., Катаева С.А., Лапенков Е.Ю. Классификация способов управления показателями точности при обработке стеклопластиков	93
Рычков Д.А. Рационализация параметров фрезерования полимерных композиционных материалов	100

Фирсов А.М., Татаркин Е.Ю., Калистру В.А. Проектирование технологических процессов с использованием фонда эвристических приемов	106
Гилета В.П., Безнедельный А.И., Асанов В.Б. Исследование силы трения при ультразвуковой упрочняюще-чистовой обработке	111
Калистру В.А., Фирсов А.М. Методика прогнозирования отклонений точности формы отверстий тонкостенных корпусных деталей	117
Гайст С.В., Марков А.М., Черданцев П.О., Катаева С.А., Лапенков Е.Ю. Исследование температуры при фрезеровании стеклопластика	123
Василевская С.И., Макаров В.Ф. Исследование анодного поведения кремния в щелочных электролитах	129
Смирнов В.В., Овчаренко А.Г. Формирование групп деталей при проектировании групповых технологий машиностроения	134
Семенова Ю.С., Лихачев А.П. Характер наследования точностных и микрогеометрических параметров поверхности при использовании ультразвукового пластического деформирования на финишной стадии механической обработки	140
Щёткин А.И., Киселев В.С., Радченко М.В. Проектирование и технология изготовления модернизированного устройства для сверхзвуковой газопорошковой наплавки защитных покрытий	146
Собачкин А.В., Ситников А.А., Яковлев В.И., Свиридов А.П. Триботехнические свойства газодетонационных композиционных покрытий поршня двигателя внутреннего сгорания	152
Журавлева А.В., Юсупов А.С. Электрохимическое растворение композиционного материала «алюминий-титан» в водном растворе нитрата натрия и хлорида натрия	156
Зимоглядова Т.А., Дробяз Е.А., Муль Д.О., Кривеженко Д.С. Особенности наплавки порошковых покрытий системы Ni-Cr-Si-B	161
Рахимьянов Х.М., Гаар Н.П., Локтионов А.А. Технологические возможности схемы HiFocus ^{plus} тонкоструйной плазменной резки в обработке конструкционных сталей	166
Смагин Г.И., Карманов В.С., Федин И.В. Подход к управлению процессом сверления на основе выпуклой модели стойкости инструмента	173
Коротков А.Н., Видин Д.В. Повышение эффективности операции притирки путем применения зерен с контролируемой формой	185
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ОСНАСТКА И ИНСТРУМЕНТЫ	
Марков А.М., Габец А.В., Габец Д.А., Гавриков Д.В. Пружины рессорного комплекта тележек грузовых вагонов	194
Атапин В.Г. Некоторые вопросы проектирования многоцелевых станков	199
Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г., Наливайченко Г.М., Твердохлебов С.Н., Троценко А.А. Исследование нагрузок на рабочий орган экспериментальной установки смесителя от внешних механических воздействий	205

Глейм В.Р., Левчук А.Ю., Плотников К.П., Ча Г.О., Скиба В.Ю. Выбор рациональной конструкции шпинделя вертикально-фрезерного станка	212
Ванин В.А., Колодин А.Н., Родина А.А. Кинематическая структура металлорежущих станковс гидравлическими связями в формообразующих цепях	219
Родина А.А., Фидаров В.Х., Ермаков И.С. Исследование износа резцов при растачивании	224
Ча Г.О., Скоков Д.В., Глейм В.Р., Левчук А.Ю., Плотников К.П., Скиба В.Ю. Проектирование привода вертикального перемещения точки вывески системы обезвешивания	229
Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Влияние механических потерь на выходные показатели электромеханической колебательной системы с электромагнитным возбуждением	234
Рогова О.В., Нейман В.Ю. Повышение точности расчета электромагнитного двигателя для электропривода виброкомпрессора	241
Нейман Л.А., Щуров Н.И. Методика измерения мощности потерь в механической колебательной системе с электромагнитным возбуждением	247
Коротков В.С., Лао Г. Уравнения профиля венца со скругленными кромками для волновой передачи с промежуточными телами качения	253
Смагин Г.И., Яковлев Н.Д., Бурдуков С.Д., Буланов П.А., Калугина Н.В., Орлова И.А. Модернизация сверлозаточного станка ЗБ652	259
Гилета В.П., Ванаг Ю.В., Тищенко Ю.В., Ведель П.М., Ридель С.В. Пневматическое оборудование для прокладки коммуникаций	270
Керженцев В.А., Перова Н.В., Древецкий Н.С., Косилов А.С. Мощность, потребляемая волчком, и её распределение по механизмам волчка	275
Керженцев В.А., Перова Н.В., Бредихина А.Н., Печоркина Н.С. Разработка в табличной форме расчетных материалов и расчет механизмов волчка	282
Рыжиков В.В., Мкртчян Т.С., Киреева А.К., Игнатова Е.А. Проблемы финишной обработки сложных поверхностей ручным инструментом с электроприводом	290
Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю., Курепин М.О. Индуктор для комбинированной магнитно-импульсной обработки	296
Шубин А.Ю., Дмитриев В.С., Даммер В.Х., Потехаев А.И., Савостиков В.М., Табаченко А.Н. К задаче создания подшипников скольжения с ионно-плазменным антифрикционным покрытием	301
Катаева С.А., Марков А.М., Черданцев П.О., Гайст С.В., Лапенков Е.Ю. Конструкции фрез для обработки стеклопластиков	307
Татаркин Е.Ю., Иконников А.М., Гребеньков Р.В. Проектирование способов правки рабочей поверхности магнитного индуктора с использованием методологии поискового конструирования	313
Козлов В.Н., Чжэньдун Х., Чжан Ц., Лещинер Е.Г. Расчёт прочности режущих пластин при обработке титанового сплава	318

Павлов Е.В. Обеспечение механических свойств ротационных деталей, работающих в условиях ударных нагрузок	324
Грибков Э.П., Гаврильченко Е.Ю., Мережко Д.В. Математическое моделирование профилирования ободьев колес	330
Коротков В.А., Минкин Е.М. Оборудование для реализации технологии производства шлифовальных кругов с контролируемой формой и ориентацией зёрен	336
Баканов А.А. Повышение работоспособности сверл с СМП за счет изменения профиля режущей кромки пластины	340
Птицын С.В., Саха О.В., Жигулев А.К. Проблемы импортозамещения малогабаритных землеройных машин	346
Марков А.М., Ромашев А.Н. Инструментальная система технологического оборудования со встроенным измерителем для получения диагностической информации	350
Марков А.М., Ромашев А.Н., Перепелкин П.В. Виртуальные приборы для сбора и обработки диагностической информации о процессе резания	354

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Максимов А.Б., Гуляев М.В., Ерохина И.С. Влияние циклической деформации изгибом на вязкость и пластичность низколегированных сталей	358
Афанасьев В.К., Попова М.В., Малюх М.А. Влияние комплексного легирования на тепловое расширение сплава Al-11% Si	364
Токарев А.О., Кузьмин В.И., Малыгина Я.К. Повышение качества металлического порошкового покрытия при плазменном напылении с кольцевой инъекцией порошка	370
Осколкова Т.Н., Тюрин А.Г., Страхов А.П. Сверхтвердое покрытие на твердом сплаве ВК8	378
Рашковец М.В., Никулин А.А., Климова О.Г. Особенности материала, полученного высокоскоростным прямым лазерным выращиванием сплава на основе Ni	384
Багаев С.Н., Грачев Г.Н., Смирнов А.Л., Хомяков М.Н., Токарев А.О., Батаева З.Б., Гербер А.Ю. Влияние предварительной термообработки конструкционной стали на эффект упрочнения при лазерно-плазменном воздействии	389
Логинова М.В., Яковлев В.И., Ситников А.А., Филимонов В.Ю., Собачкин А.В., Неодяев А.З., Градобоев А.В. Структурные превращения в механоактивированной порошковой смеси Ti+Al под действием γ -облучения	398
Степанова Н.В. Особенности образования медьсодержащих включений в чугунах, содержащем 14,7 % меди	404
Гурьев М.А., Мэй Шунчи. Литой композиционный материал для горнорудных машин	410
Бутуханов В.А., Лыгденев Б.Д. Диффузионные карбидные покрытия на стали У8А	414

Иванова Т.Г., Гурьев М.А., Мэй Шунчи. Термодинамическое моделирование реакций при поверхностном легировании сталей	419
Коваленко Н.Д., Иванов А.М. Механические свойства и механизм разрушения экструдированной низкоуглеродистой стали при низкой температуре	424
Лагерева Д.И., Михайлов Д.А., Провоторов В.В., Шевцова К.Е. Оценка деформирования создания СВМПЭ для создания композиционных соединений	429
Филиппов М.А., Гервасьев М.А., Никифорова С.М., Хадыев М.С., Рыжков М.А., Жилин А.С., Эстемирова С.Х. Использование остаточного аустенита для повышения абразивной износостойкости высокохромистых сталей	434
Матц О.Э., Мункуева Д.Д., Батаев И.А. Влияние режимов электронно-лучевой наплавки на формирование покрытий системы Ti-Al	440
Малютина Ю. Н., Скороход К. А., Шевцова Л. И. Композиционный материал типа «титан-сталь», сформированный сваркой взрывом	446
Прудников А.Н., Прудников В.А. Влияние термоциклическойковки и последующего отжига на коэрцитивную силу и линейное расширение стали 10	451
Марков А.М., Габец А.В., Габец Д.А., Иванов А.В. Основные направления повышения износостойкости ответственных деталей железнодорожных составов	457
Корниенко Е.Е., Гнидан К.А. Структурные особенности плазменных покрытий системы Ni-Cr-Si-B, дополнительно легированных Nb	461
Алфёрова Е.А., Лычагин Д.В., Сопрунов Д.В. Складчатые структуры в $[\bar{1}11]$ -монокристаллах никеля	468
Яковлев А.В., Плужникова Т.Н., Федоров В.А., Березнер А.Д., Федотов Д.Ю. Закономерности формирования рельефа в аморфных металлических сплавах при локальном деформировании	474
Огар П.М., Горохов Д.Б. Взаимосвязь деформации при вдавливании сферического индентора с деформацией при растяжении	479
Полянский И. П., Сизов И. Г., Мишигдоржийн У. Л., Лейенс К., Феттер Б. Поверхностное насыщение низкоуглеродистых сталей бором и алюминием из обзоров в условиях термоциклирования	486

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Абсалямова Г.А. Анализ инновационной деятельности предприятий машиностроения: пути сотрудничества с университетским комплексом	492
Батурич В.Н., Батурич Д.В. Оптимизация планирования производства деталей по прибыли	498
Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х. Основные принципы рациональной организации машиностроительного производства	504
Марков А.М., Маркова М.И., Дронова О.Б. Управление технологической подготовкой механической обработки	511

Лукина С.В. Моделирование и исследование эффективности инновационной деятельности промышленного предприятия с использованием метода справедливой цены опциона	517
Радионова Л.В., Чернышев А.Д., Лисовский Р.А. Интерактивная образовательная система – виртуальный тренажер «листовая прокатка»	523

Подписано в печать 23.03.2016. Выход в свет 26.03.2016. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Тираж 80 экз. Уч.-изд. л. 122,76. Печ. л. 66,0. Изд. № 77. Заказ № 491.

Издательство Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Тел.: (383)-346-31-87.

Отпечатано в типографии Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

CONTENTS

Innovative Technologies in Mechanical Engineering

Filippov A.M., Golikova E.O., Sidorov A.N., Azin A.A. Problems in the operation of the last-stage blades of steam turbines after the repair	17
Aksenova K.V., Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F. Degradation of structure and properties of silumin subjected to electron-beam treatment and high-cycle fatigue testing	23
Sidorenko S.A., Lobanov D.V., Rychkov D.A. Software for automating choice of rational composite material	30
Chinakhov D.A., Grigorieva E.G., Mayorova E.I. Influence shielding gas on the shape of weld bead in restoration of worn details	37
Walter A.V., Aksenov V.V., Chernukhin R.V. Determination of numeric values and nature of geometric errors of geokhod intermediate unit's shell	42
Rodina A.A., Kolodin A.N. Automation selection of technological equipment galvanic manufactures	48
Kozyrev N.A., Kibko N.V., Umanskii A.A., Titov D.V. The influence of nickel and carbon-fluorine containing additives on the structure and properties of deposited steel 25X5ΦMC	54
Kozyrev N.A., Titov D.V., Kibko N.V. The study of the influence of the composition of flux-cored wire ПП-Нп-35B9X3CΦ on the properties surfaced roller	60
Zverev E.A., Skeebe V.Yu., Tregubchak P.V., Vakhrushev N.V., Parts K.A., Zhigulev A.K. Operability assessment of wear-resistant plasma coatings after the high-temperature influence by high-frequency currents	65
Levchuk A.Yu., Gleym V.R., Plotnikov K.P., Cha G.O., Skeebe V.Yu. The use of automated welding complex for the hot water boilers production	71
Ivancivsky V.V., Zverev E.A., Vakhrushev N.V., Bandyurov I.V. Adhesion strength research of wear-resistant ceramic-metal plasma coatings	77
Olshanetskiy V.E., Ovchinnikov A.V., Dzhugan A.A. Possibility of using of non-spherical titanium powders for additive technologies	82
Poddubny V.I., Kryazhev J.A., Gorin E.J. The design of 3D model of dynamic process of cutting face mills in the application RecurDyn	88
Markov A.M., Cherdancev P.O., Gayst S.V., Kataeva S.A., Lapenkov E.Y. Classification of ways of management of accuracy indicators when machining of fiberglass	93
Rychkov D. A. Rationalization of milling parameters of polymer composite materials	100
Firsov A.M., Tatarkin E.Yu., Kalistru V.A. Designing of technological processes by using the foundation of heuristic techniques	106

Gileta V.P., Beznedelnyy A.I., Asanov V.B. Study of the friction force under ultrasonic reinforcing finishing treatment	111
Kalistru V.A., Firsov A.M. The method of forecasting of deviation precision shapes of thin-walled body parts	117
Gayst S.V., Markov A.M., Cherdancev P.O., Kataeva S.A., Lapenkov E.Y. Investigation of the temperature at milling fibreglass	123
Vasilevskaya S.I., Makarov V.F. Study of silicon anodic behavior in alkaline electrolyte	129
Smirnov V. V., Ovcharenko A. G. Formation group details in group technologies engineering	134
Semenova Iu.S., Likhachev A.P. Character of surface microgeometric parameters and accuracy inheritance when using ultrasonic surface hardening at finishing stage of machining	140
Shchetkin A.I., Kiselev V.S., Radchenko M.V. Designing and manufacturing the modernized supersonic gas-powder cladding torch	146
Sobachkin A.V., Sitnikov A.A., Yakovlev V.I., Sviridov A.P. Tribological properties of gas detonation composite coatings for pistons of combustion engines	152
Zhuravleva A.V., Yusupov A.S. Electrochemical dissolution composite material "aluminum-titanium" in aqueous solution of sodium nitrate and sodium chloride	156
Zimogliadova T.A., Drobyaz E.A., Mul D.O., Krivezhenko D.S. Cladding specialties of Ni-Cr-Si-B powder coatings	161
Rakhimyanov Kh.M., Gaar N.P., Loktionov A.A. The technological capabilities of high precision plasma cutting scheme HiFocus ^{plus} in processing of structural steels	166
Smagin G.I., Karmanov V.S., Fedin I.V. The approach to the control of the drilling process based on the convex tool life model	173
Korotkov A.N., Vidin D.V. Improving of abrasive the efficiency of lapping operations through the application of grains with the controllable form	185

Technological Equipment, Machining Attachments and Instruments

Markov A.M., Gabets A.V., Gabets D.A., Gavrikov D.V. Coil spring group for freight-car truck	194
Atapin V.G. Some questions at design of multi-purpose machine tool	199
Podgornyj Yu.I., Martynova T.G., Nalyvaychenko G.M., Tverdohlebov S.N., Trotsenko A.A. The research of the external mechanical influence load on the working body of the experimental mixer device	205

Glym V.R., Levchuk A.Yu., Plotnikov K.P., Cha G.O., Skeebea V.Yu. The choice of spindle vertical milling machine rational design	212
Vanin V.A., Kolodin A.N., Rodina A.A. Kinematic structure of machine tools with hydraulic connections in shaping the circuits	219
Rodina A.A., Fidarov V.H., Ermakov I.S. The research of bit wear on boring	224
Cha G.O., Skokov D.V., Glym V.R., Levchuk A.Yu., Plotnikov K.P., Skeebea V.Yu. Designing of weight point's vertical movement drive of zero gravity system	229
Neyman L.A., Neyman V.Yu. Effect of mechanical losses in the output performance of electromechanical oscillation system with electromagnetic excitation	234
Rogova O.V., Neyman V.Yu. Improve of accuracy of calculation of the linear electromagnetic motor for the electric drive of vibrocompressor	241
Neyman L.A., Schurov N.I. Method of power loss measurement in a mechanical oscillation system with electromagnetic excitation	247
Korotkov V.S., Lao Guanqing Equations of profile toothing with rounded edges for a wave gear with intermediate rolling solids	253
Smagin G.I., Yakovlev N.D., Burdukov S.D., Bulanov P.A., Kalugina N.V., Orlova I.A. Modernization of the 3B652 drill grinding machine	259
Gileta V.P., Vanag Y.V., Tischenko I.V., Vedel P.M., Ridel S.V. Pneumatic equipment for laying of communications	270
Kerzhencev V.A., Perova N.V., Kosilov A.S. Power of the meat grinder, and its distribution on cutting mechanisms	275
Kerzhencev V.A., Perova N.V., Bredikhina A.N., Pechorkina N.S. Development in tabular form the calculation of mechanisms meat grinder	282
Ryzhikov V.V., Mkrtychyan T.S., Kireeva A.K., Ignatova E. A. Problems finishing complex surfaces with electric hand tools	290
Ovcharenko A.G., Kozlyuk A.Yu., Kurepin M.O. Inductor for combined magnetic-pulse treatment	296
Shubin A.Y., Dmitriev V.S., Dammer V.H., Potekaev A.I., Savostikov V.M., Tabachenko A.N. Perspectives for the creation of slide bearings with ion-plasma anti-friction coating	301
Kataeva S.A., Markov A.M., Cherdancev P.O., Gayst S.V., Lapenkov E.Y. Design of milling cutters for the processing of fiberglass	307
Tatarkin E.Y., Ikonnikov A.M., Grebenkov R.V. Designing ways of modifying the working surface of the magnetic inductor using the methodology search designing	313
Kozlov V.N., Huang Z., Zhang J., Letshiner E.G. Calculation of strength of cutting inserts in titanium alloy machining	318

Pavlov E.V. Ensuring mechanical properties of the rotational parts working in the conditions of impact loadings	324
Gribkov E.P., Gavril'chenko E.Yu., Merezhko D.V. Mathematical modeling of wheel rims profiling	330
Korotkov V.A., Minkin E. M. Equipment for producing of grinding wheels with controlled form an orientation of abrasive grains	336
Bakanov A.A. The increase of drills with RMP operability due to the cutting plate edge profile change	340
Ptitsyn S.V., Sakha O.V., Zhigulev A.K. Problems import substitution of small-sized earth-moving machinery	346
Markov A.M., Romashev A.N. Tool system of processing equipment with the built-in measuring instrument for obtaining diagnostic information	350
Markov A.M., Romashev A.N., Perepelkin P.V. Virtual devices for collecting and processing of diagnostic information on cutting process	354

Materials Science in Machine Building

Maksimov A. B., Gulyaev M. V., Erokhina I. S. The influence of cyclic deformation on the bending strength and the ductility of low-alloy steels	358
Afanas'ev V. K., Popova M. V., Malyuh M. A. Effect of complex alloying on thermal expansion of Al-11% Si	364
Tokarev A.O., Kuzmin V.I., Malygina Ya.K., Improving the quality of powdered metal coating by plasma spraying with annular injection powder	370
Oskolkova T.N., Tyurin A.G., Strahov A.P. Super hard coating on the hard alloy VK8	378
Rashkovets M. V., Nikulina A.A., Klimova O. G. Features of material obtained by direct laser method deposition of Ni based alloy	384
Bagaev S.N., Grachev G.N., Smirnov A.L., Khomyakov M.N., Tokarev A.O., Bataeva Z.B., Gerber A.J. Influence of preliminary heat treatment of structural steel on the strengthening at laser-plasma processing	389
Loginova M.V., Yakovlev V.I., Sitnikov A.A., Filimonov V.Yu., Sobachkin A.V., Negodyaev A.Z. Gradoboev A.V. Structural transformations in mechanically activated powder mixtures Ti + Al under the influence of γ -irradiation	398
Stepanova N.V. Peculiarities education of copper-containing inclusions in cast iron, which contains 14.7 % copper	404
Guriev M.A., May Shungchi. Molded composite for mining machines	410

Butukhanov V.A., Lygdenov B.D. Diffusion carbide coatings on steel with 0,8 percent of carbon	414
Ivanova T.G., Guriev M.A., Mei Shunqi. Thermodynamic modeling of reaction at surface alloying of steel	419
Kovalenko N.D., Ivanov A.M. Mechanical properties and fracture mechanism of the extruded low-carbon steel at low temperatures	424
Lagereva D.I., Mikhaylov D.A., Provotorov V.V., Shevtsova K.E. Assessment of the deformation for UHMWPE composite compounds	429
Filippov M.A., Gervasyev M.A., Nikiforova S.M., Khadyev M.S., Ryzhkov M.A., Zhilin A.S., Estemirova S.H. The use of residual austenite to increase the abrasive wear resistance high-chromium steels	434
Matts O.E., Munkueva D.D., Bataev I.A. Influence of electron beam treatment regimes on the forming of Ti-Al system clads	440
Malutina Y.N., Skorokhod K.A., Shevtsova L.I. Composite material «titanium-steel», produced by explosion welding	446
Prudnikov A.N., Prudnikov V.A. Influence of thermocyclic forging and subsequent annealing on the coercive force and linear expansion of steel 10	451
Markov A. M., Gabets A.V., Gabets D. A., Ivanov A. V. The main warrants of increasing the durable of vital parts of railway vehicles	457
Kornienko E.E., Gnidan K.A. Structural features of plasma coatings Ni-Cr-Si-B system alloyed Nb	461
Alfyorova E.A., Lychagin D.V., Soprunov D.V. The folding structure in $[\bar{1}11]$ -Nickel single crystal	468
Yakovlev A.V., Pluzhnikova T.N., Fedorov V.A., Berezner A.D., Fedotov D.Yu. Laws of relief formation in amorphous metal alloys under local deformation	474
Ogar P.M., Gorokhov D.B. The relationship between the deformation of a spherical indenter under indentation and the deformation under tension	479
Polyansky I.P., Sizov I.G., Mishigdorzhniyn U.L., Leyens C., Vetter B. Surface saturation of low-carbon steel with boron and aluminum from pastes in thermocycling	486

Economics and Organization of the Business Innovative Processes in Engineering

Absalyamova G.A. Analysis of innovation activity of engineering companies: cooperation with university	492
Baturin V.N., Baturin D.V. Optimization of production planning of parts for profit	498
Petrushin S.I., Gubaidulina R.H. Main principles of appropriate organization of mechanical engineering production	504
Markov A. M., Markova M. I., Dronova O. B. Technological preproduction for mechanical working	511

- Lukina S. V.** Research of the efficiency of the innovative activity of the industrial enterprises with the using of the method of real option valuation 517
- Radionova L.V., Chernyshev A.D., Lisovskiy R.A.** Interactive educational system – a virtual simulator «sheet rolling» 523

УДК: 621.793.002.612

**ПРОБЛЕМЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛОПАТОК ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЕЙ
ПАРОВЫХ ТУРБИН ПОСЛЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА**

*А.М. ФИЛИППОВ¹, нач. службы металлов
Е.О. ГОЛИКОВА¹, инженер
А.Н. СИДОРОВ², директор
А.С. АЗИН², нач. лаб. неразрушающего контроля
(¹ ПАО «Т плюс», г. Екатеринбург,
² ООО «Экспертиза ПБ», г. Пермь)*

Филиппов А.М. – 620014 г. Екатеринбург, ул. Московская, 16, оф. 212,
Инженерно-технический центр Свердловской области ПАО «Т Плюс»,
e-mail: Len103126@yandex.ru

Существующие технологии ремонта изношенных лопаток последних ступеней паровых турбин не обеспечивают их высокую эксплуатационную надежность. Повреждения лопаток происходят после ремонта методом наплавки изношенных кромок с установкой защитных пластин в местах приварки пластин, по наплавкам, по отверстиям под демпферную проволоку. Наиболее распространенными причинами повреждений являются усталость металла и отсутствие необходимой термообработки перед ремонтом. Рассмотрены характерные случаи повреждений лопаток после восстановительного ремонта. Рекомендованы мероприятия по улучшению эксплуатационных свойств после ремонта.

Ключевые слова: лопатки паровых турбин, ремонт, наплавка, повреждения, усталость металла, эксплуатационные свойства.

Введение

В связи с распространением технологий восстановления изношенных лопаток паровых турбин возникает вопрос о надежности и эксплуатационной долговечности лопаток после проведенного ремонта. Технологии ремонта преимущественно схожи и заключаются в наплавке мест эрозионного износа с усилением входных кромок наварными защитными стеллитовыми пластинками [1, 2]. Однако в ходе эксплуатации лопаток после ремонта возникают повреждения в местах приварки пластин (рис.1.), по наплавкам, по разгрузочным отверстиям.



Рис. 1. Внешний вид лопатки с трещиной между защитных пластин

Методика экспериментального исследования. Результаты и обсуждение

При проведении исследования металлографический анализ проводился с помощью микроскопа «НЕОРНОТ-2» при увеличении 500 крат. Микротвердость измерялась при помощи микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 50 г.

В 2014 г. на 23-й ступени РНД турбины ПТ-135/165-130 произошел отрыв части лопатки ниже отверстия верхней демпферной связи на расстоянии 70 мм от края лопатки. Линия разрушения идет по сечению защитной пластинки. На входной кромке лопатки ниже защитной пластинки наблюдается незначительный эрозионный износ. Излом лопатки состоит из двух зон (рис.2):

1. Зона разрушения занимает ~75% общей площади излома и располагается перпендикулярно плоскости лопатки. Зону разрушения можно разделить на 2 участка:

- матовая пришлифованная поверхность светло-серого цвета, занимает ~15% общей площади излома. На этом участке виден очаг разрушения, от которого исходят концентрические дуги (рис.3).

- шероховатая крупнозернистая поверхность серого цвета, занимает ~60% общей площади излома. На этом участке имеются крупные рубцы, что показывает на высокую скорость распространения трещины.

2. Зона долома – темно-серого цвета, располагается под углом 30° к поперечному сечению лопатки. Зона долома занимает ~25% общей площади излома. Конец зоны долома у выходной кромки лопатки – блестящий, кристаллический, при отрыве произошло смятие металла.

Анализ излома показал, что очаг разрушения находится в месте приварки защитной пластинки к лопатке. Исходящие от очага концентрические линии являются линиями усталости. Шероховатая поверхность с рубцами, занимающая 60% общей площади излома, является зоной ускоренного разрушения, в которой трещина развивается с высокой скоростью. Зона ускоренного разрушения переходит в блестящую кристаллическую зону долома. Таким образом, внешний вид излома свидетельствует об усталостном характере разрушения, прошедшем за небольшой период времени.

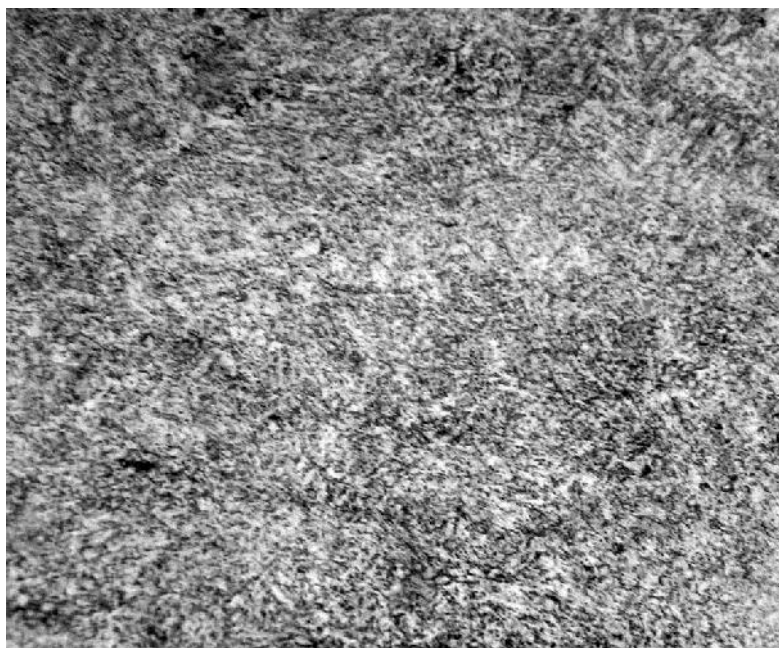


Рис.2. Излом лопатки №7



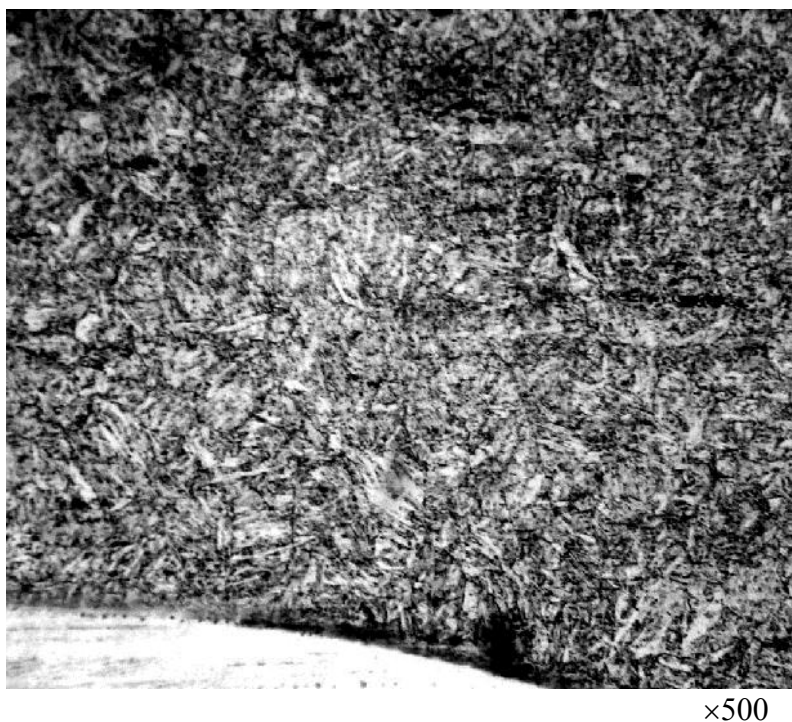
Рис.3.Очаг разрушения

Металлографический анализ проводился с помощью микроскопа «NEOPHOT-2» при увеличении 500 крат в двух зонах: на удалении от наплавленного металла и в зоне термовлияния. Микроструктура металла лопатки представляет собой сорбит, ориентированный по иглам исходного мартенсита. Иглы исходного мартенсита размыты, поскольку в процессе распада мартенсита при нагреве произошла коагуляция карбидов. Величина зерна соответствует 13 баллу по шкале ГОСТ 5639. В микроструктуре металла трещин, флокенов, рыхлости не выявлено (рис. 4, а). Структурой зоны термовлияния является троостит отпуска, в структуре отчетливо просматривается направление игл исходного мартенсита. По сравнению со структурой на удалении от наплавленного металла, в структуре зоны термовлияния наблюдается более крупное зерно. Величина зерна соответствует 11 баллу по шкале ГОСТ 5639. В микроструктуре зоны термовлияния трещин, флокенов, рыхлости не выявлено (рис. 4, б).



×500

а



б

Рис.4. Структура металла лопатки: а – на удалении от наплавленного металла; б - зоны термовлияния.

Замеры микротвердости проводились с целью определения влияния сварки на основной металл. На рис. 5 представлен образец с указанием зон, на которых определялась микротвердость металла лопатки. В каждой зоне замеры производились в 3-х точках. Результаты замеров микротвердости представлены в таблице.

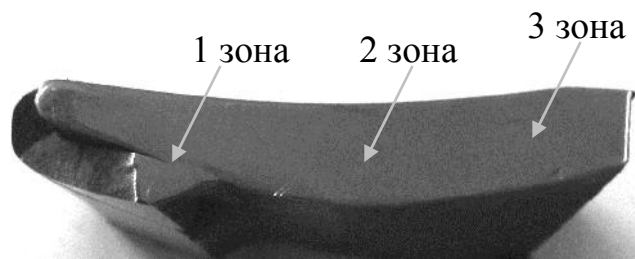


Рис. 5 Места замеров микротвердости

Таблица

Результаты замеров микротвердости

№ зоны	Расположение зоны	Среднее значение микротвердости
1	Зона термовлияния	227
2	На удалении 10 мм от наплавленного металла	200
3	На удалении 20 мм от наплавленного металла	186

Максимальная микротвердость приходится на наружную поверхность в месте приварки пластинки, т.е. на зону термовлияния. Микротвердость металла на удалении 10 мм от наплавленного металла несколько снижается, на удалении 20 мм от наплавки снижается

еще сильнее. Таким образом, максимальная разница в микротвердости зоны термовлияния и металла на удалении от наплавленного металла составляет порядка 40 ед.

До момента повреждения в 2014 г. РНД турбины находился в ремонтной организации для выполнения работ по повышению надежности ротора. По причине выявления трещин длиной 4-6 мм, идущих от демпферного отверстия к выходной кромке лопатки последней ступени были либо заменены, либо отремонтированы. В предыдущий ремонт турбины при вскрытии турбины был выявлен отрыв части рабочей лопатки №7 ниже отверстия демпферной связи. При контроле остальных лопаток 23 ступени дефектов не обнаружено. Преждевременное усталостное разрушение лопатки, которое произошло в 2014 г. связано с наличием концентраторов на наружной поверхности в виде участка сварки и изменением структуры на наружной поверхности и нижележащих слоях. Наличие концентратора напряжений на наружной поверхности (место приварки пластинки), изменения структуры, величины зерна и твердости в поверхностных слоях привели к заметному снижению предела усталости. К тому же при работе паровых турбин в районе последних ступеней могут возникнуть дополнительные напряжения, что способствует разрушению лопаток с ремонтными наплавками.

Выводы

1. Наличие наплавки на поверхности лопаток, связанные с этим локальные изменения микроструктуры, величины зерна и твердости на наружной поверхности в месте приварки защитной пластинки, могут привести к усталостным повреждениям.
2. Установка на турбины лопаток, бывших в употреблении и подвергавшихся ремонту, без дополнительной термообработки не рекомендуется.

Список литературы

1. О ресурсе основного тепломеханического оборудования ОАО «Мосэнерго» / А.Б. Попов, П.Р. Должанский, Д.А. Баршак, Е.А. Гринь // Электрические станции. – 2007. – № 11. – С. 79–84.
2. Должанский П.Р., Егоров А.В., Доброхотов С.Э. Повышение работоспособности рабочих лопаток последних ступеней турбин Т-250 // Сборник докладов научно-практической конференции «Металл оборудования ТЭС. Проблемы и перспективы» ОАО «ВТИ», Москва, 30 октября–2 ноября 2006 г. – М., 2006. – С. 79–82.

**PROBLEMS IN THE OPERATION OF THE LAST-STAGE BLADES OF STEAM
TURBINES AFTER THE REPAIR**

Filippov A. M.¹, Head of department, Engineer, e-mail: len103126@yandex.ru,
Aleksey.M.Filippov@tplusgroup.ru

Golikova E. O.¹, Engineer, e-mail: Evgeniya.Golikova@tplusgroup.ru

Sidorov A. N.², Director, e-mail: xpertizapb@mail.ru

Azin A. A.², Head of Laboratory, e-mail: Azin-72@yandex.ru

¹ PJSC "T Plus", 16 Moskovskaja st., Yekaterinburg, 620014, Russian Federation

² ExpertizaPB, Ltd, 4/2 Holmogorskaya, Perm, 614083, Russian Federation

Abstract

The existing technologies of repair of worn-out blades of the last stages of steam turbines do not provide a high degree of operational reliability. After repair of blades by welding the edges with the installation of protective plates damage to the blades occurs in places of welding of plates, on the holes for damping wire. The most common causes of damage are fatigue of metal and lack of proper heat treatment prior to restoration. Considered typical cases of damage of the blades after the repair. Recommended measures to improve operational properties after repair.

Keywords

blades for steam turbines, repairing, surfacing, damage, metal fatigue, operational properties

УДК: 533.9:539.4

**ДЕГРАДАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СИЛУМИНА, ПОДВЕРГНУТОГО
ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ И МНОГОЦИКЛОВЫМ
УСТАЛОСТНЫМ ИСПЫТАНИЯМ***

*К.В. АКСЁНОВА¹, аспирант
В.Е. ГРОМОВ¹, доктор физ.-мат наук, профессор
С.В. КОНОВАЛОВ¹, доктор техн. наук, доцент
Ю.Ф. ИВАНОВ², доктор физ.-мат наук, профессор
(¹ СибГИУ, г. Новокузнецк, ² ИСЭ СО РАН, г. Томск)*

Аксёнова К.В. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: alsaraeva_kv@physics.sibsiu.ru

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии выполнен анализ изменения структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры силумина, подвергнутого электронно-пучковой обработке (ЭПО) с последующим усталостным нагружением до разрушения. Установлено, что ЭПО силумина независимо от используемых режимов облучения приводит к формированию в поверхностном слое структуры ячеистой кристаллизации.

Изучены трибологические и прочностные свойства поверхности силумина после электронно-пучковой обработки и усталостных испытаний. Выявлено, что многоцикловые усталостные испытания приводят к снижению нанотвердости, увеличению интенсивности изнашивания и коэффициента трения. Показано, что одной из основных причин снижения прочностных и трибологических свойств поверхностного слоя силумина является интенсивная деформация материала, протекающая при многоцикловых усталостных испытаниях и приводящая к разрушению структуры высокоскоростной кристаллизации, сформированной при ЭПО.

Ключевые слова: структура, фазовый состав, электронно-пучковая обработка, силумин, усталость, ячеистая кристаллизация.

Введение

Для повышения механических и эксплуатационных свойств сталей и сплавов в последние годы используются концентрированные потоки энергии [1, 2]. Одним из перспективных методов поверхностного упрочнения металлов и сплавов является электронно-пучковая обработка (ЭПО) [3-5]. В настоящее время ЭПО является уникальным и высокоэффективным инструментом как для исследования физической природы формирования градиентных структурно-фазовых состояний, так и для целенаправленной модификации структуры и свойств силуминов для улучшения их эксплуатационных характеристик [6-9].

* Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (проект МД-2920.2015.8) и государственного задания № 3.1496.2014/К.

Обработка поверхности нержавеющей стали [4, 10] и силумина [11, 12] высокоинтенсивным импульсным электронным пучком сопровождается кратным (более чем в 3,5 раза) увеличением усталостной долговечности этих материалов. Основной причиной такого эффекта для силумина является диспергирование и квазиоднородное распределение кремния в модифицированном ЭПО слое [11, 12].

Последующие после ЭПО усталостные испытания должны приводить к изменению структурно-фазовых состояний, прочностных и трибологических свойств поверхности. Целью настоящей работы является исследование изменений при усталостном нагружении структурно-фазовых состояний и свойств поверхности силумина, подвергнутого предварительной электронно-пучковой обработке (ЭПО) с целью повышения усталостного ресурса.

Материал и методика исследования

Усталостные испытания силумина марки АК12 проводили на специальной установке по схеме циклического асимметричного консольного изгиба [10]. Образцы имели форму параллелепипеда с размерами 8x14x145 мм. Имитация трещины осуществлялась надрезом в виде полуокружности радиуса 10 мм. Температура испытаний 300 К, частота нагружения образцов изгибом составляла 15 Гц при нагрузке 10 МПа. Облучение поверхности образцов, приготовленных для усталостных испытаний, осуществляли на установке «СОЛО» (ИСЭ СО РАН) при следующих параметрах: энергия электронов 18 кэВ; частота следования импульсов $0,3 \text{ с}^{-1}$; длительность импульса пучка электронов $\tau = 50$ и 150 мкс ; плотность энергии пучка электронов $E_s = 10, 15, 20, 25 \text{ Дж/см}^2$; количество импульсов воздействия $N = 1, 3, 5$. Облучали лицевую поверхность образцов, т.е. поверхность образца, находящуюся над надрезом, имитирующим трещину. На каждый режим облучения испытывали не менее 5 образцов. Исследования структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры поверхности модифицирования проводили методами просвечивающей микродифракционной электронной микроскопии (JEM-2100 F, JEOL). Прочностные свойства материала изучали, определяя микротвердость (микротвердомер HVS-1000, нагрузка на индентор 0,098 Н) и нанотвердость (нанотвердомер NANO Hardness Tester NHT-S-AX-000X, нагрузка на индентор 5-300 мН). Исследования скорости износа системы пленка/подложка проводилось в геометрии диск-штифт с помощью трибометра (CSEM, Швейцария) при комнатной температуре и влажности.

Результаты эксперимента и их обсуждение

В работе [11] показано, что при параметрах облучения (20 Дж/см^2 ; 150 мкс ; $0,3 \text{ с}^{-1}$; 1 имп. – 1-й режим обработки) количество циклов до разрушения составляет ≈ 132000 ; при (20 Дж/см^2 ; 150 мкс ; $0,3 \text{ с}^{-1}$; 5 имп. – 2-й режим обработки) – 517000 . Первый режим обработки лишь незначительно увеличивает число циклов до разрушения, тогда как второй \sim в 3,5 раза увеличивает усталостный ресурс (число циклов до разрушения исходного материала составляло 130000).

Результаты трибологических испытаний образцов силумина в исходном состоянии и состоянии после облучения высокоинтенсивным импульсным электронным пучком представлены на рис. 1. Минимальными интенсивностью изнашивания (рис. 1, темные столбики) и коэффициентом трения (рис. 1, светлые столбики) обладают образцы силумина после ЭПО по режиму 1, прошедшие усталостные испытания в течение 132000 циклов (рис. 1, режим 1). После многоцикловых (517000 циклов) усталостных испытаний интенсивность

изнашивания и коэффициент трения силумина, подвергнутого ЭПО по режиму №2 (рис. 1, режим 2), возрастают, однако также остаются ниже относительно показателей, зафиксированных для исходного материала (необлученного материала перед усталостными испытаниями) (рис. 1, режим 0). Таким образом, оптимальной обработкой поверхности силумина с точки зрения трибологических испытаний является облучение интенсивным импульсным электронным пучком по режиму №1, при котором интенсивность изнашивания материала снижается в 2,1 раза, а коэффициент трения – в 1,15 раза.

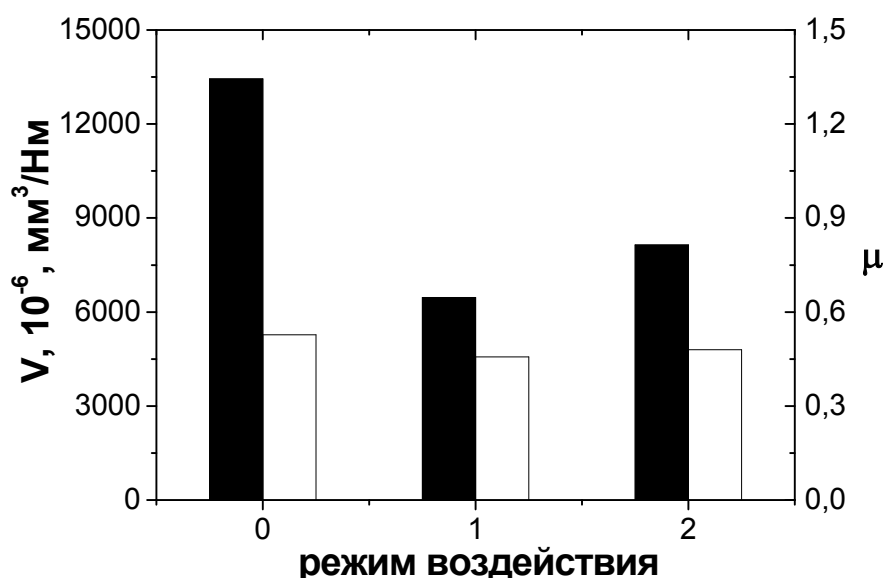


Рис. 1. Значения интенсивности изнашивания V (темные столбики) и величины коэффициента трения μ (светлые столбики) при различных режимах воздействия на силумин: 0 – без облучения после усталостных испытаний (130000 циклов); 1 – ЭПО по режиму №1 и последующие усталостные испытания (132000 циклов); 2 – ЭПО по режиму №2 и последующие усталостные испытания (517000 циклов)

Механические свойства образцов после усталостных испытаний изучали, определяя микротвердость и нанотвердость. Профили микротвердости модифицированных образцов приведены на рис. 2. Анализируя результаты, полученные при измерении микротвердости на поперечных шлифах (рис. 2), можно сделать вывод, что ЭПО приводит к формированию в образцах силумина упрочненного поверхностного слоя толщиной ~ 30 мкм, в котором величина микротвердости в зависимости от режима ЭПО от 2 до 5 раз превышает микротвердость основы.

ЭПО по режиму №1 приводит к многократному (в 5,6 раза) увеличению нанотвердости поверхностного слоя при малых нагрузках на индентор (рис.3, а, кривая 1). Увеличение числа циклов усталостного нагружения приводит к снижению нанотвердости поверхностного слоя в $\approx 4,5$ раза (рис. 3, б, кривая 1). Подобным же образом изменяется и величина модуля Юнга силумина (рис. 3, кривая 2): увеличение числа циклов усталостных испытаний приводит к многократному (в 3...4 раза) снижению модуля Юнга поверхностного слоя материала.

Сопоставляя результаты определения твердости материала при различных нагрузках на индентор (микротвердометрия (рис. 2) и нанотвердометрия (рис. 3)), можно отметить явное расхождение (в 1,5-3 раза) в количественных значениях полученных результатов при хорошем их качественном согласии. Это можно объяснить тем, что при наноконтактном взаимодействии вследствие малых (десятки нанометров) размеров отпечатка существенно

снижается степень дефектности материала под отпечатком, что способствует приближению поведения реального материала к идеальному со значениями твердости, близкими к теоретически возможным [13].

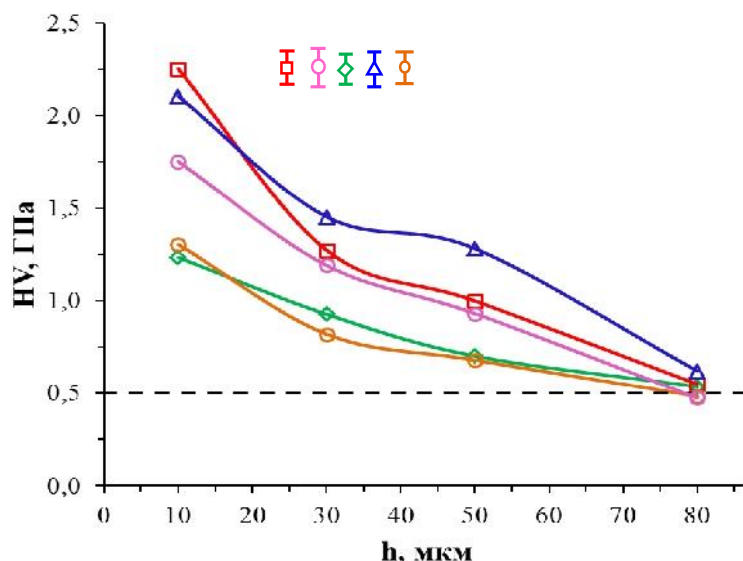


Рис. 2. Профили микротвердости образцов силумина, подвергнутых ЭПО и многоцикловому усталостному нагружению до разрушения. Цифрами указаны режимы ЭПО с параметрами: 1 – 20 Дж/см², 150 мкс, 1 имп.; 2 – 15 Дж/см², 150 мкс, 3 имп.; 3 – 25 Дж/см², 150 мкс, 3 имп.; 4 – 20 Дж/см², 150 мкс, 5 имп.; 5 – 10 Дж/см², 150 мкс, 5 имп. Пунктирной линией обозначена микротвердость силумина в исходном (литом) состоянии.

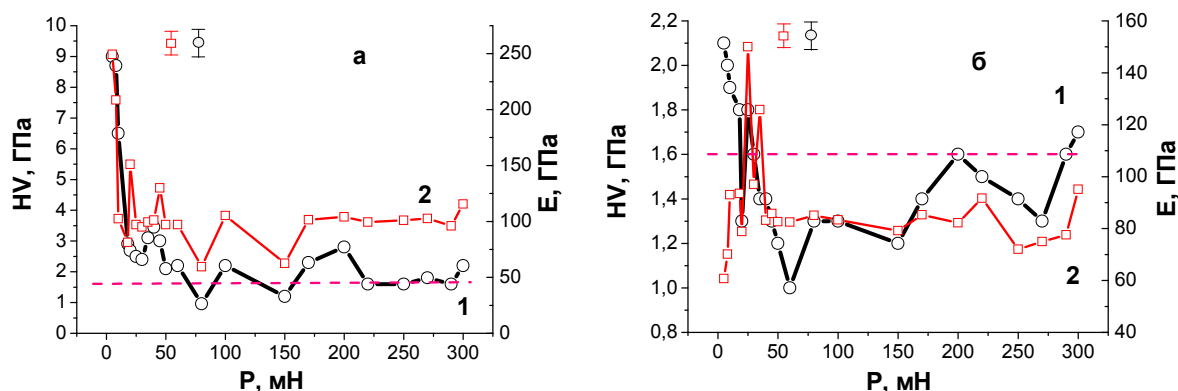


Рис. 3. Зависимости нанотвердости (кривая 1) и модуля Юнга (кривая 2) поверхностного слоя силумина, подвергнутого ЭПО и многоцикловым усталостным испытаниям до разрушения, от нагрузки на индентор. а – ЭПО по режиму №1, 132000 циклов; б – ЭПО по режиму №2, 517000 циклов. Пунктирной линией указана нанотвердость силумина в исходном состоянии

Очевидно, что наблюдаемые изменения трибологических и прочностных характеристик силумина вызваны изменением структурно-фазовых состояний поверхностного слоя в процессе усталостных испытаний. Сформированная при ЭПО структура ячеистой кристаллизации [12] существенно модифицируется при многоцикловых усталостных испытаниях. После 517000 циклов нагружения наблюдается

наноструктуризация прослоек кремния и полное разрушение структуры ячеистой кристаллизации (рис. 4). Это сопровождается глобуляризацией частиц кремния, равномерно располагающихся в объеме зерен (рис. 4, а), и формированием сетчатой дислокационной субструктуры со скалярной плотностью дислокаций $3,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (рис. 4, в). Сравнение этих данных с результатами трибологических и механических испытаний (рис. 1-3) позволяет заключить, что разрушение структуры ячеистой кристаллизации при многоциклового усталости может явиться одной из основных причин изменения указанных свойств силумина.

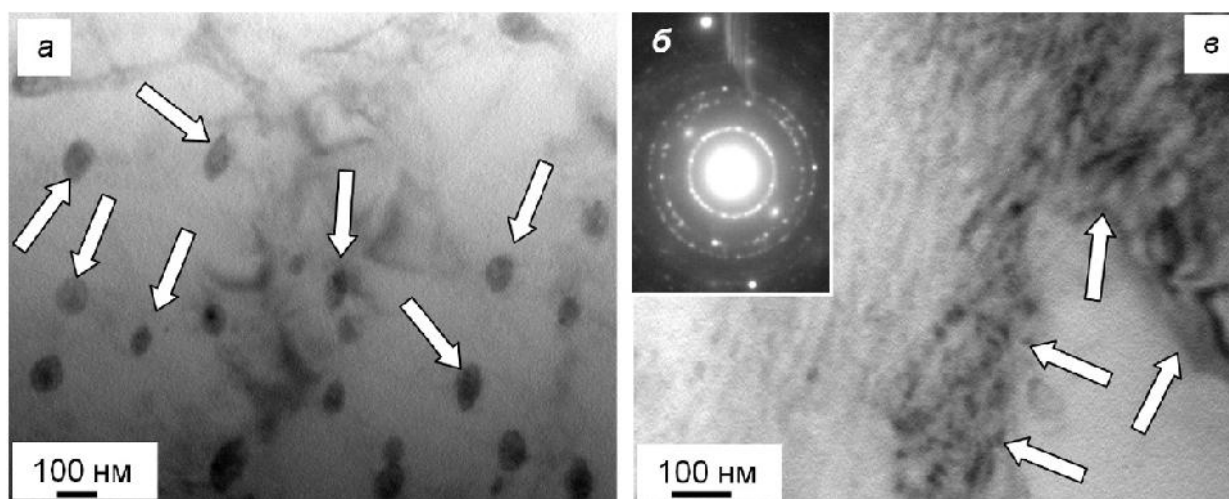


Рис. 4. ПЭМ изображение структуры силумина, подвергнутого ЭПО по режиму №2 и разрушенного после 517000 циклов. а, в – светлые поля; б – микроэлектронграмма, полученная с (в); стрелками указаны частицы кремния, расположенные в зерне алюминия (а) и в прослойках кремния (в).

Выводы

Проведены исследования трибологических и прочностных свойств поверхности силумина, подвергнутого ЭПО в различных режимах и усталостным испытаниям до разрушения. ЭПО приводит к формированию в образцах силумина упрочненного поверхностного слоя толщиной ~ 30 мкм, в котором величина микротвердости в зависимости от режима ЭПО от 2 до 5 раз превышает микротвердость основы. Выявлено, что ЭПО с параметрами 20 Дж/см^2 ; 150 мкс; 1 имп. способствует снижению коэффициента трения (в 1,15 раза) и интенсивности изнашивания (в 2,1 раза), а также многократному (в 5,6 раза) увеличению нанотвердости поверхностного слоя при малых нагрузках.

Многоциклового усталостные испытания (517000 циклов) приводят к снижению нанотвердости, увеличению интенсивности изнашивания и коэффициента трения. Интенсивная деформация материала, протекающая при многоциклового усталостных испытаниях и приводящая к разрушению структуры высокоскоростной кристаллизации и является одной из основных причин снижения прочностных и трибологических свойств поверхностного слоя силумина.

Список литературы

1. *Самотугин С.С., Лецинский Л.К.* Плазменное упрочнение инструментальных материалов. – Донецк: Новый мир, 2002. – 338 с.
2. *Диденко А.Н., Лигачев А.Е., Куракин И.Б.* Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 184 с.
3. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки металлов / В.А. Грибков, Ф.И. Григорьев, Б.А. Калинин, В.Л. Якушин. – М.: Круглый год, 2001. – 528 с.
4. Fatigue of steels modified by high intensity electron beams / V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, S.V. Vorobiev, S.V. Konovalov. – Cambridge: Cambridge International Science Publ., 2015. – 272 p.
5. Fundamentals and applications of material modification by intense pulsed beams / S.Z. Hao, Y. Qin, ; X.X. Mei, B. Gao, J.X. Zuo, Q.F. Guan, C. Dong, Q.Y. Zhang // Surface & Coatings Technology. – 2007. – Vol. 201. – P. 8588–8595.
6. Surface modification of Al-12.6Si alloy by high current pulsed electron beam / Y. Hao, B. Gao, G.F. Tu, H. Cao, S.Z. Hao, C. Dong // Applied Surface Science. – 2012. – Vol. 258. – P. 2052–2056.
7. Influence of high current pulsed electron beam (HCPEB) treatment on wear resistance of hypereutectic Al-17.5Si and Al-20Si alloys / Y. Hao, B. Gao, G.F. Tu, Z. Wang, S.Z. Hao // Materials Science Forum. – 2011. – Vol. 675–677. – P. 693–696.
8. Study on continuous solid solution of Al and Si elements of a high current pulsed electron beam treated hypereutectic Al-17.5Si alloy / B. Gao, Y. Hao, W.F. Zhuang, G.F. Tu, W.X. Shi, S.W. Li, S.Z. Hao, C. Dong, M.C. Li // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 18. – P. 187–192.
9. Effect of HCPEB treatment on microstructure and microhardness of hypereutectic Al-20Si alloy / Y. Hao, B. Gao, G.-F. Tu, W.-X. Shi, S.-W. Li, S.-Z. Hao, C. Dong // Transactions of Materials and Heat Treatment. – 2010. – Vol. 31. – P. 142–145.
10. Усталость сталей, модифицированных высокоинтенсивными электронными пучками / под ред. В.Е. Громова, Ю.Ф. Иванова. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2012. – 403 с.
11. Fatigue life of silumin treated with a high-intensity pulsed electron beam / Yu.F. Ivanov, K.V. Alsaraeva, V.E. Gromov, N.A. Popova, S.V. Konovalov // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2015. – Vol. 9, N 5. – P. 1056–1059.
12. Structural evolution of silumin treated with a high-intensity pulse electron beam and subsequent fatigue loading up to failure / V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, A.M. Glezer, S.V. Konovalov, K.V. Alsaraeva // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. – 2015. – Vol. 79, N 9. – P. 1169–1172.
13. Deformation at the nanometer and micrometer length scales : effects of strain gradients and dislocation starvation / W.D. Nix, J.R. Greer, G. Feug, E.T. Lilleoden // Thin Solid Films. – 2007. – Vol. 515. – P. 3152–3157.

DEGRADATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF SILUMIN SUBJECTED TO ELECTRON-BEAM TREATMENT AND HIGH-CYCLE FATIGUE TESTING

Aksenova K.V.¹, Ph.D. student, e-mail: alsaraeva_kv@physics.sibsiu.ru

Gromov V.E.¹, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Konovalov S.V.¹, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: konovalov@physics.sibsiu.ru

Ivanov Yu.F.², D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: yufi55@mail.ru

¹ Siberian State Industrial University, 42 Kirov Street, Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

² Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 2/3 Prospect Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

Abstract

Nowadays silumins find wide application in manufacturing of the critical parts working in regimes of cyclic deformations determining the failure even under insignificant loads. Practically they are not hardened by thermal treatment due to the small difference in solubility of silicon at high and low temperature therefore the most important methods of improving their strength and mechanical properties is modification. One of the promising and approved methods of modification of structure-phase states of surface layers of metals and alloys is electron-beam processing (EBP).

The analysis of variation of structure-phase states and defect substructure of silumin subjected to electron beam processing followed by fatigue loading up to the failure was carried out by methods of transmission electron diffraction microscopy. It was established that EBP of silumin resulted in the formation of cellular crystallization structure in surface layer independent of irradiation regimes used. The following multi-cycle fatigue tests resulted in the failure of cellular crystallization structure accompanied by globularization of silicon particles.

The tribology and strength properties of silumin surface after electron beam processing and fatigue tests were studied. It was revealed that multi-cycle fatigue tests result in reduction in nanohardness, increase in wear intensity and friction coefficient. It was shown that one of the main reasons of reduction in strength and tribological properties of silumin surface layer was intensive deformation of the material taking place under multi-cycle fatigue tests and leading to failure of high speed crystallization structure formed in EBP.

Keywords

Structure, phase composition, electron beam treatment, silumin, fatigue, cellular crystallization

Funding

This work was supported by a grant of the RF President for state support of young Russian scientists - doctors (MD-2920.2015.8 project) and state task № 3.1496.2014 / K.

УДК 621.9.02

**ПРОГРАММНЫЙ ПРОДУКТ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ВЫБОРА
РАЦИОНАЛЬНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА***

*С.А. СИДОРЕНКО, магистрант
Д.В. ЛОБАНОВ, доктор техн. наук, профессор
Д.А. РЫЧКОВ, канд. техн. наук, доцент
(БрГУ, г. Братск)*

Лобанов Д.В. – 665709, г. Братск, ул. Макаренко 40,
Братский государственный университет,
e-mail: mf_nauka@brstu.ru

В статье представлены пути повышения эффективности применения композитов, которыми предлагается заменить общепринятые конструкционные и другие материалы в области машиностроения, там, где это возможно; отмечена необходимость в структурировании, систематизации данных о композитах, и автоматизации операций поиска, анализа и принятия синтезированного решения по выбору рационального композиционного материала; раскрыты этапы разработки программного модуля для подготовки производства изделий из композитов; изображен алгоритм, в основе которого лежит методика многокритериального анализа и выбора рационального объекта; представлен программный продукт для выбора рациональных композиционных материалов по их параметрам (плотность, предел прочности при: растяжении; сжатии; изгибе, модуль упругости, стоимость, теплопроводность и т.д.) в условиях реального производства; описан принцип работы программного продукта; отражены перспективы дальнейшей реализации результатов исследований.

Ключевые слова: композиционные материалы; подготовка производства; автоматизация; эффективность; рациональный выбор; программный модуль.

Введение

Общепринятые конструкционные материалы – металлы и их сплавы на сегодняшний день, не в состоянии удовлетворить возросшие требования по прочности, износостойкости, долговечности и многим другим эксплуатационным показателям, существующие методы повышения свойств металлов и сплавов затратны, требуют дополнительного оборудования и оснастки [1 - 5], поэтому актуальна разработка и использование для этих целей композитов. Композиционные материалы, а также конструкции и изделия из них, имеют высокие удельные прочностные и упругие характеристики, стойкость к агрессивным химическим средам, низкие тепло- и электропроводность, хорошие триботехнические характеристики, что необходимо для развития науки и техники [6 - 11].

В настоящее время известно множество композитов, все они по-своему индивидуальны и имеют определенные характеристики, что в свою очередь, ведет к затруднениям, связанным с их рациональным выбором. Требуется разносторонний,

* Работа выполнена в рамках проекта У.М.Н.И.К.-2015 № 0011203 «Разработка системы автоматизации процесса подготовки производства изделий из композиционных материалов с использованием лезвийного инструмента»

комплексный анализ материалов с учетом показателей, наиболее значимых для определенного вида продукции. Это, как правило, трудоемкий и длительный процесс, так как требует обработки большого массива информации, что, зачастую, останавливает, или ограничивает производителей изделий из композиционных материалов. Поэтому для повышения эффективности процесса подготовки производства, существует необходимость в структурировании, систематизации данных о композитах, и автоматизации операций поиска, анализа и принятия синтезированного решения по выбору рационального композиционного материала. [12, 13].

Методика исследования

Для решения поставленных проблем на кафедре «Технология машиностроения» БрГУ разработан программный продукт для создания базы данных композиционных материалов [14]. Он представляет собой инструмент, позволяющий пользователю в диалоговом режиме вести заполнение, редактирование и поиск информации о композитах. Систематизация и структурирование данных о материалах, в одном программном продукте позволяет автоматизировать выбор рационального композита по его физико-механическим и технико-экономическим показателям с учетом определенных условий производства [15].

Композиты, в зависимости от свойств, имеют определенные преимущества и недостатки. При выборе материала рекомендуется руководствоваться теми параметрами, которые характеризуют наиболее приемлемые условия изготовления и (или) эксплуатации изделия. Так, например, выбор и анализ композиционных материалов возможно проводить на основе их физико-механических свойств и технико-экономических показателей. Для определения рационального композиционного материала нами предлагается использовать методику многокритериального анализа и выбора объекта [16, 17], сущность, которой заключается в выявлении параметров наиболее значимых на момент принятия синтезированного решения. Для упрощения процедуры расчета методика реализована в программном модуле для выбора рационального композиционного материала, представленного в данной статье.

Процесс выбора рационального композита требует, прежде всего, занести в базу данных основную информацию о композитах: вид, название и марку композиционного материала, физико-механические свойства, их стоимости и специфическую информацию производителя. После заполнения базы данных необходимо указать значимые в заданных условиях показатели, характерные для композиционных материалов и, если имеется необходимость, задать (уточнить) предельные значения параметров, после чего - осуществить выбор материала. Важно помнить, что программа определяет рациональный материал из множества, с учетом заданного вида, поэтому для выбора желательно в базе данных иметь не менее двух марок композиционных материалов одного вида. Для визуального восприятия процесса выбора рационального композиционного материала составлен алгоритм, который представлен на рис.1.

Алгоритм реализован в программном модуле, представленном на рис 2. Диалоговое окно программы содержит блок по выбору значимых свойств материалов, который предназначен для избрания приоритетных на момент принятия решения свойств композитов (установка/снятие меток напротив названий свойств композитов). В этом блоке модуля содержатся физико-механические и эксплуатационные свойства материалов: плотность, предел прочности (при растяжении, сжатии, изгибе), модуль упругости, теплопроводность, предельная температура эксплуатации; твердость по Бринеллю; водопоглощение за 24 часа и стоимость композитов. В нижней части модуля расположен блок, в котором отражаются результаты анализа и выбора. Следует отметить, что при увеличении количества

показателей, анализ и выбор полимерного композиционного материала будет более обоснованным. При необходимости, в дальнейшем, программа может быть дополнена другими свойствами и параметрами, характеризующими композиты.

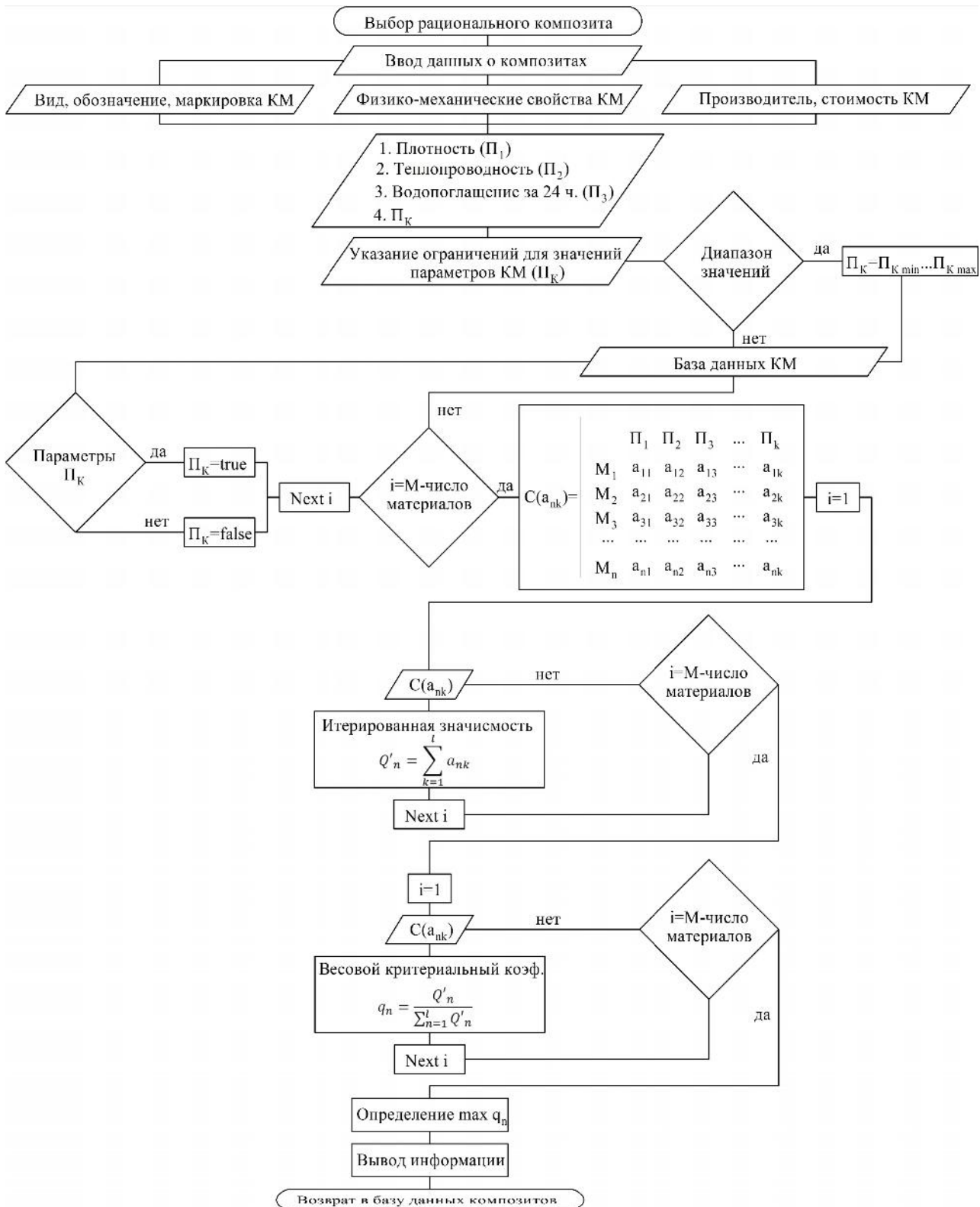


Рис. 1. Алгоритм выбора рационального композиционного материала

Выбор рационального материала

Выберите значимые свойства материала

Плотность (кг / м³)

Теплопроводность (ккал / мм²)

Предел прочности при:

растяжении (МПа)

сжатии (МПа)

изгибе (МПа)

Модуль упругости (ГПа)

Пределная температура эксплуатации:

минимальная (град. С)

максимальная (град. С)

Твердость по Бринеллю (МПа)

Стоимость (руб. / м²)

Водопоглощение за 24 часа (%)

Пределные значения

Произвести расчет

Рассчитанные значения

Рациональный материал:

1. Стеклотекстолит ВФТ-С

Альтернативные варианты:

2. Стеклотекстолит КАСТ-В

3. Текстолит ПТК

Рис. 2. Диалоговое окно для выбора рационального композита

Для выбора рационального композита пользователю необходимо в диалоговом режиме избрать значимые на момент принятия решения параметры, путем установки меток напротив приоритетных свойств. После чего, если пользователю необходимы уточненные предельные значения того или иного показателя, требуется нажать на кнопку «Пределные значения» (рис. 2) и в открывшемся дополнительном диалоговом окне (рис. 3) задать численные ограничения параметров композиционных материалов. Стоит отметить, что для редактирования предельных значений доступны только поля тех свойств, которые ранее выбраны в качестве приоритетных. После указания ограничений параметров композиционных материалов необходимо нажать на кнопку «Сохранить ограничения» в результате чего система вернется к предыдущему диалоговому окну (рис. 2). Затем следует осуществить выбор рационального композита путем нажатия на кнопку «Произвести расчет».

Пределные значения параметров

Введите предельные значения параметров

Плотность	Теплопроводность
min max	min max
1100 1300 кг/м ³	ккал/мм ²
Предел прочности при: растяжении	Пределная температура эксплуатации: минимальная
min max	min max
МПа	град. С
сжатии	максимальная
min max	min max
1800 2100 МПа	град. С
изгибе	Твердость по Бринелю
min max	min max
МПа	МПа
Модуль упругости	Водопоглощение за 24 часа
min max	min max
1900 2400 ГПа	%
Стоимость	
min max	
руб. / м ²	

Сохранить ограничения

Рис. 3. Диалоговое окно для ввода предельных значений параметров композиционных материалов

Если в численных ограничениях свойств нет необходимости, то на этапе выбора значимых параметров, следует нажать на кнопку «Произвести расчет», в результате чего система произведет расчет на основе имеющихся данных в базе, а в блоке «рассчитанные значения» отобразятся рациональный материал и два альтернативных.

Выводы

Представленный в данной статье программный продукт, позволит за счет автоматизации значительно повысить эффективность процесса подготовки производства изделий из композиционных материалов, ускорить принятие синтезированного решения по выбору рационального композита технологами в условиях реального производства и тем самым увеличить применяемость композиционных материалов в различных областях промышленной индустрии.

Список литературы

1. Actual problems and decisions in machine building / ed. by V.Yu. Skeebea. – Pfaffikon: Trans Tech Publ. – 2015. – 344 p. – (Applied mechanics and materials; vol. 788). – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788. – ISBN 978-3-03835-551-9.
2. Методика назначения режимов обработки при интеграции абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ / В.В. Иванцовский, В.Ю. Скиба, Н.П. Зуб, С.В. Туревич // Современные проблемы в технологии машиностроения: Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения профессора Муханова И.И.: сборник трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 84–93.
3. Анализ напряженно-деформированного состояния материала при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты / В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 3 (64). – С. 90–102.
4. Станочное оборудование, основанное на комплексировании нескольких технологических операций / В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев, В.Ю. Скиба // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 245–255.
5. Perspective of high energy heating implementation for steel surface saturation with carbon / N. Plotnikova, A. Losinskaya, V. Skeebea, E. Nikitenko // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 351–354.
6. Буланов Н.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.
7. *Matthews F.L., Rawlings R.D.* Composite materials: engineering and science. – Oxford, England: Alden Press, 1999. – 470 p.
8. Composite materials based on wastes of flat glass processing / A.V. Gorokhovskiy, J.I. Escalante-Garcia, G.Yu. Gashnikova, L.P. Nikulina, S.E. Artemenko // Waste Management. – 2005. – Vol. 25, N 7. – P. 733–736.
9. *Chung D.D.L.* Composite materials: science and applications. Functional materials for modern technologies. – London: Springer, 2004. – 293 p.
10. *Markov A.M.* Technological features machining of composite materials // Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. – 2014. – N 7 (37). – P. 3–8.
11. *Mordvin M.A., Yakimov S.V., Baklushin S.M.* Recommendations for the machining of composite materials // Bulletin of Izhevsk State Technical University. – 2010. – N 2. – P. 26–29.
12. Доц М.В., Марков А.М. Автоматизация проектирования токарной обработки композиционных материалов // Инновации в машиностроении: сборник трудов 2-ой Международной научно-практической конференции / под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово, 2011. – С. 112–115.
13. Организация инструментального хозяйства при обработке композиционных материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Н.П. Петров // СТИН. – 2010. – № 11. – С. 2–4.
14. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Автоматизация инструментальной подготовки в условиях действующего производства // Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Томск, 2014. – С. 42–46.
15. Фролов С.Е. Построение иерархической структуры, проектирование реляционной базы данных для полимерных композиционных материалов и проведение расчетных экспериментов по выборкам параметрической информации // Вопросы материаловедения. – 2001. – № 3 (27).

16. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Анализ конструктивных решений фрезерного сборного инструмента для обработки композиционных материалов // Технология машиностроения. – 2011. – № 5. – С. 20–25.

17. Анализ и рациональный выбор полимерных композиционных материалов для изделий по их физико-механическим свойствам / Д.В. Лобанов, С.А. Сидоренко, Д.А. Ющенко, А.В. Большешапова // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 206–213.

SOFTWARE FOR AUTOMATING CHOICE OF RATIONAL COMPOSITE MATERIAL

Sidorenko S. A., Master's Degree student, e-mail: kheller.dzhim@mail.ru

Lobanov D. V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mf_nauka@brstu.ru

Rychkov D. A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: dielektrik84@mail.ru

Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

Abstract

The article presents ways to improve the efficiency of the composites, which is proposed to replace conventional construction and other materials in the field of engineering, where possible; The need in structuring, organizing of composite data, and automation of the search operations, analysis and decision-synthesized solutions of choice rational composite material; Revealed stages of software development unit for the preparation of composite products manufacturing; It depicts an algorithm which is based on multi-criteria analysis technique and rational selection object; presented program product for rational choice of materials for their composition parameters (density, tensile strength: tensile, compressive, bending modulus, cost, thermal conductivity, etc.) under conditions of actual production; It describes the principle of software; reflects the prospects for further implementation of the research results.

Keywords

Composite materials; preparation of production; automation; efficiency; rational choice; software module

УДК 621.791.55

**ВЛИЯНИЕ РАСХОДА ЗАЩИТНОГО ГАЗА НА ФОРМУ НАПЛАВЛЯЕМОГО
ВАЛИКА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ***

*Д.А. ЧИНАХОВ¹, к.т.н. доцент
Е.Г. ГРИГОРЬЕВА¹, ассистент
Е.И. МАЙОРОВА^{1,2}, аспирант
(¹ЮТИ ТПУ, г. Юрга,
²ТПУ, г. Томск)*

Чинахов Д.А.- 652055, г. Юрга, ул. Ленинградская д.26,
Юргинский технологический институт
Национального исследовательского Томского политехнического университета,
e-mail: chinakhov@tpu.ru

Приведены способы управления геометрией наплавляемого валика при наплавке плавящимся электродом. Дана сравнительная оценка геометрических параметров навариваемого валика для наплавки с традиционной (одноструйной) газовой защитой и двухструйной. Расчет коэффициентов характеризующих форму наплавленных валиков подтвердил влияние расхода защитного газа на формирование наплавленного слоя, особенно при двухструйной газовой защите.

Ключевые слова: наплавка, защитный газ, наплавляемый слой, газодинамическое влияние, двухструйная газовая защита.

Введение

В настоящее время проблема срока службы деталей машин и агрегатов, их долговечности и надежности приобрела весьма большое значение. Срок службы быстро изнашивающихся деталей определяет рентабельность многих дорогостоящих машин. Современные тенденции интенсификации производственных процессов, увеличения рабочих давлений, скоростей, температуры приводят к ускорению изнашивания деталей, и в сочетании с необходимостью автоматизации производства, делают проблему повышения долговечности быстро изнашиваемых узлов машин ещё более острой [1].

Восстановить деталь можно с помощью наплавки, нанося расплавленный металл на поверхность изделия, нагретую до оплавления или до температуры надежного смачивания жидким наплавленным металлом. Наплавленный металл связан с основным металлом весьма прочно и образует одно целое с изделием. Толщина наплавленного металла, образованного одним или несколькими слоями, может быть различной: 0,5 ... 10 мм и более. [2].

Существуют различные способы наплавки: электродуговая наплавка под слоем флюса, электрошлаковая, вибродуговая, импульсно-дуговая, плазменная, электромагнитная, лазерная, электроконтактная наплавка [3].

Все перечисленные способы обладают определенными преимуществами, но и имеют ряд недостатков, сдерживающих их широкое применение.

В настоящее время наиболее распространённым способом восстановления рабочих поверхностей, является наплавка в среде защитных газов. Процесс характеризует: низкая

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. № 16-38-00194 мол. а.

себестоимость, высокая производительность, возможность формирования наплавленных поверхностей с большим диапазоном свойств. Наплавка в CO_2 , имеет и недостатки: большие потери электродного материала, снижение усталостной прочности восстанавливаемых деталей. Авторы работ [4-6] предлагают усовершенствовать технологии наплавки. Но для реализации усовершенствованных технологий наплавки необходимо изготовление дорогостоящего оборудования. Что является сдерживающим фактором, ограничивающим широкое применение данных способов.

Наплавка в среде защитных газов характеризуется значительным термическим воздействием на деталь, вследствие чего в наплавленном слое содержится значительная доля основного металла. Необходимые свойства металла наплавленного слоя зависят от его химического состава, который, в свою очередь, определяется составом основного и дополнительного металлов и долями их участия в образовании шва. Влияние основного металла на специальные свойства наплавленного слоя тем меньше, чем меньше его доля в формировании слоя. В большинстве случаев желательно иметь в наплавленном слое состав, максимально приближающийся к составу наплавляемого (присадочного) металла, поэтому необходимо стремиться к минимальному проплавлению основного металла, т.е. к уменьшению доли основного металла в металле шва.

В связи с этим актуальной задачей является разработка технологии управления геометрией наплавляемого валика.

Изучением возможности управления формообразованием шва и ЗТВ при сварке плавящимся электродом занимаются многие ученые. Разработано множество технологий и устройств способствующих управлению формообразованием сварных швов [7]: изменение режимов сварки, наложение импульсов тока, программирование режимов, наложение магнитных полей на сварочную ванну, формирование механических импульсов и вибрации электрода, изменение геометрии электрода, добавление различных химических элементов в состав проволоки, изменение состава защитного газа и т.д. Существуют различные пути управления геометрией шва, но ни один из них не может претендовать на роль универсального подхода к решению проблемы.

Цель работы: определить влияние расхода защитного газа на геометрию наплавляемого валика и оценить коэффициенты характеризующие форму наплавленных валиков.

Известны работы [8-12], в которых успешно применяется двухструйное сварочное сопло для сварки плавящимся электродом в среде защитных газов, обеспечивая высокие механические свойства сварных соединений.

Сварка и наплавка являются родственными процессами. Поэтому стоит предположить, что разработанный способ так же успешно можно применять и для восстановления изношенной поверхности.

Методика экспериментального исследования

Для сравнительной оценки геометрических параметров наплавляемого валика были проведены эксперименты по наплавке с традиционной (одноструйной) газовой защитой и двухструйной. Выполняли наплавку валика на пластину из стали 45 толщиной 10 мм сварочной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм в смеси газов 82% Ar + 18% CO_2 . Режим сварки: $I=195...200$ А, вылет электродной проволоки $L=10$ мм, расход защитного газа изменяли от 5 до 25 л/мин с шагом 5 л/мин, напряжение дуги $U=25...26$ В, скорость сварки $V=5$ мм/с. Источники питания Shtorm-Lorch V 50 AC/DC, сварочная установка VD – 1500.

Результаты и обсуждение

На полученных сварных образцах провели измерение геометрических размеров сварных швов (e – ширина шва, g – усиление шва, h – глубина проплавления). На основании полученных данных произвели расчет коэффициентов характеризующих форму наплавленных валиков: коэффициент формы сварного шва Ψ_f , коэффициент формы проплавления $\Psi_{пр}$, коэффициент выпуклости шва Ψ_v (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты геометрических параметров сварных швов

Расход защитного газа Q , л/мин	Одноструйная газовая защита			Двухструйная газовая защита		
	$\Psi_f = e / t$	$\Psi_{пр} = e / h$	$\Psi_v = e / g$	$\Psi_f = e / t$	$\Psi_{пр} = e / h$	$\Psi_v = e / g$
5	1,72	3,33	3,57	1,75	3,33	3,7
10	1,69	3,33	3,44	1,92	3,66	4,07
15	1,96	4	3,84	2,4	5,5	4,23
20	1,92	4	3,57	2,60	6	4,61
25	1,92	4	3,70	2,8	6,7	4,80

Значение коэффициента формы шва Ψ_f обычно лежит в пределах от 0,72 до 3. Для обоих способов наплавки данный коэффициент находится в пределах нормы.

Значения коэффициента формы проплавления $\Psi_{пр}$ должны лежать в диапазоне 0,8–4,0. При большем значении – получаются широкие швы с малой глубиной проплавления. Это является положительным моментом в отношении наплавки.

При сварке с двухструйной газовой защитой значения коэффициента формы проплавления $\Psi_{пр} > 4$ и находятся в пределах от 5,5 до 6,7 при расходе защитного газа $Q=15, 20, 25$ л/мин. С увеличением расхода газа при двухструйной газовой защите (в условиях данного опыта), уменьшается проплавление основного металла. Этим успешно можно пользоваться на практике, по необходимости регулируя долю основного металла в наплавленном слое.

Значения коэффициента выпуклости Ψ_v должны составлять не более 7–10. Чем меньше значение, тем шов будет более узкий и высокий с резким переходом от основного металла к металлу шва. Для сварки с двухструйной газовой защитой данный коэффициент несколько выше, что характеризует более плавный переход.

Выводы

По результатам проведенных исследований установлено, что расход защитного газа оказывает существенное влияние на геометрию наплавленного валика. Расчет коэффициентов характеризующих форму наплавленных валиков подтвердил влияние расхода защитного газа на формирование наплавленного слоя, особенно при двухструйной газовой защите. Газодинамическое управление формообразованием и геометрией сварного шва имеет большое практическое значение и дает возможность повысить качество наплавленного слоя без дополнительных затрат.

Список литературы

1. Ресурсосбережение в машиностроении / Ю.Ф. Абакумов, А.В. Козлов, С.С. Зуйков, Р.Ф. Юсипов // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 32–41.
2. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П. Технология и оборудование сварки плавлением. – М.: Рипол Классик, 2003.
3. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. – М.: Машиностроение, 1985.
4. Чигарев В.В., Иванов В.П., Псарева И.С. Повышение работоспособности деталей и инструмента наплавкой гетерогенного слоя // Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2003. – Вип. 7. – С. 234–237.
5. Мозок В.М., Лебедев В.А. Новые возможности ремонтов деталей тяжелой техники импульсно-дуговой сваркой и наплавкой вне ремзаводов // Металлообработка. – 2009. – № 4. – С. 16–19.
6. Lebedev V.A., Maksimov S.Yu. Reduction in power consumption and weld quality control in welding using a controllable pulsed feed of electrode wire // International Congress on Advances in Welding Science and Technology for Construction, Energy and Transportation Systems (AWST–2011), 24–25 October 2011. – Antalya, Turkey, 2011. – P. 371–373.
7. Потапьевский А.Г., Сараев Ю.Н., Чинахов Д.А. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего: монография / Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2012. – 208 с.
8. Григорьева Е.Г., Чинахов Д.А. Современные способы предотвращения негативных явлений в процессе наплавки высокопрочных сталей // V Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии и экономика в машиностроении», г. Юрга, 22–23 мая 2014 г. – Юрга, 2014. – Т. 1. – С. 32–35.
9. Чинахов Д.А., Федько В.Т., Сараев Ю.Н. Сварка легированных сталей в щелевую разделку без термической обработки // Технология металлов. – 2005. – № 10. – С. 27–29.
10. Грибовский Г., Кравчук Б., Ленивкин В.А. Влияние двухслойного кольцевого потока защитных газов на процесс сварки плавящимся электродом // Сварочное производство. – 1996. – № 4. – С. 6–8.
11. Чинахов Д.А., Воробьев А.В., Томчик А.А. Влияние активного защитного газа на распределение тепла в зоне сварки // Тяжелое машиностроение. – 2013. – № 1. – С. 23–26.
12. Сапожков С.Б., Шматченко В.С., Киянов С.С. Применение двухструйных сопловых устройств для сварки в среде защитных газов // Автоматизация и современные технологии. – 2003. – № 3. – С. 12–18.

INFLUENCE SHIELDING GAS ON THE SHAPE OF WELD BEAD IN RESTORATION OF WORN DETAILS

Chinakhov D.A.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: chinakhov@tpu.ru

Grigorieva E.G.¹, Ph.D. student, e-mail: sedasch@mail.ru

Mayorova E.I.^{1,2}, Ph.D. student, e-mail: eim@tpu.ru

¹ Yurga Institute of Technology, TPU Affiliate, 26 Leningradskaya st., Yurga, 652055, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Abstract

To restore worn parts and to give special properties of the surface it is desirable to have in the deposited layer composition as close as possible to the composition of the deposited (filler) metal, so it is necessary to strive for a minimum penetration of the base metal, i.e., to reduce the proportion of the base metal in the weld metal. At present, an urgent task is to develop a technology management deposited bead geometry. This paper presents methods for controlling the geometry of the weld bead during surfacing consumable electrode. The comparative evaluation of the geometrical parameters of the roller is welded for welding with traditional (single-jet) gas and two-protection. The coefficients characterizing the shape of beads confirmed the influence of the shielding gas flow rate on the formation of the deposited layer, particularly when the two- gas protection.

Keywords

surfacing, shielding gas, surfaced layer, gas-dynamic influence, two-jet gas shielding

УДК 622.002.5

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ХАРАКТЕРА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ
ПОГРЕШНОСТЕЙ ОБОЛОЧКИ МОДУЛЯ СОПРЯЖЕНИЯ
ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ГЕОХОДА**

*А.В. ВАЛЬТЕР*¹, канд. техн. наук, доцент
В.В. АКСЕНОВ^{1,2}, доктор техн. наук, профессор
*Р.В. ЧЕРНУХИН*¹, канд. техн. наук, доцент
(¹ЮТИ ТПУ, г. Юрга, ²ИУ СО РАН, г. Кемерово)

Чернухин Р.В. – 652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26,
Юргинский технологический институт (филиал)
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
e-mail: rv_81@mail.ru

В статье приведены результаты исследования фактической точности оболочки внешнего корпуса модуля сопряжения опытного образца геохода. Приведены краткая характеристика исследуемого изделия и актуальность обеспечения геометрической точности оболочек корпусов геохода. Работа содержит краткое описание методики проведения экспериментальных исследований, обработки и анализа данных. Исследование выполнено на основе координатного контроля внешнего корпуса геохода в ходе его опытного производства. В статье даны величины геометрических погрешностей оболочки. Приведена краткая качественная характеристика отклонений формы оболочки. Показано, что основными факторами, определяющими погрешности, являются неточности изготовления обечаек секторов, погрешность их взаимного расположения при сборке и деформации, вызываемые процессами сварки.

Ключевые слова: крупногабаритные кольцевые сегментные изделия, сборка, геометрическая точность, допуск, геоход, оболочка, КИМ, модуль сопряжения

Введение

Модуль сопряжения является наиболее точным крупногабаритным узлом геохода, характеризующимся высокой удельной трудоемкостью [1]. В конструктивном отношении модуль сопряжения состоит из пары сопряженных тел вращения – корпуса и внешнего корпуса [2]. Каждый из корпусов состоит из четырех секторов, являющихся пространственными сварными конструкциями, состоящими из обечаек, фланцев, элементов жесткости и элементов взаимодействия с трансмиссией (рис. 1). В процессе работы внешний корпус модуля сопряжения приводится во вращение относительно корпуса посредством трансмиссии и взаимодействует своей оболочкой с геосредой [3]. При эксплуатации геохода оболочка модуля сопряжения проходит значительный путь относительно окружающего массива пород [4], что обуславливает ее значительный износ. Одним из факторов интенсивности износа является картина распределения контактных нагрузок на поверхности оболочки. Величина, характер и постоянство контактных нагрузок непосредственно зависят от формы оболочки [5]. Распределение контактных нагрузок влияет на силы, воздействующие на трансмиссию, и обуславливает потери энергии, связанные с сопротивлением движению [6]. При исследовании данных вопросов необходимо рассматривать действительную форму оболочки, обусловленную погрешностями,

возникающими на этапе её изготовления [7–10]. Учитывая все более жесткие требования к качеству современных машин [11] и к эффективности их разработки и постановки на производство [12], следует поставить задачу установления фактической точности оболочек корпусов геохода и обуславливающих ее факторов.

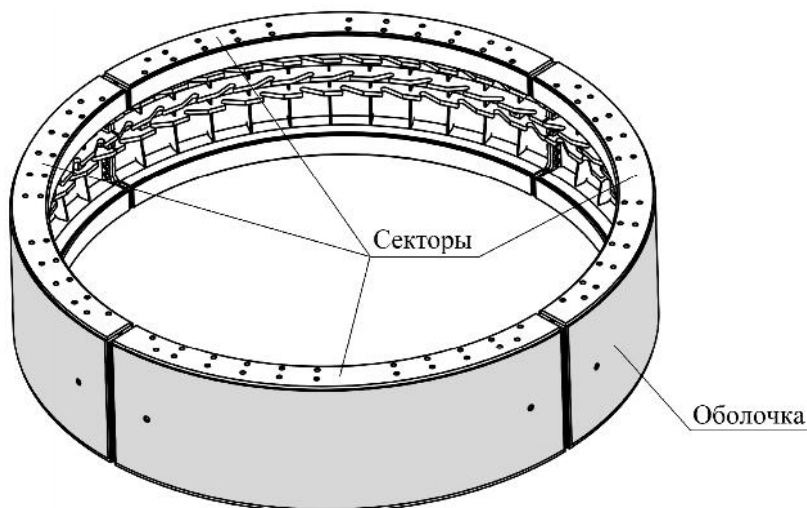


Рис. 1. Общий вид внешнего корпуса модуля сопряжения геохода

Методика исследований

Исследования проводились аналогично методике, описанной в работе [13]. Данные для исследования были получены посредством координатного контроля [14] внешнего корпуса модуля сопряжения опытного образца геохода ФЮРА.612322.401 [15]. Контроль осуществлялся мобильной координатно-измерительной машиной «FARO Arm Edge 9» [16]. Определялись координаты точек на поверхности корпуса. На основе полученных наборов данных создавались и исследовались регрессионные модели цилиндрических поверхностей [17; 18]. Модели поверхностей определялись на основании уравнения регрессии следующего вида:

$$\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} - r + \varepsilon_i = 0; A = -a_y z_i - \sqrt{1 - a_x^2 - a_y^2} (y_0 - y_i);$$

$$B = \sqrt{1 - a_x^2 - a_y^2} (x_0 - x_i) + a_x z_i; C = a_x (y_0 - y_i) - a_y (x_0 - x_i);$$

где x_i, y_i, z_i – координаты аппроксимируемых точек; a_x, a_y, x_0, y_0, r – неизвестные коэффициенты регрессии, имеющие следующий геометрический смысл: a_x, a_y – координаты направляющего вектора оси аппроксимирующего цилиндра; x_0, y_0 – координаты точки, через которую проходит ось аппроксимирующего цилиндра; r – радиус аппроксимирующего цилиндра; ε_i – остаток регрессионной модели.

Коэффициенты регрессии определялись методом Гаусса. Координаты точек контроля переводились в цилиндрические системы координат $\rho\theta Z$, связанные с осями аппроксимирующих цилиндров. Далее выполнялся корреляционный и регрессионный анализ ряда остатков для выявления систематических составляющих погрешностей оболочки, аналогично последовательности в [19].

Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны результаты аппроксимации поверхностей секторов. Достаточно уверенно выявляются погрешности оболочки, связанные с неточностью изготовления секторов и погрешностью их взаимного расположения [20].

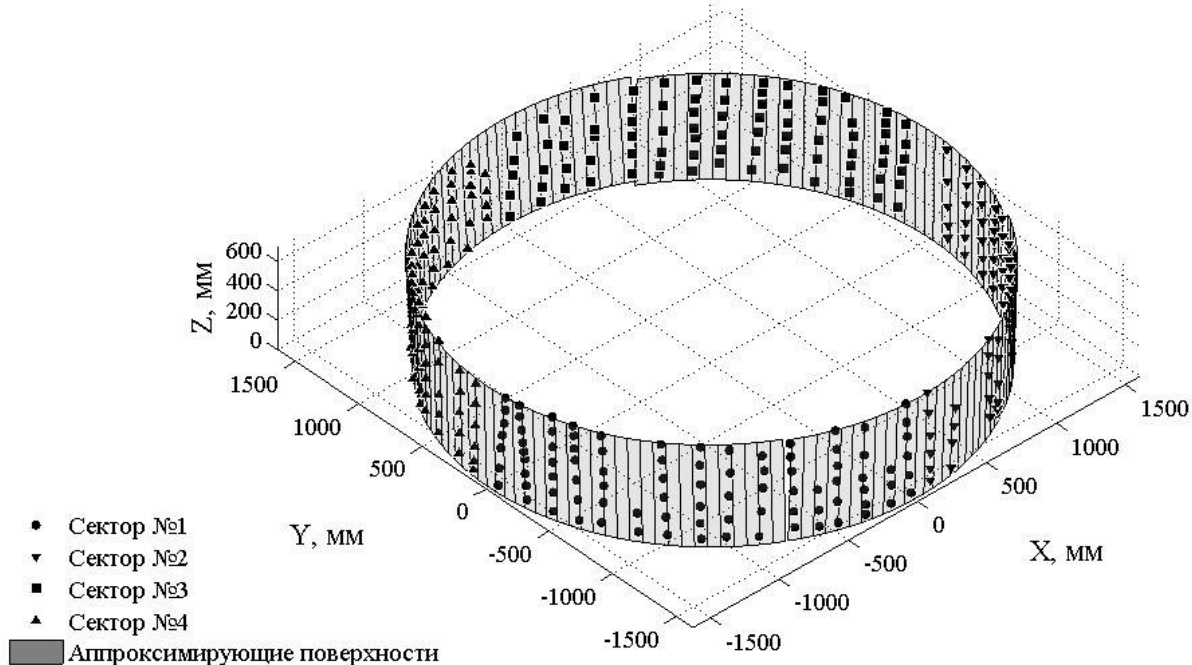


Рис. 2. Точки координатного контроля и аппроксимирующие поверхности

Результаты моделирования и анализ остатков модели при уровне значимости $\alpha = 0,05$ приведены в таблице. Анализ рядов остатков модели (рис. 3) показывает наличие систематической составляющей погрешностей, не объясняющейся моделью, приведенной в [7, 21]. Систематичность погрешностей подтверждается результатами регрессионного анализа остатков: в рядах обнаружено наличие положительной автокорреляции, для секторов №1 и №2 установлено, что ряды остатков не соответствует закону нормального распределения.

Остатки модели на рис. 3 отражают деформации оболочки и их картину можно уверенно связать с конструктивными элементами корпуса. В местах с пониженной жесткостью наблюдаются отрицательные отклонения (в сторону оси цилиндра), в местах с повышенной жесткостью напротив, наблюдаются положительные отклонения (табл.).

Таблица

Значение отклонений

Характеристика	Общий цилиндр	Сектор №1	Сектор №2	Сектор №3	Сектор №4
Радиус аппроксимирующего цилиндра, мм	1598,23	1601,93	1601,44	1597,13	1602,06
Стандартное отклонение, мм	1,72	0,92	0,94	0,70	0,68
Абсолютная погрешность, мм	9,48	4,24	4,40	3,78	3,55
Смещение осей секторов, мм	0	2,7	3,82	3,96	1,28
Угол наклона секторов, град	0	0,326	0,551	0,422	0,431
Нормальность ряда остатков по критерию Эппса-Палли	Нет	Нет	Нет	Да	Да
Случайность остатков $\varepsilon(\theta)$ по критерию поворотных точек	Нет	Да	Да	Да	Да

Продолжение таблицы

Случайность остатков $\epsilon(Z)$ по критерию поворотных точек	Да	Да	Да	Да	Да
Отсутствие автокорреляции в ряду остатков $\epsilon(\theta)$ по критерию Дарбина-Уотсона	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
Отсутствие автокорреляции в ряду остатков $\epsilon(Z)$ по критерию Дарбина-Уотсона	Нет	Нет	Да	Нет	Нет

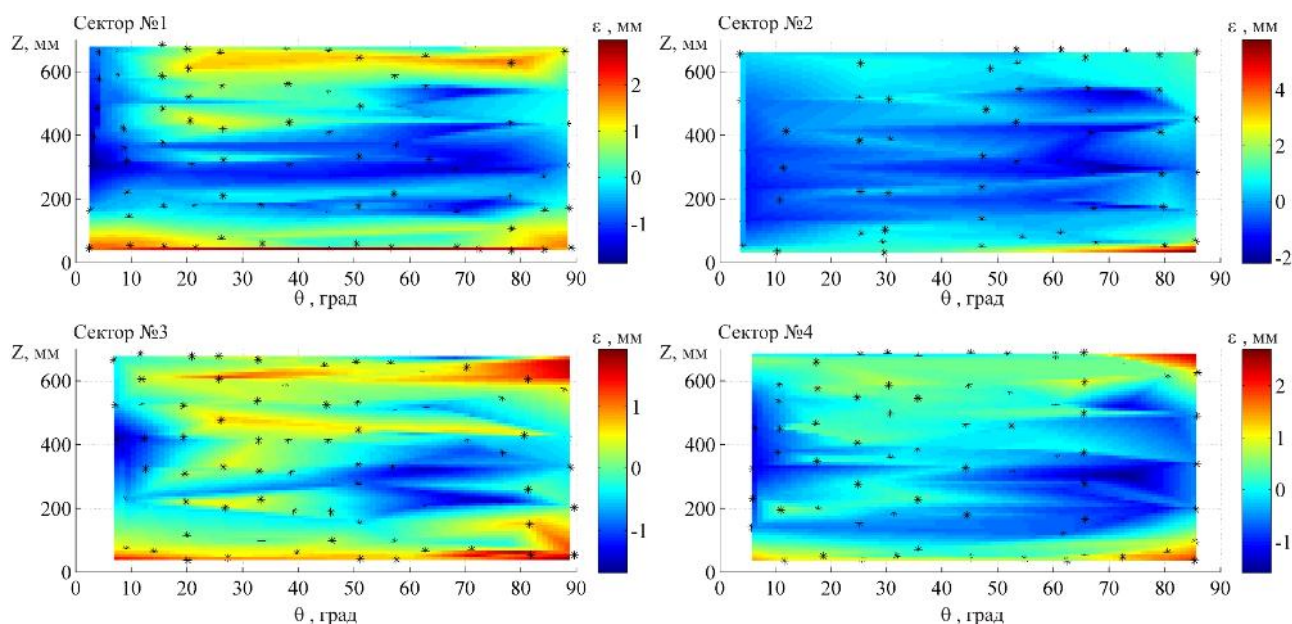


Рис. 3. Ряды остатков моделей на развертках секторов

В целом форма оболочки может быть охарактеризована как седлообразная, дополненная деформациями мест замков внутрь корпуса. Явно просматриваются повышенные градиенты деформаций в местах ребер жесткости и фланцев, т. е. в местах, где находятся мощные сварные швы. Последнее позволяет считать значимой составляющей погрешностей отклонения, вызываемые деформациями в результате процессов сварки, как показано в работах [22; 23].

Выводы

1. Геометрические погрешности оболочки внешнего корпуса модуля сопряжения опытного образца геохода имеют систематический характер, что связано с наличием нескольких превалирующих факторов.
2. Наиболее значимыми составляющими погрешности являются отклонения, связанные с неточностью изготовления секторов и погрешностью их взаимного расположения
3. Значимой составляющей являются отклонения, вызываемые деформациями в результате процессов сварки. Деформации неравномерно распределяются по конструкции вследствие неравнозначной жесткости ее элементов.

Список литературы

1. Classification of geokhod units and systems based on product cost analysis and estimation for a prototype model production / V.V. Aksenov, A.V. Walter, A.A. Gordeyev, A.V. Kosovets // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 91. – P. 012088.
2. Блащук М.Ю., Дронов А.А., Михеев Д.А. Особенности работы и требования к узлу сопряжения секций геохода // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции. – Кемерово: ИУ СО РАН, 2014. – С. 104–106.
3. Вальтер А.В., Аксенов В.В. Варианты обеспечения точности оболочек и собираемости корпусов геохода // Механики XXI века. – 2015. – № 14. – С. 89–92.
4. Begljakov V.Y., Timofeev V.Y., Dokhnenko M.V. Parameters of force interaction of elements the wave transmission with intermediate rolling bodies in geokhod's transmission // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 282–287.
5. Канустин А.Н. Предпосылки разработки формы корпуса геохода // Проблемы геологии и освоения недр: труды XVII Международного симпозиума. – 2013. – Т. 2. – С. 320–321.
6. Efremenkov A.B., Timofeev V.Y. Determination of necessary forces for geokhod movement // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2012): Proceedings. – Томск: IEEE, 2012. – P. 1–4.
7. Walter A.V., Aksenov V.V. Determining deviations in geometry of the geokhod shells // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 770. – P. 439–444.
8. Lowth S., Axinte D.A. An assessment of «variation conscious» precision fixturing methodologies for the control of circularity within large multi-segment annular assemblies // Precision Engineering. – 2014. – Vol. 38. – P. 379–390.
9. Straight-build assembly optimization: A method to minimize stage-by-stage eccentricity error in the assembly of axisymmetric rigid components (two-dimensional case study) / T. Hussain, Z. Yang, A.A. Popov, S. McWilliam // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2011. – Vol. 133, N 3. – P. 031014.
10. Memon M., Hussain T., Ali Z. Minimizing assembly errors by selecting optimum assembly sequence in the assembly of a rigid circular structure // Mehran University Research Journal of Engineering & Technology. – 2012. – Vol. 31, iss. 4. – P. 743–754.
11. Безъязычный Б.Ф., Непомилуев В.В. Некоторые проблемы современного сборочного производства и перспективы их преодоления // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – № 8 (109). – С. 18–25.
12. Expert evaluation of the quality of the development of new technics' samples: experience in the development of a new kind of multipurpose shield-type heading machine / D. Nesteruk, M. Momot, V. Beglyakov, E. Politsinskaya // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 756: Expert evaluation of the quality of the development of new technics' samples. – P. 709–713.
13. Вальтер А.В., Аксенов В.В., Чазов П.А. Математическое обеспечение обработки данных координатного контроля оболочки геохода // Технологии и материалы. – 2015. – № 3. – С. 4–9.
14. An exploration into measurement consistency on coordinate measuring machines / P. Saunders, A. Wilson, N. Orchard, N. Tatman, P. Maropoulos // Procedia CIRP. – 2014. – Vol. 25. – P. 19–26.
15. Создание нового инструментария для формирования подземного пространства / В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, А.Б. Ефременков, А.А. Казанцев, В.Ю. Бегляков, А.В. Вальтер // Горная техника. – 2015. – № 1 (15). – С. 24–26.
16. КИМ Faro – измерительные руки Faro [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.faro.by/katalog/faro-arm-izmeritelnye-ruki-faro> (дата обращения: 20.03.2016).
17. Nievergelt Y. Fitting cylinders to data // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2013. – Vol. 239. – P. 250–269.

18. Fitting range data to primitives for rapid local 3D modeling using sparse range point clouds / S.-W. Kwon, F. Bosche, C. Kim, C.T. Haas, K.A. Liapi // *Automation in Construction*. – 2004. – Vol. 13, iss. 1. – P. 67–81.
19. Определение погрешности расположения секторов стабилизирующей секции геوخода на основе данных координатного контроля / А.В. Вальтер, В.В. Аксенов, В.Ю. Бегляков, П.А. Чазов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2015. – № 4 (69). – С. 31–42.
20. Вальтер А.В., Аксенов В.В. Определение отклонений геометрической формы оболочек корпусных изделий геوخода // *Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник трудов Международной научно-практической конференции*. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 165–170.
21. Аксенов В.В., Вальтер А.В., Бегляков В.Ю. Обеспечение геометрической точности оболочки при сборке секций геوخода // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2014. – № 4 (65). – С. 19–28.
22. Chen Z., Chen Z., Sheno R.A. Influence of welding sequence on welding deformation and residual stress of a stiffened plate structure // *Ocean Engineering*. – 2015. – Vol. 106. – P. 271–280.
23. Deng D., Murakawa H., Liang W. Numerical simulation of welding distortion in large structures // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2007. – Vol. 196, iss. 45–48. – P. 4613–4627.

DETERMINATION OF NUMERIC VALUES AND NATURE OF GEOMETRIC ERRORS OF GEOKHOD INTERMEDIATE UNIT'S SHELL

Walter A.V.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: avwalter@tpu.ru
Aksenov V.V.^{1,2}, D. Sc. (Engineering), Professor, e-mail: 55vva42@mail.ru
Chernukhin R.V.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: rv_81@mail.ru

¹ Yurga Institute of Technology, TPU, 26 Leningradskaya str., 652055, Yurga, Russian Federation

² Institute of Coal of the Siberian Branch of the RAS, 10 Leningradskiy avenue, 650065, Kemerovo, Russian Federation

Abstract

This article is based on the research of a geokhod prototype that is new kind of a tunnel shield. The article contains the research results on production errors of an external body shell of an intermediate unit. There are a brief description of the object of study and relevance of the research. The importance of the task of ensuring accuracy of the shell is shown. The article includes the description of techniques of experimental researches, data processing and data analysis. There are formulas that are using for calculations of parameters of the mathematical models. This research is made on a base of coordinate measurements of the geokhod prototype during a test production. There are values of geometric errors of the external body shell and results of their statistical analysis. It is showed in the article that the errors can be partially explained by the production errors of body sectors and the errors of their relative assembling location. Also it is showed that the other significant part of the errors is welding distortions.

Keywords

Large segmented-ring assemblies, assembly, accuracy, geokhod, shell, CMM, intermediate unit

УДК 004.42

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*А.А. РОДИНА, ст. преподаватель
А.Н. КОЛОДИН, ассистент
(ТГТУ, г. Тамбов)*

Родина А.А. – 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 116,
Тамбовский государственный технический университет,
e-mail: ant.rodina1209@yandex.ru

В данной статье описаны особенности производства нанесения гальванических покрытий. Эти особенности определяют требования, которые предъявляются к автоматизированным гальваническим линиям. В настоящее время описание работы гальванической линии чаще всего составляется вручную или с применением каких-либо расчетных программ. Существующие методики расчета требуют уточнений, в особенности при составлении расписания работы многопроцессных многооператорных автоматизированных гальванических линий (АГЛ). В статье приведен алгоритм программы, которая позволяет автоматизировать расчеты по выбору основного и вспомогательного оборудования, а так же привести к снижению трудоемкости проектно-конструкторских и пуско-наладочных работ и исключить ошибки в проектировании.

Ключевые слова: гальванические покрытия, гальваническая линия, автоматизированный расчет, построение циклограмм работы автооператора.

Введение

Технологические процессы нанесения гальванических покрытий являются чрезвычайно ресурсо- и энергоемким видом металлообработки. В последнее время на отечественных предприятиях стала снижаться до критических значений эффективность применения автоматизированных гальванических линий и выросли затраты на гальваническую обработку. В наибольшей степени на рост себестоимости гальванической продукции сказывается неэффективное использование рабочего времени основного производственного оборудования. Выходом из создавшегося положения может быть разработка автоматизированных систем, оптимизирующих эксплуатацию оборудования. С этой целью автоматизированные гальванические линии оснащаются специально разработанными для каждого технологического процесса программами (циклограммами).

Теория

В силу своей технологической специфики и установившегося традиционного подхода сформировались перечисленные ниже особые признаки, присущие только гальваническому производству:

1. В гальванических цехах и на самостоятельных гальванических участках подвергается обработке большое число наименований деталей.

2. Число вариантов технологических процессов, определяемых видом и толщиной покрытий, а также способами подготовительных и заключительных операций, на одном заводе может колебаться от 1 до 100 и более.

3. Гальваническое производство является источником высокой вредности для обслуживающего персонала. Традиционные меры, принимаемые в настоящее время для обеспечения безопасности персонала, не могут оградить работающих от отрицательного воздействия этого производства.

4. Экологическая опасность гальванического производства заключается в содержании в сточных водах в растворенном виде ионов хрома, кадмия, никеля, ртути, свинца, цинка, меди и различных химических соединений, которые обладают высоким токсичным, канцерогенным и мутагенным влиянием на живые организмы.

5. Гальваническое производство включает сложные технологические процессы с большим числом влияющих на конечный результат факторов, многие из которых не поддаются прямому автоматическому измерению и регулированию средствами современной техники.

6. Преобладает низкий уровень автоматизации гальванического производства, до настоящего времени это, как правило, ручное или механизированное производство.

7. Отсутствует возможность образования межоперационных заделов, что объясняется необходимостью непрерывного выполнения технологических операций в строго заданной последовательности.

8. Недопустимы внутриоперационные остановки и межоперационные перерывы, так как это вызывает брак обрабатываемых деталей. Отсюда вытекает требование обеспечения особо высокой надежности гальванического оборудования и, в первую очередь, повышенной надежности и помехоустойчивости его систем управления.

9. В связи с установившимся традиционным режимом работы гальванических цехов все линии останавливаются на период обеденного перерыва обслуживающего персонала. До остановки из линий необходимо вывести все детали. Если на период вынужденных остановок линии обрабатываемые детали оставить в своих ваннах, это приведет к нарушению продолжительности технологических операций и, в конечном итоге, к явному или, что гораздо опаснее, к скрытому браку, который может быть обнаружен только спустя несколько часов или даже через несколько месяцев.

10. При оперативном планировании гальванического производства следует учитывать продолжительность непрерывного технологического цикла обработки деталей: в начале рабочего дня первая кассета с готовыми деталями появится только спустя некоторое время, равное сумме продолжительностей всех заданных в данном процессе операций, т.е. через 1 – 2 ч.

11. Главной же специфической особенностью гальванического производства является применение сугубо химических технологий на предприятиях машиностроения, приборостроения и металлообработки.

Перечисленные выше особенности гальванического производства определяют требования, предъявляемые к создаваемым в настоящее время гибким автоматизированным гальваническим линиям.[2]

С целью автоматизации выбора технологического оборудования гальванического производства разработаны программные продукты, позволяющие автоматизировать расчеты по выбору основного и вспомогательного технологического оборудования процессов нанесения гальванических покрытий, а также построения циклограмм работы автооператора. Подобные программные продукты призваны обеспечить работу блока компьютерного моделирования и оптимизации конструктивных и режимных параметров процессов нанесения покрытий, входящего в состав блочно-модульной системы автоматизированного проектирования гальванических линий (САПР ГЛ).[4-6]

Результаты и обсуждение

На основе, представленной на рис. 1 [1], схемы проектирования гальванического производства разработана программа по выбору основного и вспомогательного технологического оборудования процессов нанесения гальванических покрытий.

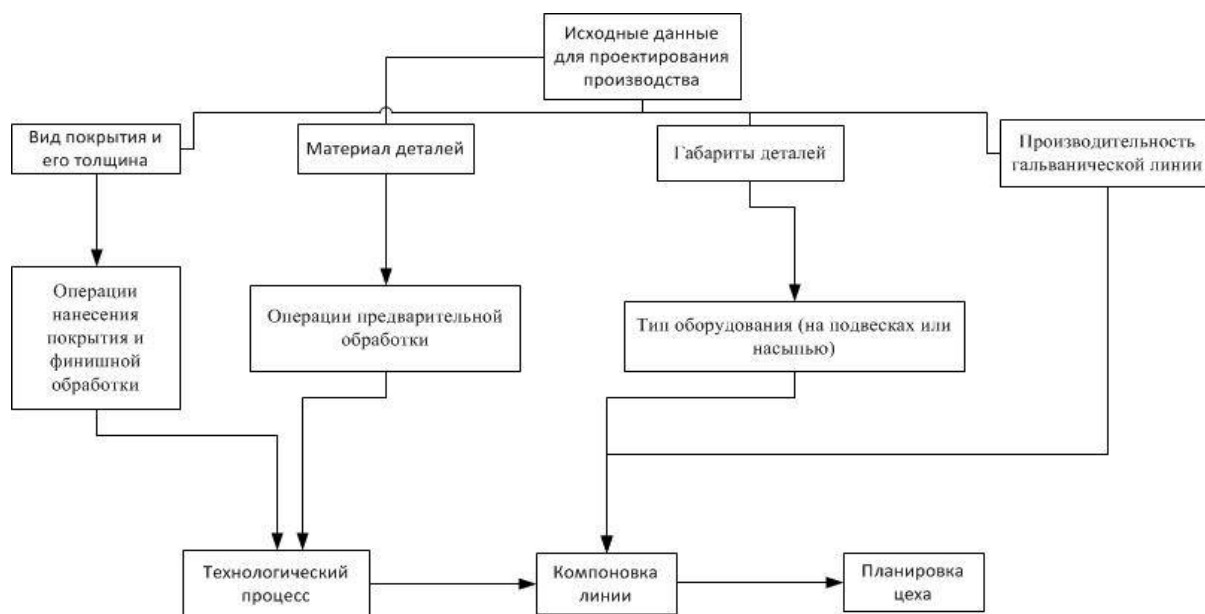


Рис. 1. Схема проектирования гальванического производства

Различные вкладки программы позволяют определить годовой фонд работы оборудования и численности рабочих; выполнить расчет габаритов ванн, барабанов и колоколов, расчеты продолжительности осаждения гальванического покрытия, напряжения на ванне, времени обработки одной загрузки с учётом времени на загрузку и выгрузку, расчёты количества барабанов и колоколов. Произвести кинематический расчет автооператора, в результате которого определяются параметры кинематики элементов (передаточные числа, шаги и числа зубьев, делительных окружностей и др.), осуществляется подбор редукторов и электродвигателей приводов вертикального и горизонтального перемещения автооператора и их тормозов [2].

Интерфейс программы позволяет составлять матрицу исходных данных в зависимости от числа операций технологического процесса нанесения гальванического покрытия при заданном количестве вариантов конкретной операции, а также выводить графическое изображение диаграмму распределения заявок (циклограмму работы автооператора).[3] В качестве исходных данных принимаются:

- технологические операции (0, ..., n, 0 - загрузка подвески покрываемыми деталями, n - разгрузка подвески);

- длительность каждой операции T_k ($k=0, 1, 2, \dots, n$). Для одних операций эта длительность задана жестко определенным числом. А для других задан диапазон допустимых значений от T_{kmin} до T_{kmax} . Для лимитирующей операции под T_k понимается длительность операции, деленную на число позиций этой операции.

- время на выполнение заявки (вызова) Δt_a ;

- вызов автооператора u_k ($k=0, 1, 2, \dots, n$) – это момент времени, в который автооператор должен начинать обслуживание k -ой операции.

y_0 - перенос подвески с покрываемыми деталями на первую операцию производится в начальный момент времени. Совокупность заявок y_k служит основой для составления расписания работы автооператора.

- время такта T_r (интервал между двумя последовательными входами подвесок с покрываемыми деталями в гальваническую линию должен быть минимальным).

По полученным данным программа циклограмму работы автооператора гальванической линии цинкования (рис. 2) [7-15].

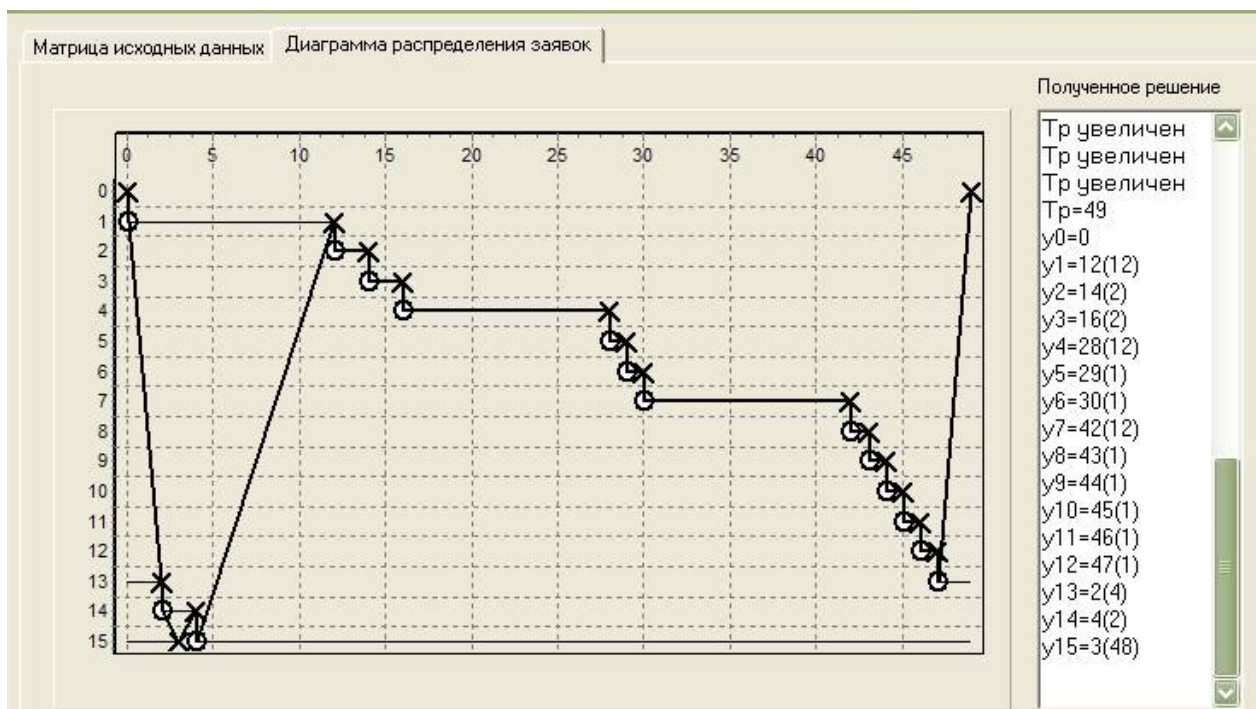


Рис. 2. Циклограмма работы автооператора гальванической линии цинкования

Выводы

Для тестирования программы использовались данные технического задания на проектирование автооператорной автоматической линии цинкования, изготовление которой было осуществлено ранее на ОАО «Тамбовгальванотехника» им. С. И. Лившица» (г. Тамбов) по заказу одного из машиностроительных предприятий. Расчеты показали полную сходимость результатов проектных данных по материальным и энергетическим потокам, а также числу основного и вспомогательного оборудования.

Список литературы

1. Виноградов С.С. Организация гальванических производств. – М.: Глобус, 2002. – 191 с.
2. Новиков А.Е., Даринцева А.Б. Гибкие автоматизированные гальванические линии: хрестоматия. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. – 221 с.
3. Родина А.А., Пестрецов С.И. Методика составления циклограммы автооператора гальванической линии // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: материалы международной научно-практической конференции / под общ. ред. В.А. Немтинова. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2015. – С. 147–151.

4. *Родина А.А.* Структура блочно-модульной САПР гальванической линии // Актуальные проблемы в машиностроении: материалы первой международной научно-практической конференции / под ред. В.Ю. Скибы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – С. 269–274.
5. Проектирование гальванических линий с использованием информационных технологий / О.И. Аносова, А.А. Родина, К.В. Немтинов, В.А. Немтинов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2015. – № 4 (58). – С. 180–186.
6. *Александров В.М., Антонов Б.В., Гендлер Б.И.* Оборудование цехов электрохимических покрытий. – Л.: Машиностроение, 1987. – 309 с.
7. Гибкие автоматизированные гальванические линии: справочник / сост. В.Л. Зубченко и др.; под общ. ред. В.Л. Зубченко. – М.: Машиностроение, 1986. – 134 с.
8. *Султанова В.И., Бородкина В.А.* Проектирование гальванических производств: учебное пособие по выполнению дипломного проекта по курсу «Основы электрохимической технологии» / Ангарская государственная техническая академия. – Ангарск: АГТА, 2007. – С. 12–14.
9. О подходе комплексного использования информационных технологий для исследования химико-технологических объектов / В.А. Немтинов, Ю.В. Немтинова, А.А. Пчелинцева, А.М. Манаенков // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2013. – № 5 (107). – С. 28–33.
10. *Авраменко Ю.Г.* Система поддержки принятия решений при проектировании химико-технологических процессов (на примере составления схемы очистки сточных вод промышленных предприятий): дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – М., 2003. – 183 с.
11. Информационные технологии при решении задач проектирования гальванических линий / О.И. Аносова, М.П. Решетникова, К.В. Немтинов, В.А. Немтинов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: материалы международной научно-практической конференции / под общ. ред. В.А. Немтинова. – 2015. – С. 33–38.
12. *Пестрецов С.И., Родина А.А.* Аппаратурно-технологическое оформление процесса ионно-обменной очистки сточных вод гальванических производств // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2012. – № 2 (40). – С. 327–332.
13. *Елтышев Б.К.* Опыт применения пакета GPSS/PC для создания системы проектирования циклограмм автоматизированных гальванических линий для ГП «Адмиралтейские верфи» // Имитационное моделирование. Теория и практика: сборник докладов первой всероссийской научно-практической конференции ИММОД–2003. – СПб.: ЦНИИТС, 2003. – Т. 2. – С. 45–47.
14. *Хватов Б.Н., Зубков Д.В., Родина А.А.* Исследование производительности шлифования абразивными лентами с самозатачивающимся зерном // Вестник ТГТУ. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 1030–1037.
15. База данных стандартных и типовых элементов технических объектов / В.Г. Мокрозуб [и др.] // Радиотехника. – 2010. – № 12. – С. 29–32.

AUTOMATION SELECTION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT GALVANIC MANUFACTURES

Rodina A.A., Senior Lecturer, e-mail: ant.rodina1209@yandex.ru

Kolodin A.N., Assistant, e-mail: dekorkan@yandex.ru

Tambov State Technical University, 116 Sovetskaya str., Tambov, 392000, Russian Federation

Abstract

This article describes the features of the production of plating. These features define the requirements that apply to automated electroplating lines. Now a days the job description of galvanic lines often drawn by hand or with the use of some computer codes. Current methods of calculation require clarification, especially when the work of multiprocess multistatement automated galvanic lines is scheduled in terms of identifying zone of overlap of autooperators. Usually the schedule is checked by the customer during assembly line at start-up operations. In the article the algorithm of the program, which allows you to automate the calculations for selection of the main and auxiliary equipment, as well as lead to a reduction in the complexity of engineering design and commissioning works and eliminate errors in design.

Keywords

Plated coating, galvanizing line, automated analysis, construction work cyclograms autooperator

УДК 621.791:624

**ВЛИЯНИЕ НИКЕЛЯ И УГЛЕРОДФТОРСОДЕРЖАЩЕЙ ДОБАВКИ
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НАПЛАВЛЯЕМОЙ СТАЛИ 25Х5ФМС***

*Н.А. КОЗЫРЕВ, доктор техн. наук, профессор
Н.В. КИБКО, канд. техн. наук, ст. преподаватель
А.А. УМАНСКИЙ, канд. техн. наук, доцент
Д.А. ТИТОВ, аспирант
(СибГИУ, г. Новокузнецк)*

Козырев Н.А. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: Kozyrev_na@mail.ru

Определено влияние использования углеродфторсодержащей добавки и никеля на параметры микроструктуры, объемную долю аустенита остаточного, твердость и абразивный износ наплавленного слоя, микротвердость мартенсита порошковой проволоки 25Х5ФМС. Введение углеродфторсодержащей добавки способствует снижению уровня оксидных неметаллических включений, устраняет ферритную составляющую, не изменяя при этом уровень дисперсности и микротвердость мартенсита, повышает твердость и уменьшает абразивный износ наплавленного слоя. Введение в состав проволоки никеля, измельчает зерно аустенита, способствует образованию мелкодисперсных карбидов, снижает скорость истирания наплавленного слоя, а также повышает микротвердость мартенсита и твердость наплавленного слоя, что должно привести к повышению термической стойкости прокатных валков.

Ключевые слова: сварка, флюс, металл, шлак, порошковые проволоки, наплавка, микротвердость, твердость, скорость истирания.

Введение

Повышение работоспособности прокатных валков электродуговой наплавкой является важнейшим резервом увеличения производства проката и экономии металла за счет продления срока службы валков. В отечественной металлургии накоплен значительный опыт по восстановлению наплавкой прокатных валков сортовых, трубных, заготовочных и листовых станов.

Рабочие валки станов горячей прокатки работают в условиях циклического термомеханического воздействия и основными причинами выхода валков из строя является образование на их поверхности трещин разгара и износ [1 – 3].

Для наплавки валков горячей прокатки традиционно применяются наплавочные материалы Нп-30ХГСА, Нп-35В9Х3СФ, Нп-25Х5ФМС, Нп-30Х4В2М2ФС [4, 5]. В настоящее время их ресурс практически исчерпан и активно ведутся разработки новых составов порошковых проволок.

* Работа выполнена в СибГИУ в рамках проектной части Государственного задания Минобрнауки РФ № 11.1531.2014/к. При испытании, исследовании, измерении было использовано оборудование Центра коллективного пользования «Материаловедение» СибГИУ.

В рамках развития направления по совершенствованию составов наплавочных материалов разработан новый состав порошковой проволоки на базе Нп-25Х5ФМС с использованием углеродфторсодержащего материала – пыли газоочистки алюминиевого производства [6, 7].

Материалы и методы экспериментального исследования

В лабораторных условиях были изготовлены образцы порошковой проволоки марки ПП-Нп-25Х5ФМС с использованием взамен аморфного углерода пыли газоочистки алюминиевого производства со следующим химическим составом, масс. %: $Al_2O_3 = 21 - 46$; $F = 18 - 27$; $Na_2O = 8 - 15$; $K_2O = 0,4 - 6\%$; $CaO = 0,7 - 2,3$; $SiO_2 = 0,5 - 2,5$; $Fe_2O_3 = 2,1 - 3,3$; $C_{общ} = 12,5 - 30,2$; $MnO = 0,07 - 0,9$; $MgO = 0,06 - 0,9$; $S = 0,09 - 0,19$; $P = 0,10 - 0,18$. В ряд образцов вводили порошкообразный никель. Наплавку проводили на пластины из стали 09Г2С за 6 подходов. Были изготовлены две партии образцов. Для приготовления первой партии образцов в шихту вводили аморфный углерод, углеродфторсодержащую добавку и никель в количестве 0,21, 0,32 и 0,38% (таблица 1, образцы 1 – 5).

Таблица 1

Химический состав исследуемых образцов

№ образца	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Cu	Cr	Mo	Ni	Al	V	Ti
1	0,15	1,59	1,67	0,18	0,35	1,11	0,16	0,032	0,35	0,006
2	0,20	1,33	2,16	0,17	3,52	1,51	0,13	0,04	0,36	0,020
3	0,24	0,93	2,11	0,15	3,18	1,31	0,21	0,054	0,46	0,021
4	0,31	1,19	2,13	0,20	3,50	1,34	0,32	0,064	0,47	0,022
5	0,24	0,92	1,93	0,22	3,00	1,85	0,38	0,034	0,43	0,014
6	0,14	0,39	1,88	0,10	3,05	1,04	0,10	0,014	0,13	0,005
7	0,09	0,29	1,62	0,10	2,95	0,95	0,10	0,011	0,10	0,003
8	0,09	0,28	1,63	0,10	3,23	1,08	0,50	0,011	0,17	0,003
9	0,09	0,33	1,74	0,10	3,15	1,06	0,56	0,011	0,12	0,002
10	0,08	0,35	1,70	0,10	2,99	1,07	0,81	0,007	0,11	0,002

Примечание: 1, 6 – образцы с добавлением графита аморфного; 2, 7 – образцы с добавлением углеродфторсодержащей пыли, 3-5 и 8-10 – образцы с добавлением углеродфторсодержащей пыли и никеля

Во второй партии были изготовлены образцы с использованием графита аморфного, углеродфторсодержащей пыли и никеля в количестве 0,50, 0,56 и 0,81% (таблица, образцы 6 – 10).

Химический состав наплавленного металла определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71. Металлографическое исследование микрошлифов осуществляли с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51. Величину зерна определяли по ГОСТ 5639-82. Дисперсность мартенсита оценивали при сопоставлении структуры с эталонами соответствующих шкал и размеров игл мартенсита с данными таблицы № 6 ГОСТ 8233-56. Определение длины игл мартенсита осуществляли с помощью пакета прикладных программ для металлографических исследований Siam Photolab 700.

Измерение твердости исследуемых образцов выполняли по методу Роквелла в соответствии с требованиями ГОСТ 9013-59.

Микротвердость мартенсита определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 9450-76 на цифровом микротвердомере модели HVS-1000.

Скорость истирания наплавленного слоя опытных образцов определяли путем проведения испытания на износ на машине 2070 СМТ – 1.

Результаты и обсуждение

Металлографический анализ показал, что структура образцов с добавкой аморфного углерода представляет собой мартенсит размером 3-12 мкм, небольшое количество остаточного аустенита в межосевом пространстве и карбиды, распределенные по телу зерен (рисунок 1 а, е). Кроме того, для образцов из второй партии присутствует ферритная составляющая (рисунок 1 е). Величина зерна аустенита по шкале зернистости соответствует в основном № 6 и в некоторых областях №7.

Введение в состав проволоки углеродфторсодержащей добавки вместо аморфного графита обеспечивает улучшение структуры наплавленного слоя: способствует образованию мелкодисперсных карбидов (рисунок 1 б) и устранению ферритной сетки (рисунок 1 ж), что, по-видимому, окажет положительное влияние на трещиностойкость стали. При этом использование углеродфторсодержащей добавки практически не оказывает влияние на размер игл мартенсита (3-11 мкм) и величину зерна аустенита (по шкале зернистости №7).

Установлено, что введение в состав проволоки никеля положительно влияет на структуру наплаваемой стали 25Х5ФМС. Использование никеля, являющегося аустенитообразующим элементом, обеспечивает измельчение зерна аустенита (рисунок 1), что согласуется с данными работы [8]. Причем эффективнее на измельчение зерна аустенита влияет введение в состав шихты 0,81% никеля. В данном случае в структуре кроме зерен аустенита с №6 и №7 по шкале зернистости присутствуют зерна меньшего размера (величина зерна соответствует № 8).

При этом введение в состав проволоки никеля увеличивает объемную долю остаточного аустенита от 4,3 до 8,4 – 15,6%.

Установлено, что использование взамен графита аморфного углеродфторсодержащего материала и никеля обеспечивает не только улучшение структуры, но и повышает уровень свойств стали 25Х5ФМС. Так, при изучении образцов из первой партии установлено, что введение добавки углеродфторсодержащей пыли повышает твердость наплавленного слоя на 10% (от 43,2 до 48,1 НВ).

Никель в количестве 0,21, 0,32 и 0,38% в большей степени на 16 – 20% (от 43,2 до 54,1НВ) увеличивает значения твердости стали 25Х5ФМС. В данном случае максимальное повышение твердости наблюдается после введения в состав проволоки 0,38% никеля (образец №5). Использование никеля в большем количестве (0,50, 0,56 и 0,81%) повышает твердость наплавленного слоя в меньшей степени.

Изучение микротвердости мартенсита в структуре стали 25Х5ФМС и скорости истирания наплавленного слоя исследуемых образцов из второй партии показало, что замена аморфного графита на углеродфторсодержащий материал несколько снижает скорость истирания наплавленного слоя, при этом, практически не изменяется микротвердость мартенсита.

Дополнительное введение в состав проволоки никеля повышает микротвердость мартенсита в структуре стали 25Х5ФМС и снижает абразивный износ наплавленного слоя, уменьшая скорость истирания от $59 \cdot 10^{-5}$ до $53 \cdot 10^{-5}$ г/мин. Введение в состав проволоки никеля в количестве 0,81% значительно увеличивает микротвердость мартенсита (с 385 до 483 НВ), по сравнению с 0,50 и 0,56% никеля (с 385 до 402 и 476 НВ соответственно). Кроме того, использование никеля в количестве 0,81 и 0,50 % в большей степени уменьшает

скорость истирания наплавленного слоя по сравнению с введением углеродфторсодержащей добавки отдельно и совместно с 0,56% никеля.

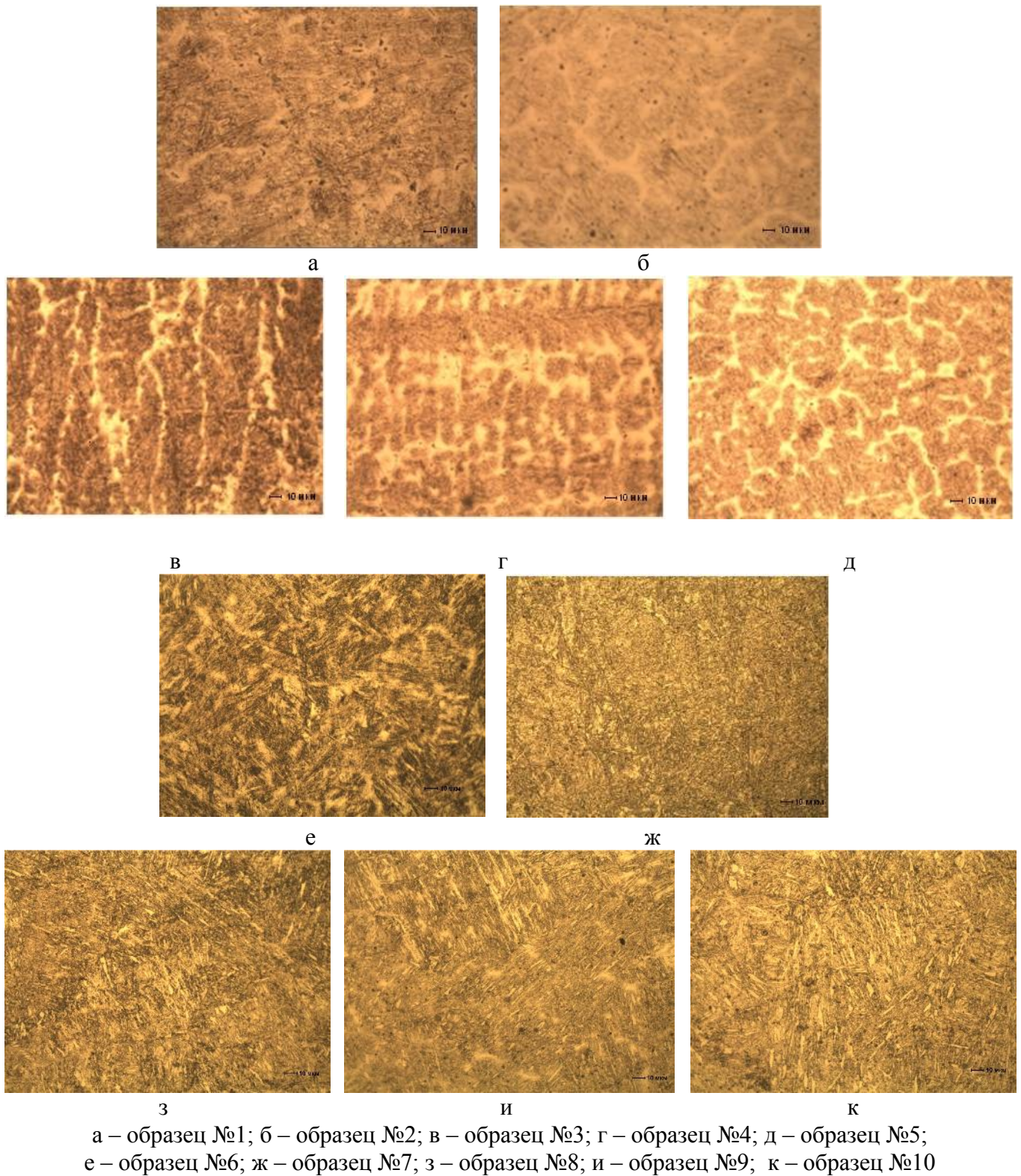


Рис. 1. Микроструктура исследуемых образцов, $\times 500$

Выводы

1. Введение в состав проволоки углеродфторсодержащего материала взамен аморфного графита обеспечивает улучшение структуры наплавляемой стали 25Х5ФМС за счет удаления ферритной составляющей, что может повлиять на уменьшение ее трещиностойкости, при этом оставляя на том же уровне дисперсность и микротвердость мартенсита, а также твердость наплавленного слоя.

2. Введение в состав изучаемой проволоки углеродфторсодержащей добавки и никеля способствует образованию мелкодисперсных карбидов, что на практике должно привести к повышению термической стойкости прокатных валков.

3. Дополнительное введение в состав шихты никеля повышает микротвердость мартенсита и твердость наплавленного слоя. Наибольший эффект улучшения свойств наблюдается при использовании более 0,38% никеля.

4. Использование углеродфторсодержащего материала и никеля снижает скорость истирания наплавленного слоя от $59 \cdot 10^{-5}$ до $53 \cdot 10^{-5}$.

Список литературы

1. Восстановительная наплавка валков прокатных станов порошковой проволокой / В.И. Титаренко [и др.] // Сварочное производство. – 2013. – № 7. – С. 29-32.
2. Кащенко Ф.Д., Фрумкин И.И., Гордань Г.Н. Особенности износа прокатных валков и вопросы разработки наплавочных материалов // Современные способы наплавки и их применение. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1982. – С. 24–29.
3. Теория сварочных процессов / А.В. Коновалов [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.
4. Рябцев И.А., Кондратьев И.А. Механизированная электродуговая наплавка деталей металлургического оборудования. – Киев: Экотехнология, 1999. – 64 с.
5. Тылкин М.А. Повышение долговечности деталей металлургического оборудования. – М.: Металлургия, 1971. – 210 с.
6. Исследование и разработка новых углеродфторсодержащих добавок для сварочных флюсов / Н.А. Козырев [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58, № 4. – С. 258–261.
7. Технологические аспекты использования углеродфторсодержащей добавки при сварке под флюсом / Н.А. Козырев [и др.] // Сварочное производство. – 2015. – № 4. – С. 43–47.
8. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. – М.: Альянс, 2013. – 528 с.

**THE INFLUENCE OF NICKEL AND CARBON-FLUORINE CONTAINING ADDITIVES
ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF DEPOSITED STEEL 25X5ΦMC**

Kozyrev N.A., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: Kozyrev_na@mail.ru

Kibko N.V., Ph.D. (Engineering), Senior lecturer, e-mail: krivicheva_nv@mail.ru

Umanskii A.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: umanskii@bk.ru

Titov D.V., Ph.D. student, e-mail: titov.dima@mail.ru

Siberian State Industrial University, 42 Kirova str., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Abstract

The influence of using carbon-fluorine containing additives and nickel on the microstructure, volume fraction of residual austenite, hardness and abrasive wear of deposited layers, a microhardness of martensite cored wire 25X5ΦMC. The introduction of carbon-fluorine containing additives reduces the level of oxide non-metallic inclusions and eliminates ferritic component, without changing the level of dispersion and microhardness of martensite increases the hardness and reduces abrasive wear of weld layers. Introduction to the composition of the wire of nickel refines the grain of austenite, contributes to the formation of fine carbides, reduces the rate of abrasion of the deposited layer, and also increases the microhardness of martensite and the hardness of the deposited layer, which should lead to increased thermal rolls.

Keywords

welding, flux, metal, slag, flux cored wire, welding, microhardness, hardness, speed of abrasion

Funding

The work is done in sibsui as part of the project part of State task of Ministry of education and science of the Russian Federation No. 11.1531.2014/K. When testing, research, and measurement was used the equipment of collective use Center "Materials Science" sibsui.

УДК 621.791:624

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ПП-Нп-35В9Х3СФ
НА СВОЙСТВА НАПЛАВЛЯЕМОГО ВАЛИКА***

*Н.А. КОЗЫРЕВ, доктор техн. наук, профессор
Д.А. ТИТОВ, аспирант
Н.В. КИБКО, канд. техн. наук, ст. преподаватель
(СибГИУ, г. Новокузнецк)*

Козырев Н.А. – 650007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: Kozyrev_na@mail.ru

Изучено влияние введения в состав порошковой проволоки из стали 35В9Х3СФ углеродфторсодержащей добавки и никеля на ее микроструктуру, микротвердость, твердость и абразивный износ наплавленного слоя. Показано, что использование никеля обеспечивает измельчение зерна аустенита, диспергирование игл мартенсита, способствует образованию карбидов дисперсного строения, что может оказывать влияние на повышение термической стойкости прокатных валков, повышает микротвердость мартенсита и твердость наплавленной стали, снижает абразивный износ наплавленного слоя. Введение в состав шихты углеродфторсодержащей добавки способствует повышению уровня свойств наплавленной стали: увеличивается твердость и снижается истираемость наплавленного слоя.

Ключевые слова: Сварка, флюс, металл, шлак, порошковые проволоки, наплавка, микротвердость, твердость, скорость истирания

Введение

В настоящее время для упрочнения валков горячей прокатки широко используется порошковая проволока марки ПП-Нп-35В9Х3СФ по ГОСТ 26101-84. Наплавленный металл обладает высокой стойкостью против истирания при повышенных температурах, однако его термическая выносливость относительно невысокая, поэтому валки, наплавленные этой проволокой, часто выходят из строя [1 – 4].

В связи с этим проводятся работы по усовершенствованию составов порошковых проволок на базе системы легирования С-Si-Mn-Cr-W-V. Так ООО «ТМ.ВЕЛТЕК» разработаны порошковые проволоки марок ВЕЛТЕК-Н500РМ, ВЕЛТЕК-Н500РМ, ВЕЛТЕК-Н505РМ, ВЕЛТЕК-Н550РМ, использование которых позволило одновременно добиться повышения таких показателей, как трещиностойкость и износостойкость [5].

В целях повышения показателей стойкости наплавленных прокатных валков в работе проведены исследования влияния состава порошковой проволоки марки ПП-Нп-35В9Х3СФ на ее структуру и свойства.

* Работа выполнена в СибГИУ в рамках проектной части Государственного задания Минобрнауки РФ № 11.1531.2014/к. При испытании, исследовании, измерении было использовано оборудование Центра коллективного пользования «Материаловедение» СибГИУ.

Материалы и методы экспериментального исследования

В лабораторных условиях изготовлены образцы порошковых проволок с введением углеродфторсодержащей пыли (отходы металлургического производства), со следующим химическим составом: масс. %: $Al_2O_3 = 21-46$; $F = 18-27$; $Na_2O = 8-15$; $K_2O = 0,4 - 6\%$; $CaO = 0,7- 2,3$; $SiO_2 = 0,5-2,5$; $Fe_2O_3 = 2,1-3,3$; $C_{общ} = 12,5-30,2$; $MnO = 0,07-0,9$; $MgO = 0,06-0,9$; $S = 0,09-0,19$; $P = 0,10-0,18$.

Углеродфторсодержащую пыль вводили взамен аморфного графита, учитывая ранее полученные нами данные о том, что углерод в составе углеродфторсодержащей добавки обладает повышенной активностью, раскисляет металл и восстанавливает оксиды, находящиеся в металле и шлаке с образованием оксидов углерода [6 – 8]. В состав ряда образцов проволоки вводили никель. Были изготовлены две партии образцов. Для приготовления первой партии образцов в шихту вводили аморфный углерод, углеродфторсодержащую добавку и никель в количестве 0,29, 0,33 и 0,61% (таблица 1, образцы 1 – 5). Во второй партии были изготовлены образцы с использованием графита аморфного, углеродфторсодержащей пыли и никеля в количестве 0,38, 0,46 и 0,58% (таблица 1, образцы 6 – 10). При этом изменялась концентрация кремния, марганца, молибдена, вольфрама и ванадия.

Химический состав наплавленного металла определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71. Химический состав исследуемых образцов приведен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых образцов

№ образца	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Cu	Cr	Mo	Ni	Al	V	Ti
1	0,15	1,59	1,67	0,18	0,35	1,11	0,16	0,032	0,35	0,006
2	0,20	1,33	2,16	0,17	3,52	1,51	0,13	0,04	0,36	0,020
3	0,24	0,93	2,11	0,15	3,18	1,31	0,21	0,054	0,46	0,021
4	0,31	1,19	2,13	0,20	3,50	1,34	0,32	0,064	0,47	0,022
5	0,24	0,92	1,93	0,22	3,00	1,85	0,38	0,034	0,43	0,014
6	0,14	0,39	1,88	0,10	3,05	1,04	0,10	0,014	0,13	0,005
7	0,09	0,29	1,62	0,10	2,95	0,95	0,10	0,011	0,10	0,003
8	0,09	0,28	1,63	0,10	3,23	1,08	0,50	0,011	0,17	0,003
9	0,09	0,33	1,74	0,10	3,15	1,06	0,56	0,011	0,12	0,002
10	0,08	0,35	1,70	0,10	2,99	1,07	0,81	0,007	0,11	0,002

Примечание: 1, 6 – образцы с добавлением графита аморфного; 2, 7 – образцы с добавлением углеродфторсодержащей пыли, 3-5 и 8-10 – образцы с добавлением углеродфторсодержащей пыли и никеля

Металлографический анализ осуществляли с помощью оптического микроскопа OLYMP US GX-51. Величину зерна определяли по ГОСТ 5639-82. Балл мартенсита оценивали при сопоставлении структуры с эталонами соответствующих шкал и размеров игл мартенсита с данными таблицы № 6 ГОСТ 8233-56. Определение длины игл мартенсита осуществляли с помощью пакета прикладных программ для металлографических исследований Siams Photolab 700.

Твердость определяли по методу Роквелла и Виккерса в соответствии с требованиями ГОСТ 9013-59 и ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости мартенсита проводили на

цифровом микротвердомере модели *HVS-1000* с автоматической поворотной головкой и цифровым отображением данных.

Скорость истирания наплавленного слоя опытных образцов определяли путем проведения испытания на износ на машине 2070 СМТ – 1.

Результаты и обсуждение

Металлографический анализ образцов с содержанием аморфного графита показал, что их структура представляет собой мартенсит с остаточным аустенитом в межосевом пространстве (рисунок 1 а, б). При этом образец №1 из первой партии имеет дендритную структуру и по телу зерен распределены точечные карбиды вольфрама и хрома (рисунок 1 а).

В структуре образца № 6 из второй партии наблюдается грубоигольчатый мартенсит (балл № 10), небольшое количество остаточного аустенита и точечные мелкодисперсные карбиды. Величина зерна по шкале зернистости соответствует №6 и №7. В данном случае по всей поверхности шлифа наблюдается пористость. Размер пор составляет 640 – 1077 мкм.

Введение в состав проволоки углеродфторсодержащей добавки взамен аморфного углерода обеспечивает снижение пористости.

Введение в состав проволоки никеля устраняет наличие в структуре ферритной составляющей, способствует измельчению игл мартенсита в структуре стали 35В9Х3СФ, уменьшает объемную долю остаточного аустенита. Так, при использовании никеля в количестве 0,58% (образец №10) мартенсит имеет более дисперсное строение по сравнению с остальными исследуемыми образцами, размер игл мартенсита составляет 7 – 42 мкм и в структуре не наблюдается ферритная составляющая (рисунок 1 и), а также снижается пористость. Величина зерна аустенита по шкале зернистости соответствует №6 и №7.

Использование никеля в количестве 0,29 и 0,33% значительно снижает объемную долю аустенита (от 15,4 до 5,2 – 6,8%) по сравнению с добавлением в состав проволоки углеродфторсодержащей пыли.

При этом введение в состав проволоки остального количества никеля, согласно таблицы, не оказывает влияния на микроструктуру наплавленного слоя.

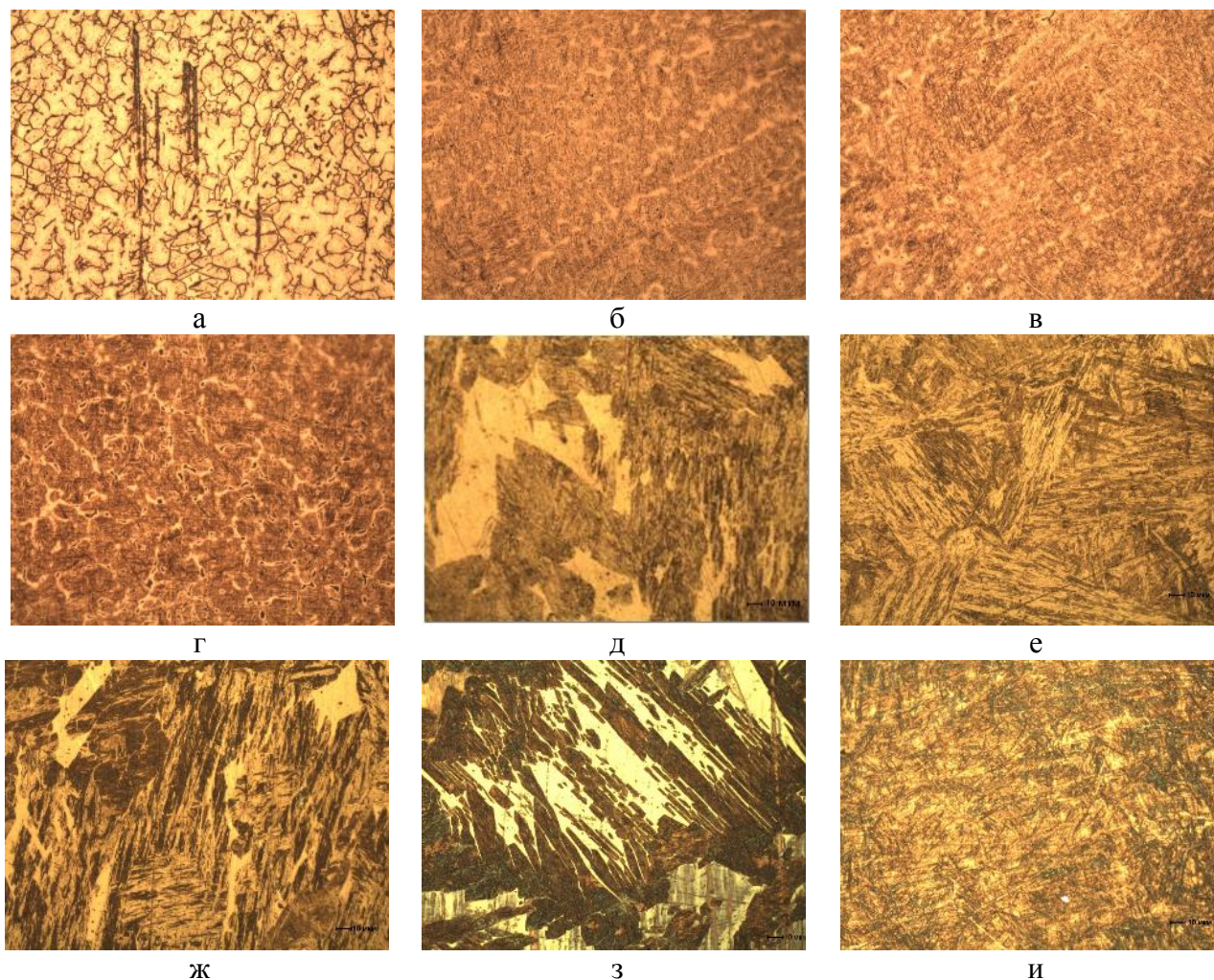
Установлено, что введение в состав проволоки углеродфторсодержащей пыли и никеля взамен аморфного графита оказывает положительное влияние не только на параметры структуры, но и на уровень свойств наплавленного слоя из стали 35В9Х3СФ.

Введение углеродфторсодержащей добавки взамен графита аморфного незначительно повышает твердость наплавленного слоя (от 45,5 – 49 до 46 – 50,8 HRC). Использование никеля в большей степени увеличивает значения твердости стали (от 45,5 – 49 до 48 – 54,8 HRC).

В результате исследования свойств образцов из второй партии установлено, что введение в состав шихты углеродфторсодержащей добавки обеспечивает снижение микротвердости мартенсита на 5% (от 471 до 449 HV), однако при этом уменьшает абразивный износ наплавленного слоя (от $88 \cdot 10^{-5}$ до $52 \cdot 10^{-5}$ г/мин).

Использование никеля повышает микротвердость мартенсита и снижает скорость истирания наплавленного слоя от $88 \cdot 10^{-5}$ до $(52 - 68) \cdot 10^{-5}$ г/мин.

Эффективнее на увеличение значений микротвердости мартенсита влияет введение в состав проволоки никеля в количестве 0,46 и 0,58%. Использование данного количества никеля повышает микротвердость на 19 и 22% соответственно.



а – образец №1; б – образец №3; в – образец №4; г – образец №5; д – образец №6;
е – образец №7; ж – образец №8; з – образец №9; и – образец №10

Рис. 1. Микроструктура исследуемых образцов, × 500

Выводы

1. Введение в состав проволоки углеродфторсодержащей добавки совместно с никелем способствует измельчению игл мартенсита и удалению ферритной составляющей, охрупчивающей сталь. Наибольший эффект улучшения структуры наблюдается при концентрации никеля 0,58 %.

2. Использование углеродфторсодержащего материала и никеля способствует образованию мелкодисперсных карбидов, что может обеспечить повышение термической стойкости прокатных валков, и приводит к снижению пористости.

3. Введение в состав шихты углеродфторсодержащей добавки и никеля взамен графита аморфного повышает твердость наплавленного слоя на 4 – 11% и уменьшает скорость его истирания до 33–41%.

4. Дополнительное введение в состав проволоки никеля обеспечивает повышение микротвердости мартенсита на 19–22% в структуре стали 35В9Х3СФ.

Список литературы

1. Восстановительная наплавка валков прокатных станов порошковой проволокой / В.И. Титаренко [и др.] // Сварочное производство. – 2013. – № 7. – С. 29–32.

2. Кащенко Ф.Д., Фрумин И.И., Гордань Г.Н. Особенности износа прокатных валков и вопросы разработки наплавочных материалов // Современные способы наплавки и их применение. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1982. – С. 24–29.

3. Фрумин И.И., Юзвенко Ю.А., Лейначук Е.И. Технология механизированной наплавки. – М.: Высшая школа, 1964. – 306 с.

4. Кондратьев И.А., Васильев В.Г., Дзыкович И.Я. Исследование структурной неоднородности наплавленного металла типа 35B9X3CФ и ее влияние на работоспособность наплавленных прокатных валков // Автоматическая сварка. – 1996. – № 6. – С. 17–20.

5. Кондратьев, И.А., Рябцев И.А., Кусков Ю.М. Дуговая и электрошлаковая наплавка валков прокатных станов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2005. – № 4. – С. 14–17.

6. Теория сварочных процессов / А.В. Коновалов [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.

7. Kozyrev N.A., Krukov R.E., Kolmogorov D.E. New carbon-fluorine containing additive for the welding fluxes // Mechanics of Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 495–498.

8. Effect of carbon- and fluorine-containing additions in the composition of fluxes on the content of nonmetallic inclusions and properties of welded joints / N.A. Kozyrev, V.F. Igushev, R.Ev. Krukov, Z.V. Goldun, I.N. Kovalsky // Welding International. – 2013. – Vol. 27, N 12. – P. 963–965.

THE STUDY OF THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF FLUX-CORED WIRE ПП-Нп-35B9X3CФ ON THE PROPERTIES SURFACED ROLLER

Kozyrev N.A., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: Kozyrev_na@mail.ru

Titov D.V., Ph.D. student, e-mail: titov.dima@mail.ru

Kibko N.V., Ph.D. (Engineering), Senior lecturer, e-mail: krivicheva_nv@mail.ru

Siberian State Industrial University, 42 Kirova str., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Abstract

The influence of the introduction of the cored wire from steel 35B9X3CФ carbon-fluorine containing additives and nickel on the microstructure, microhardness, hardness and abrasive wear of weld layers. It is shown that the use of nickel provides the grain refinement of austenite, the dispersion of the needles of martensite promotes the formation of carbides dispersed structure, which may have an impact on improving thermal rolls, increases the microhardness of martensite and the hardness of the deposited steel, reduces abrasive wear of weld layers. Introduction to the composition of the charge carbon-fluorine containing additives enhancing the properties of steel surfaced: increased hardness and reduced abrasion of the deposited layer.

Keywords

Welding, flux, metal, slag, flux cored wire, welding, microhardness, hardness, speed of abrasion

Funding

The work is done in sibsui as part of the project part of State task of Ministry of education and science of the Russian Federation No. 11.1531.2014/K. When testing, research, and measurement was used the equipment of collective use Center "Materials Science" sibsui.

УДК 621.793.74

**ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПЛАЗМЕННЫХ
ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ****Е.А. ЗВЕРЕВ, канд. техн. наук, доцент**В.Ю. СКИБА, канд. техн. наук, доцент**П.В. ТРЕГУБЧАК, ассистент**Н.В. ВАХРУШЕВ, аспирант**К.А. ПАРЦ, магистрант**А.К. ЖИГУЛЕВ, студент**(НГТУ, г. Новосибирск)*

Зверев Е.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: egor_z@ngs.ru

Приведены результаты исследований микротвердости износостойких плазменных покрытий из высокохромистого чугуна после высокоэнергетического воздействия токами высокой частоты. Они показали, что в отличие от исходной структуры распределение микротвердости по глубине слоя становится практически равномерным, хотя ее уровень остается на средних значениях исходной. Осуществлены сравнительные испытания на износостойкость в условиях трения скольжения образцов с исходной структурой и структурой, полученной после воздействия индукционного нагрева. Показано, что повышения уровня износостойкости не наблюдается.

Ключевые слова: износостойкость, индукционный нагрев, качество, микротвердость, плазменные покрытия.

Введение

Уровень качества поверхностного слоя деталей машин предопределяет технический ресурс работы технологического оборудования. Для обеспечения высокой износостойкости в технике применяют различные методы поверхностного упрочнения, в том числе и процесс плазменного напыления износостойких покрытий. Однако специфика плазменных покрытий, наносимых с помощью плазменной струи, сопряжена с нестабильностью показателей качества напыленного слоя: степень расплавленности порошкового материала, количество и размер пор, а также характер границы между покрытием и основой [1 - 3]. От этих показателей зависят адгезионная прочность и уровень остаточных напряжений в слое покрытия. Так, относительно невысокий уровень адгезионной прочности может являться причиной разрушения плазменных покрытий в виде отслоений и сколов частиц покрытия в процессе эксплуатации оборудования, что, в целом снижает его работоспособность.

В плане повышения качества традиционная технология формирования плазменных покрытий практически полностью исчерпала свои потенциальные возможности, поэтому все более широкое применение получают комбинированные технологии [4 - 10]. Сущность

* Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-2_15 в плановом периоде 2015-2016 гг.

комбинированной обработки заключается в повторном высокоэнергетическом воздействии на покрытия с целью улучшения их качественных показателей: увеличение адгезионной прочности, уменьшение пористости, ликвидация нерасплавленных частиц порошка в структуре покрытий, формирование мелкодисперсной структуры и обеспечение равномерного распределения микротвердости по глубине упрочненного слоя.

Анализ технологических возможностей основных методов обработки концентрированными источниками энергии (электродуговой, электронно-лучевой, лазерный, плазменный и индукционный) [11 - 18], которые можно использовать для повторного высокоэнергетического воздействия на структуру плазменных покрытий, показал, что при повторной обработке токопроводящих плазменных покрытий явным преимуществом обладает высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ) [19 - 20]. Характерной особенностью этого процесса является то, что источник нагрева является объемным и выделение энергии осуществляется в поверхностном слое, толщина которого определяется технологическими параметрами и теплофизическими характеристиками материала покрытия.

Ранее нами были проведены исследования по изучению влияния индукционного нагрева на структуру плазменных покрытий, которые показали существенное влияние процесса на качественные показатели [21].

Целью настоящей работы является исследование микротвердости и износостойкости плазменных покрытий после повторного воздействия на них индукционного нагрева ТВЧ.

Методика проведения экспериментов

В качестве материала для нанесения плазменных покрытий использовался высокохромистый чугун марки ПГ-С27 (с фракционным размером частиц 50...100 мкм). Для опытов применялись плоские образцы из стали 20. Плазменное напыление осуществлялось на установке "Киев-7" плазмотроном ПУН-3 мощностью 40 кВт [22]. Режимы напыления: сила тока дуги плазмотрона $I = 140$ А, напряжение $U = 140$ В и дистанция напыления $L = 110$ мм.

Оплавление поверхности образцов осуществляли на экспериментальной установке, снабженной приводом главного движения с плавным регулированием скорости. В качестве источника энергии использовали ламповый генератор модели ВЧГ 6-60/0,44 с рабочей частотой тока 440 кГц. Процесс нагрева производился по глубинной схеме (глубина выделения энергии порядка 0,6...0,8 мм) непрерывно-последовательным способом, индуктором петлевого типа, оснащенный магнитопродом марки N87. Удельная мощность нагрева варьировалась в пределах от $2,8 \cdot 10^8$ Вт/м² до $3,4 \cdot 10^8$ Вт/м², а скорость перемещения образцов относительно петлевого индуктора – от 20 мм/с до 120 мм/с [23].

Микротвердость (H_u) покрытий определялась на приборе *Wolpert Group 402MVD*. Нагрузка на алмазный индентор составляла 0,98 Н.

Для испытания стойкости покрытия на износ в условиях трения скольжения использована схема "врезающегося индентора" [24]. Она позволяет создавать довольно жесткие условия нагружения. В установке, спроектированной для реализации этой схемы, пара трения состоит из вращающегося индентора из твердого сплава марки ВК8 и неподвижно закрепленного образца с покрытием. Нагрузка на пару трения составляла 20 Н. На всех образцах выполнялось 3 цикла изнашивания при различном пути трения. В качестве интегральной количественной характеристики износа использовали величину объемного износа.

2. Результаты исследований

Кривые распределения микротвердости по глубине слоя исходного покрытия и покрытия после высокотемпературного воздействия токами высокой частоты приведены на рис. 1.

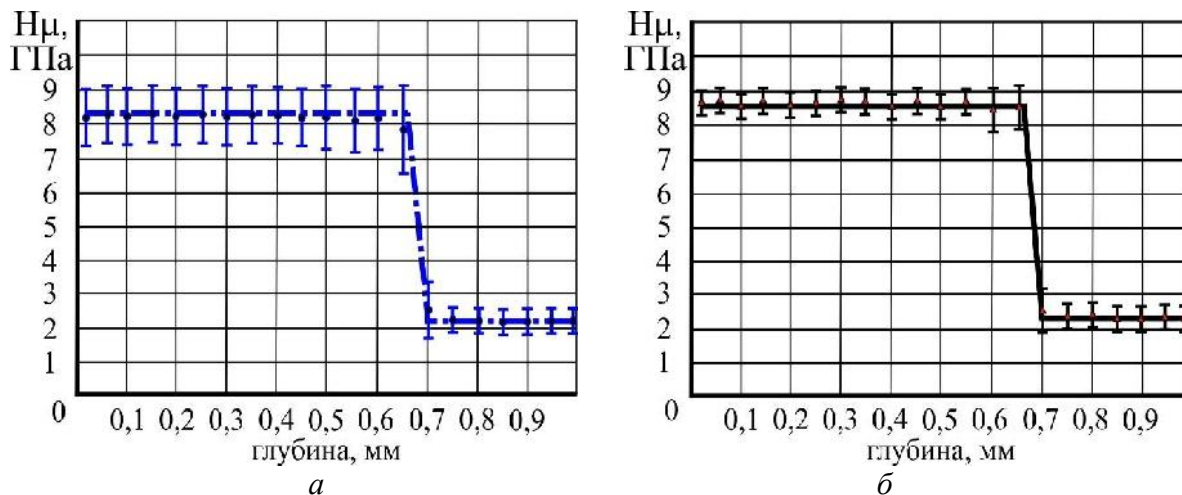


Рис. 1. Распределение микротвердости покрытий по глубине слоя:

а – после плазменного напыления; б – после плазменного напыления и последующего оплавления ВЭН ТВЧ

Результаты измерения микротвердости согласуются с металлографическим анализом покрытий. В отличие от исходной структуры (рис. 1, а) (колебания значений микротвердости в пределах доверительного интервала достигает 1,7 – 2,8 ГПа) после воздействия ВЭН ТВЧ распределение микротвердости более равномерное (рис. 1, б) (доверительный интервал варьируется в пределах 0,5 – 1,3 ГПа), хотя в целом максимальная микротвердость покрытия осталась на прежнем уровне $H_{\mu} \approx 8,5$ ГПа.

На рис. 2 приведена кинетика изнашивания плазменных покрытий при сравнительных испытаниях образцов.

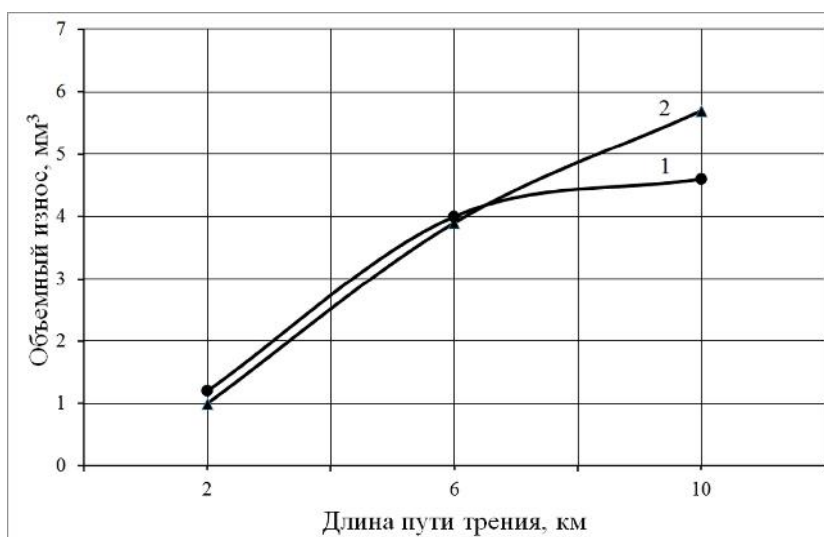


Рис. 2. Кинетика изнашивания образцов с покрытиями: 1 – исходный вариант; 2 – после воздействия ВЭН ТВЧ

Как следует из приведенных зависимостей, на пути трения примерно до 7 км интенсивность изнашивания покрытий после индукционного воздействия практически одинакова с исходными покрытиями. И только на максимально принятых в условиях экспериментов пути трения их износостойкость несколько ниже.

Выводы

Результаты испытаний покрытий на износостойкость в условиях трения скольжения продемонстрировали, что ожидаемого эффекта в плане ее повышения после нагрева ТВЧ не наблюдается. Однако равномерное распределение микротвердости по глубине слоя покрытий минимизирует появления типовых эксплуатационных дефектов, присущих плазменным покрытиям. Таким образом, плазменные покрытия, сформированные при повторном высокоэнергетическом воздействии, будут обладать более высоким уровнем работоспособности в процессе эксплуатации.

Список литературы

1. Чёсов Ю.С., Зверев Е.А. Методика нанесения плазменных износостойких покрытий // Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 2 (55). – С. 156–165.
2. Особенности микроструктуры износостойких плазменных покрытий / С.В. Веселов, Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, П.В. Трегубчак, В.В. Базаркина, В.С. Ложкин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 4 (49). – С. 35–37.
3. Béjar M.A., Henríquez R. Surface hardening of steel by plasma-electrolysis boronizing // Materials and Design. – 2009. – Vol. 30, N 5. – P. 1726–1728. – doi: 10.1016/j.matdes.2008.07.006.
4. Advanced Tribology: proceedings of CIST2008 & ITS-IFTtoMM2008 / Jianbin Luo, Yonggang Meng, Tianmin Shao, Qian Zhao, eds. – Beijing: Tsinghua University Press; Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 1056 p.
5. Совершенствование технологических процессов машиностроительных производств / А.С. Янюшкин, С.О. Сафонов, Д.В. Лобанов и др. – Братск: Изд-во БрГУ, 2006. – 302 с.
6. Архипов П.В., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Совершенствование оборудования под процессы комбинированной обработки // Вестник Таджикского технического университета. – 2013. – Т. 2, № 2. – С. 32–37.
7. Станочное оборудование, основанное на комплексировании нескольких технологических операций / В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев, В.Ю. Скиба // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 245–255.
8. Perspective of high energy heating implementation for steel surface saturation with carbon / N. Plotnikova, A. Losinskaya, V. Skeebe, E. Nikitenko // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 351–354. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.351.
9. Эффективные технологии механической обработки деталей из неметаллических материалов / П.В. Архипов, А.В. Балыков, А.А. Дьяконов, О.Ю. Еренков, В.П. Иванов, Е.Г. Калита, А.Б. Липатова, Д.В. Лобанов, О.И. Медведева, А.В. Морозова, И.В. Шмидт, А.С. Янюшкин; под ред. А.В. Киричека. – М.: Спектр, 2014. – 225 с.
10. Методы повышения эксплуатационных свойств плазменных покрытий / Ю.С. Чёсов, П.В. Трегубчак, Е.А. Зверев, И.А. Ерохин // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 10-й Всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – С. 23–25.

11. *Davis J.R.* Surface hardening of steels: understanding the basics. – Ohio: Materials Park: ASM International, 2002. – 364 p.
12. *Ion J.C.* Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. – Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. – 576 p.
13. Multipass surface hardening of steel samples with inclined surfaces by concentrated electron beam in the air of atmosphere pressure / V.V. Abashkin, O.A. Gorshkov, A.A. Ilyin, A.S. Lovtsov, R.N. Rizakhanov // High Temperature Material Processes: an International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. – 2004. – Vol. 8, N 3. – P. 427–432. – doi: 10.1615/HighTempMatProc.v8.i3.80.
14. *Songa R.G., Zhanga K., Chena G.N.* Electron beam surface treatment. Pt. 1. Surface hardening of AISI D3 tool steel // Vacuum. – 2003. – Vol. 69, N 4. – P. 513–516. – doi: 10.1016/S0042-207X(02)00583-3.
15. Surface hardening of steels with carbon by non-vacuum electron-beam processing / I.A. Bataev, M.G. Golkovskii, A.A. Bataev, A.A. Losinskaya, A.I. Popelyukh, E.A. Drobyaz // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 242. – P. 164–169. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.01.038.
16. Pulsed electron beam facility (GESA) for surface treatment of materials / V. Engelko, B. Yatsenko, G. Mueller, H. Bluhm // Vacuum. – 2001. – Vol. 62, N 2–3. – P. 211–216. – doi: 10.1016/S0042-207X(00)00446-2.
17. *Fauchais P.L., Heberlein J.V.R., Boulos M.I.* Thermal spray fundamentals. – New York: Springer US Publ., 2014. – 1566 p. – doi: 10.1007/978-0-387-68991-3. – ISBN 978-0-387-28319-7.
18. Advanced Tribology: Proceedings of CIST2008 & ITS-IFTOMM2008 / Jianbin Luo, Yonggang Meng, Tianmin Shao, Qian Zhao, eds. – Beijing: Tsinghua University Press; Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 1056 p.
19. *Иванцовский В.В., Батаев В.А.* Упрочнение поверхностных слоев деталей машин с использованием высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты // Ползуновский вестник. – 2005. – № 2-2. – С. 104–112.
20. Анализ напряженно-деформированного состояния материала при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты / В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 3 (64). – С. 90–102.
21. Структура износостойких плазменных покрытий после высокоэнергетического воздействия ТВЧ / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, В.В. Иванцовский, В.Ю. Скиба, Н.В. Плотникова, Д.В. Лобанов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 4 (65). – С. 11–18.
22. Исследование влияния токов высокой частоты на структуру плазменных покрытий / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, Н.В. Плотникова, П.В. Трегубчак, И.А. Ерохин // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI международной научно-технической конференции. – Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2014. – С. 216–219.
23. *Чёсов Ю.С., Зверев Е.А.* Качество износостойких плазменных покрытий после индукционного нагрева // В мире научных открытий. – 2015. – № 2 (62). – С. 248–266.
24. *Чёсов Ю.С., Зверев Е.А.* Исследование износостойкости покрытий, нанесенных методом плазменного напыления // Научный вестник НГТУ. – 2008. – № 3 (32). – С. 175–181.

**OPERABILITY ASSESSMENT OF WEAR-RESISTANT PLASMA COATINGS AFTER
THE HIGH-TEMPERATURE INFLUENCE BY HIGH-FREQUENCY CURRENTS**

Zverev E.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: egor_z@ngs.ru

Skeeba V.Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Tregubchak P.V., Assistant, e-mail: ipv@mail.ru

Vakhrushev N.V., Ph.D. student, e-mail: vah_nikit@mail.ru

Parts K.A., Master's Degree student, e-mail: krispars@yandex.ru

Zhigulev A.K., Student, e-mail: alexey-zhigulev@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of microhardness research of wear-resistant plasma coatings from high-chromium powder material after the influence by high-frequency currents. In contrast to the initial structure, the microhardness distribution according to the layer depth becomes almost uniform, although its level remains on average values with the initial one. The comparative wear-resistance tests under friction-sliding conditions of samples with initial structure and the structure obtained after the induction heating influence demonstrate the absence of wear-resistance increase.

Keywords

wear-resistance, induction heating, quality, microhardness, plasma coatings

УДК 621.8

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СВАРОЧНОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОТЛОВ***А.Ю. ЛЕВЧУК, магистрант**В.Р. ГЛЕЙМ, магистрант**К.П. ПЛОТНИКОВ, магистрант**Г.О. ЧА, магистрант**В.Ю. СКИБА, канд. техн. наук, доцент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Левчук А.Ю. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: ge.911@mail.ru

В статье приводится описание опыта внедрения в производство автоматизированного сварочного комплекса на примере изготовления водогрейных котлов марки Куппер ОК-15 и Куппер ПРО-42 ООО «ПКФ Теплодар». Разработаны рекомендации, внедрение которых в технологический процесс позволило существенно увеличить производительность операции «сварка».

Ключевые слова: сварка, сварочный комплекс, автоматизация, водонагревательный котел.

Введение

В настоящее время вопросам автоматизации сварочных процессов уделяется значительное внимание, поскольку наблюдается достаточно интенсивное внедрение автоматизированных систем управления в различных областях хозяйственной деятельности [1 - 5]. Данные проблемы нашли свое отражение в ряде научно-технических программ страны на текущий период и рассматриваются в качестве основных задач по ускорению научно-технического прогресса и развитию науки [6, 7]. Успешное решение указанных задач имеет важное значение для дальнейшего развития всего сварочного производства [8 - 10]. Целью данной работы является разработка технологических рекомендаций в условиях внедрения в серийное производство автоматизированного сварочного комплекса.

Продукция и технологическое оборудование

Автоматизация технологического процесса сварки происходила на примере изготовления водогрейных котлов производства ООО «ПКФ Теплодар», схожих по конструкции и различающихся габаритами (Куппер ОК-15 – наименьшая модель, Куппер ПРО-42 – наибольшая). Корпуса котлов состоят из листовых деталей, толщиной 3 мм и трубных теплообменников, изготавливаемых из стали 08пс ГОСТ 9045-93, соединённых между собой посредством сварочного соединения тавровым и угловым односторонним швом без скоса кромок.

Исходной технологией изготовления продукции являлась полуавтоматическая сварка, которая на производстве выполнялась работниками в ручном режиме.

Ниже представлены базовые компоненты автоматизированного сварочного комплекса (рис. 1, 2):

- FANUC ARC Mate 120iC/12L - сварочный манипулятор [11];

- FANUC R-30iB - контроллер [12];
- Двухосевой позиционер FANUC грузоподъёмностью 500 кг [13];
- КЕМРПИ KemparcPulse 450 - источник питания (MIG/MAG - тип сварки) [14].



Рис. 1. Манипулятор FANUC ARC Mate 120iC/12L и двухосевой позиционер FANUC



Рис. 2. Контроллер FANUC R-30iB и источник питания КЕМРПИ KemparcPulse 450

В качестве расходных материалов использовалась присадочная проволока СВ-08Г2С ГОСТ 2246-70 (с омеднённым покрытием), рекомендуемая для сварки деталей из стали 08пс ГОСТ 9045-93, а так же смесь защитных газов аргона и углекислого газа в количестве 82% и 18% соответственно.

Внедрение автоматизированного сварочного комплекса в технологический процесс

Для более точного позиционирования сварных швов в пространстве, первоначально, до запуска проекта, в конструкцию изделий были добавлены соединения типа «шип-паз» (рис. 3).

Перед установкой свариваемых элементов на позиционер, необходимо обеспечить их однозначное положение друг относительно друга, предварительно собрав сборочную единицу на «прихватки». Далее корпус располагают на специальном приспособлении (при помощи кран-

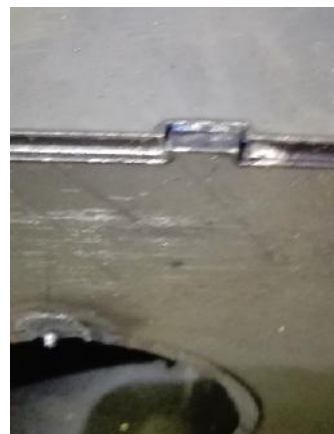


Рис. 3. Соединение типа «шип-паз»

балки), которое установлено на двухосевом позиционере. Приспособление обеспечивает базирование котла при помощи четырёх цилиндрических пальцев, через отверстия в опорах. Фиксация осуществляется посредством четырёх рычажных зажимов (рис. 4).

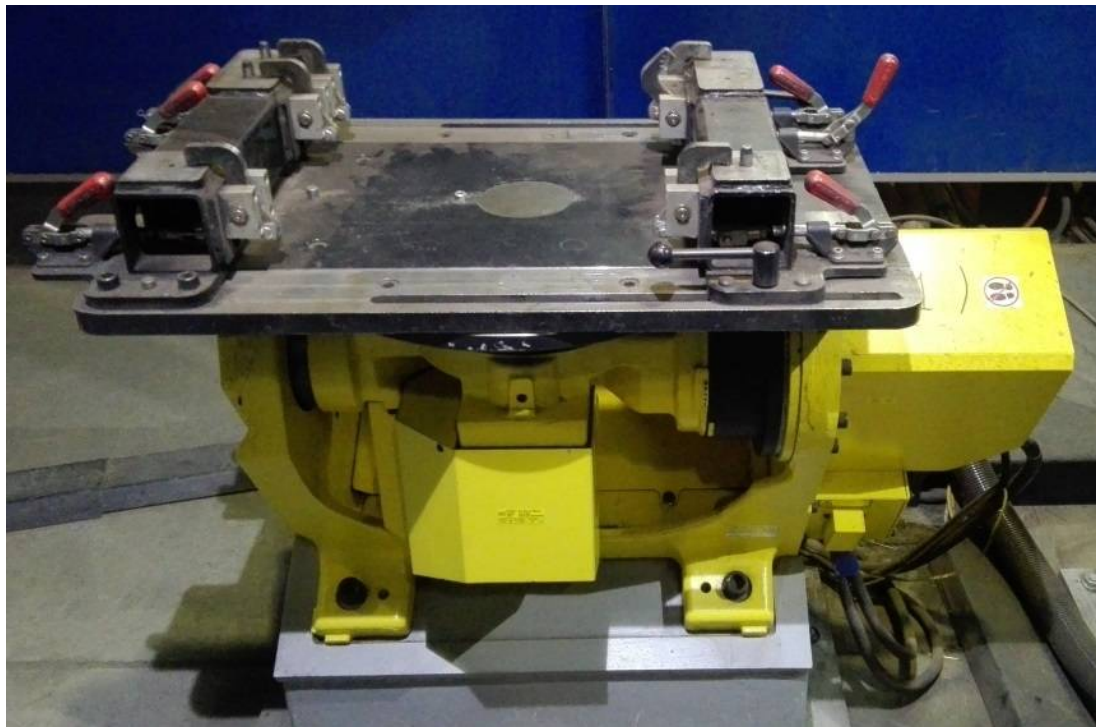


Рис. 4. Двухосевой позиционер FANUC и приспособление для установки котла

В процессе подготовки управляющей программы для сварочного комплекса особое внимание уделяется очерёдности сварки швов, для максимального снижения остаточных напряжений и деформаций.

Назначение режимов сварки заключалось в выборе соответствующих значений напряжения, величины сварочного тока, расхода защитного газа, скорости перемещения сопла и траектории движения сопла вдоль шва.

Для различных швов применялись 3 разные программируемые траектории движения сопла вдоль шва: *прямая, линейное и радиусное поперечное колебание* [10] (рис. 5, 6).



Рис. 5. Траектория линейного поперечного колебания

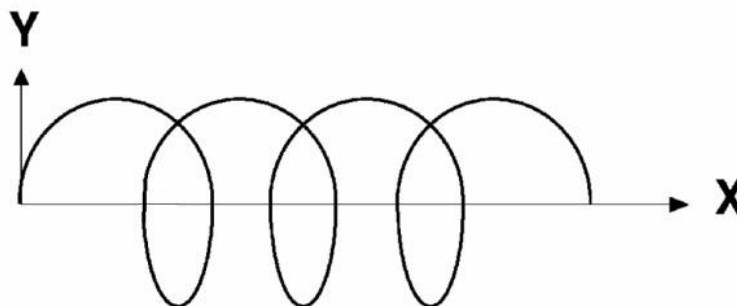


Рис. 6. Траектория радиусного поперечного колебания

От траектории зависит и скорость перемещения сопла:

- для линейного она составляет 9-10 мм/сек;
- для линейно-колебательного и циркуля 5-7,5 мм/сек.

Расход смеси защитных газов зависит от скорости сварки и варьировался от 10 до 15 л/мин. Для поддержания постоянного сопротивления дуги напряжение и сила тока изменялись в диапазоне $U \in [18 \text{ В}; 25 \text{ В}]$ и $I \in [80 \text{ А}; 200 \text{ А}]$ соответственно.

В процессе сварки в обязательном порядке использовалась система отслеживания шва по дуге (TAST), которая осуществляла управление роботом для поддержания тока постоянной величины между сварочной проволокой и деталью. В данных условиях, если деталь располагается от проволоки на расстоянии, отличающемся от указанного значения в управляющей программе, система ЧПУ вводит коррекцию и робот автоматически исправляет собственную траекторию, и обеспечиваются оптимальные режимы обработки. Необходимо также отметить, что TAST позволяет роботу отслеживать сварной шов как в вертикальной плоскости (между горелкой и деталью), так и в горизонтальной - поперёк шва, посредством контроля изменения сварочного тока [15].

Для снижения штучного времени изготовления, был приобретён и внедрен в технологический процесс второй двухосевой позиционер. Благодаря этому появилась возможность производить установку следующего изделия одновременно со сваркой.

Поскольку к сварным швам предъявляются достаточно жесткие требования по герметичности (ГОСТ 3242-79), контроль осуществляли методами капиллярной дефектоскопии.

Вывод

Таким образом, внедрение в технологический процесс автоматизированного сварочного комплекса позволило увеличить производительность процесса сварки (один сварщик за 8-ми часовую смену изготавливает 6 внутренних корпусов котла, робот за такой же период времени – 12 шт.). Экспериментально установлено, что использование данной автоматизированной системы способствует улучшению качества сварных швов, что, в свою очередь, также сказывается на экономии времени, поскольку не требуется дополнительная доработка изделия после дефектоскопии.

Список литературы

1. Совершенствование технологических процессов машиностроительных производств / А.С. Яньюшкин, С.О. Сафонов, Д.В. Лобанов и др. – Братск: Изд-во БрГУ, 2006. – 302 с.
2. *Архипов П.В., Лобанов Д.В., Яньюшкин А.С.* Совершенствование оборудования под процессы комбинированной обработки // Вестник Таджикского технического университета. – 2013. – Т. 2, № 2. – С. 32–37.
3. Эффективные технологии механической обработки деталей из неметаллических материалов / П.В. Архипов, А.В. Балыков, А.А. Дьяконов, О.Ю. Еренков, В.П. Иванов, Е.Г. Калита, А.Б. Липатова, Д.В. Лобанов, О.И. Медведева, А.В. Морозова, И.В. Шмидт, А.С. Яньюшкин; под ред. А.В. Киричека. – М.: Спектр, 2014. – 225 с.
4. Optimal organization of tools for machining composites / D.V. Lobanov, A.S. Yanyushkin, D.A. Rychkov, N.P. Petrov // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31. – N 2. – С. 156–157. – doi: 10.3103/S1068798X11020146.
5. Contact processes in grinding / A.S. Yanyushkin, D. Lobanov, P. Arkhipov, V. Ivancivsky // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – С. 17–21. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17.
6. Actual Problems and Decisions in Machine Building / ed. by V.Yu. Skeebe. – Pfaffikon: Trans Tech Publ., 2015. – 344 p. – (Applied mechanics and materials; vol. 788). – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788. – ISBN 978-3-03835-551-9.
7. *Скиба В.Ю.* Актуальные проблемы в машиностроении: сборник материалов первой международной научно-практической конференции // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. – 2014. – № 11 (66). – С. 83.
8. *Гладков Э.А., Бродягин В.Н., Перковский Р.А.* Автоматизация сварочных процессов: учебник. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 421 с.
9. Определение рациональных режимов электродуговой сварки стали 30ХГСА с помощью конечно-элементного моделирования в программном комплексе SYSWELD / В.Ю. Скиба, Е.Е. Корниенко, С.В. Веселов, Н.В. Плотнокова // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2009. – Ч. 1. – С. 238–245.
10. Актуальные проблемы в машиностроении / под ред. В.Ю. Скибы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 588 с. – ISBN 978-5-7782-2410-0.
11. Робот для дуговой сварки ARC Mate 120iC/12L компании Fanuc [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.fanuc.eu/ru/ru/роботы/страница-фильтра-роботов/дуговая-сварка/arcmate-120ic-12l> (дата обращения: 21.03.2016).
12. Контроллер R-30iB компании Fanuc [Электронный ресурс] – URL: <http://www.fanuc.eu/ru/ru/роботы/принадлежности/контроллер-r-30ib> (дата обращения: 21.03.2016).
13. Устройства позиционирования компании Fanuc [Электронный ресурс] – URL: <http://www.fanuc.eu/ru/ru/роботы/принадлежности/устройства-позиционирования> (дата обращения: 21.03.2016).
14. Каталог продукции компании Kemppi [Электронный ресурс] – URL: http://www.kemppi.com/inet/kemppi/ru/akp.nsf/frameset/frameset?OpenDocument&left=/inet/kemppi/ru/akp.nsf/WEB_Nav?OpenView&navcat=Search&main=/inet/kemppi/frontpage.nsf/0/D19B6356C7D4C536C22574570038B542?opendocument&top=/inet/kemppi/ru/akp.nsf/Top?ReadForm&topcat=Product%20Info (дата обращения: 21.03.2016).
15. Серия роботов FANUC, Контроллер R-J3iC ARC TOOL, Руководство оператора.

THE USE OF AUTOMATED WELDING COMPLEX FOR THE HOT WATER BOILERS PRODUCTION

Levchuk A.Yu., Master's Degree student, e-mail: ge.911@mail.ru

Glym V.R., Master's Degree student, e-mail: v_gleim@mail.ru

Plotnikov K.P., Master's Degree student, e-mail: k.plotnikow@gmail.com

Cha G.O., Master's Degree student, e-mail: Grigoriy_olegovich@mail.ru

Skeeba V.Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The article describes the implementation practice of automated welding production complex while manufacturing *Kupper- OK - 15* and *Kupper PRO-42 "PKF Teplodar"* boilers. We have developed a number of recommendations for the technological process which have significantly increased the performance of welding operations.

Keywords

welding, welding system, automation, water heating boiler

УДК 621.793.74

**ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ
МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ****В.В. ИВАНЦИВСКИЙ**, доктор техн. наук, доцент**Е.А. ЗВЕРЕВ**, канд. техн. наук, доцент**Н.В. ВАХРУШЕВ**, аспирант**И.В. БАНДЮРОВ**, магистрант

(НГТУ, г. Новосибирск)

Зверев Е.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: egor_z@ngs.ru

Рассмотрено одно из наиболее перспективных направлений повышения качества износостойких плазменных керамических покрытий за счет применения механических смесей порошковых материалов. Приведены результаты исследования адгезионной прочности покрытий из никелькерамической и кобальтокерамической механических смесей. Адгезионная прочность полученных плазменных металлокерамических покрытий из механических смесей несколько ниже по сравнению с адгезионной прочностью покрытий из стандартных порошков, что объясняется спецификой структуры полученных покрытий. Однако в целом, значение адгезионной прочности металлокерамических покрытий сохраняется на приемлемом уровне для обеспечения работоспособности деталей машин.

Ключевые слова: износостойкость, плазменное напыление, механические смеси, металлокерамическое покрытие, оксидная керамика, никелевый порошок, кобальтовый порошок, адгезионная прочность.

Введение

Плазменные износостойкие покрытия получили широкое применение при упрочнении рабочих органов самого различного технологического оборудования: почвообрабатывающих машин, строительной, дорожной, буровой, металлообрабатывающей и другой техники.

Одним из распространенных материалов является керамика на основе оксида алюминия Al_2O_3 [1 - 9]. Данные покрытия обладают высокой твердостью и износостойкостью, но в тоже время керамике свойственна определенная хрупкость, приводящая к скалыванию покрытий при возникновении ударных нагрузок. Для повышения качества керамических покрытий весьма перспективным направлением является формирование металлокерамических композиций. На практике это реализуется такими методами, как термодиффузионное легирование керамических порошков частицами цветных металлов (ниобия, алюминия и др.), либо непосредственным плакированием порошковых частиц (созданием металлической оболочки) [10 - 12]. Однако данные технологии сопряжены с определенными трудностями, связанными с высокой трудоемкостью и низкой производительностью.

В свою очередь технология плазменного напыления позволяет формировать металлокерамические покрытия на основе механических смесей порошковых материалов, в которых керамика обеспечивает высокий уровень твердости, а более мягкий компонент (металлический порошок) служит связкой, что в целом обеспечивает рациональное

соотношение свойств покрытий. Применение порошков в виде механических смесей является процессом технологически гораздо менее трудоемким, более дешевым и производительным, к тому же дает возможность управления структурой в широких пределах путем применения композиций с различным химическим составом [13].

Ранее нами были проведены исследования по формированию структур плазменных покрытий из никелькерамической и кобальтокерамической механических смесей [14, 15]. Сравнительные испытания на износостойкость показали, что их можно использовать в качестве упрочняющих покрытий, которые могут воспринимать значительные нагрузки [16]. Металлографический анализ позволил определить специфику формирования данных покрытий и выявил достаточно равномерное распределение частиц керамики и металла, как в структуре покрытия, так и на переходной границе. Таким образом, в связи с присутствием частиц керамики на переходной границе, вопрос определения адгезионной прочности данных металлокерамических покрытий, нанесенных без применения переходного слоя в отличие от традиционной технологии напыления керамики, имеет существенное значение.

Целью настоящей работы является изучение адгезионной прочности металлокерамических износостойких покрытий полученных плазменным напылением.

Методика проведения экспериментов

Основным компонентом для механических смесей служила оксидная керамика марки М28, в качестве связующих компонентов использовались порошковые материалы на основе никеля марки ПГ-12Н-01 и кобальта марки ПГН-ВЗК.

Приготовление механических смесей из порошков, с целью обеспечения однородности, реализовано путем механического перемешивания в специальной мельнице. Нанесение плазменных покрытий на образцы производили на установке "Киев-7" плазмотроном ПУН-3 мощностью 40 кВт [17].

В качестве образцов использовались втулки, изготовленные из стали 20 с наружным и внутренним диаметрами соответственно 25 мм и 15 мм, длиной 12 мм. Процесс напыления осуществлялся за счет поступательного перемещения плазмотрона и вращения оправки с образцами. Заготовки предварительно подвергались процессу струйно-абразивной очистки частицами из электрокорунда. Образцы обрабатывались при одинаковых условиях, что позволило получить поверхности заготовок с шероховатостью в пределах $Rz = 60...80$ мкм.

Режимы напыления были приняты следующими: величина тока дуги плазмотрона – 120...180 А; напряжение – 150...160 В; расход плазмообразующего газа (воздуха) – 9...12 л/мин; дистанция напыления – 110 мм; скорость перемещения плазмотрона – 250 мм/мин; частота вращения оправки с образцами – 150...200 об/мин. Толщина слоя покрытия выдерживалась в пределах 500...540 мкм [18].

Для оценки адгезионной прочности применялся метод "сдвига" [19]. Для его реализации использовалась установка, схема которой изображена на рис. 1. С помощью специального пресса цилиндрические образцы, состоящие из основного материала 1 с покрытием 2, продавливались пуансоном 3 через матрицу 4. При этом происходило разрушение и отрыв покрытия от основы. Значение прочности сцепления определялось через отношение нагрузки при разрушении к площади отрыва покрытия.

Для каждой марки порошка и каждой исследуемой металлокерамической смеси были изготовлены три образца, с шириной напыленного покрытия 6...7 мм. Результаты опытов определялись как среднее арифметическое значение полученных данных.

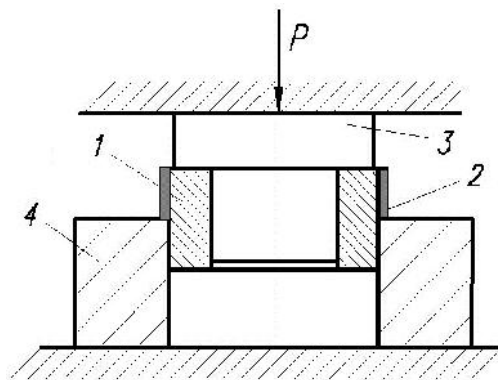


Рис. 1. Схема оценки адгезионной прочности:
1 – основной металл; 2 – покрытие; 3 – пуансон; 4 – матрица

Результаты исследований

На рис. 2 представлены результаты исследования адгезионной прочности покрытий из никелькерамической и кобальтокерамической механических смесей в сравнении с покрытиями из стандартных порошков марок ПГ-12Н-01 и ПГН-ВЗК.

Из анализа полученных результатов следует, что адгезионная прочность полученных плазменных металлокерамических покрытий из исследуемых механических смесей несколько ниже (около 4...6%) по сравнению с адгезионной прочностью покрытий из стандартных порошков. Это объясняется формированием структуры покрытий с иным количественным соотношением компонентов, существенно отличающимся от исходных механических смесей, вследствие существующего эффекта сегрегации порошковых частиц в процессе плазменного напыления.

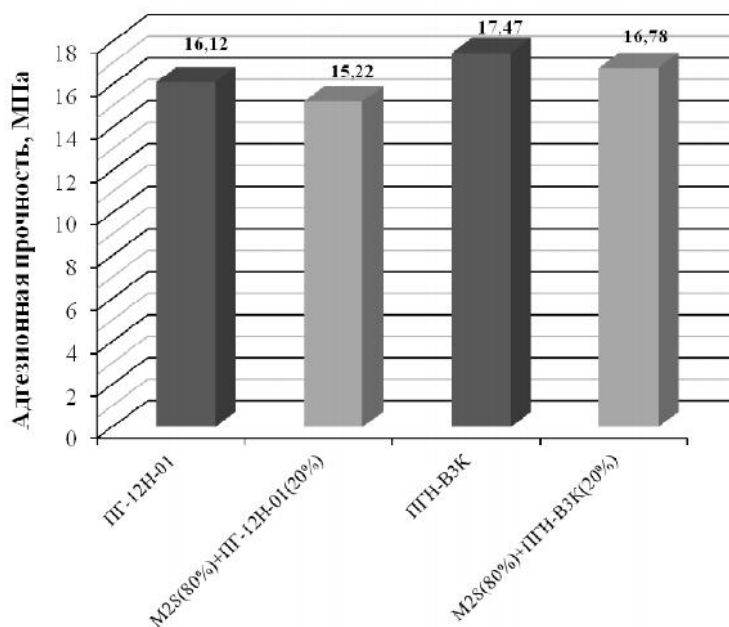


Рис. 2. Диаграмма результатов оценки адгезионной прочности покрытий

Очевидно, что сам факт некоторого снижения адгезии связан с наличием частиц оксидной керамики на переходной границе. Однако, учитывая численные значения прочности сцепления исследуемых металлокерамических покрытий можно предположить, что в целом они будут обладать достаточной работоспособностью.

Выводы

Стоит отметить, что формирование плазменных металлокерамических покрытий из механических смесей является весьма перспективным направлением. Проведенные исследования показали, что полученные покрытия обладают приемлемой адгезионной прочностью. Немаловажным фактором в технологии нанесения данных покрытий является отсутствие необходимости в операции напыления промежуточного слоя. Однако промышленное применение плазменных металлокерамических композиций из механических смесей требует проведения широкого комплекса дальнейших экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Dolata A.J. Fabrication and structure characterization of alumina-aluminum interpenetrating phase composites // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2016. – January. – P. 1–9. – doi: 10.1007/s11665-016-1901-2.
2. Dolata A.J. Centrifugal castings locally reinforced with porous Al₂O₃ preform // Archives of Metallurgy and Materials. – 2014. – Vol. 59, iss. 1. – P. 343–346. – doi: 10.2478/amm-2014-0057.
3. Актуальные проблемы в машиностроении / под ред. В.Ю. Скибы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 588 с. – ISBN 978-5-7782-2410-0.
4. Pouliat A., Sakkas P.M., Kanellopoulou D.G., Sourkouni G., Legros C., Argirusis C. Preparation of metal-ceramic composites by sonochemical synthesis of metallic nano-particles and in-situ decoration on ceramic powders. Ultrasonics sonochemistry. – 2016. – Vol. 31. – P. 417–422.
5. Actual Problems and Decisions in Machine Building / ed. by V.Yu. Skeebe. – Pfaffikon: Trans Tech Publ., 2015. – 344 p. – (Applied mechanics and materials; vol. 788). – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788. – ISBN 978-3-03835-551-9.
6. Совершенствование технологических процессов машиностроительных производств / А.С. Янюшкин, С.О. Сафонов, Д.В. Лобанов и др. – Братск: Изд-во БрГУ, 2006. – 302 с.
7. Contact processes in grinding / A. Yanyushkin, D. Lobanov, P. Arkhipov, V. Ivancivsky // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 17–21. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17.
8. Скиба В.Ю. Актуальные проблемы в машиностроении: сборник материалов первой международной научно-практической конференции // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. – 2014. – № 11 (66). – С. 83.
9. Kok M. Production and mechanical properties of Al₂O₃ particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol. 161, iss. 3. – P. 381–387. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.07.068.
10. Получение композиционного керамического материала для нанесения износостойких покрытий / В.А. Оковитый и др. // Порошковая металлургия. – Минск: Белорусская наука, 2008. – Вып. 31. – С. 156–162.
11. Технология получения композиционного материала на основе многофункциональной оксидной керамики / В.А. Оковитый, Ф.И. Пантелеенко, Т.Л. Талако, А.Ф. Пантелеенко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 2 (67). – С. 39–45.
12. Разработка технологических процессов получения оксидных покрытий с улучшенным комплексом свойств / М.А. Кардаполова и др. // Вестник БГТУ. Машиностроение. – 2006. – № 4 – С. 31–35.

13. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 357 с.
14. Чёсов Ю.С., Зверев Е.А., Вахрушев Н.В. Исследование структуры износостойких плазменных покрытий из механических смесей // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (80). – С. 96–105.
15. Структура износостойких плазменных покрытий из никель-керамической смеси / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, Н.В. Плотникова, Н.В. Вахрушев, А.С. Ваганов, И.В. Бандюров // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 405–409.
16. Сравнительные испытания износостойких плазменных покрытий, сформированных на базе механических смесей из различных порошковых материалов / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, Н.В. Вахрушев, А.С. Ваганов // Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: материалы VI международной научно-технической конференции. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 211–215.
17. Структура износостойких плазменных покрытий после высокоэнергетического воздействия ТВЧ / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, В.В. Иванцовский, В.Ю. Скиба, Н.В. Плотникова, Д.В. Лобанов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 4 (65). – С. 11–18.
18. *Skeeba V., Pushnin V., Kornev D.* Quality improvement of wear-resistant coatings in plasma spraying integrated with high-energy heating by high frequency currents // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 788. – P. 88–94. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.88.
19. Чёсов Ю.С., Зверев Е.А. Исследование износостойкости покрытий, нанесенных методом плазменного напыления // Научный вестник НГТУ. – 2008. – № 3 (32). – С. 175–181.

ADHESION STRENGTH RESEARCH OF WEAR-RESISTANT CERAMIC-METAL PLASMA COATINGS

Ivancivsky V.V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ivancivskij@corp.nstu.ru
Zverev E.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: egor_z@ngs.ru
Vakhrushev N.V., Ph.D. student, e-mail: vah_nikit@mail.ru
Bandyurov I.V., Student, e-mail: bandyurov@yandex.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

One of the most promising ways of increasing the quality of wear-resistant ceramic plasma coatings through the application of mechanical mixtures of powder materials has been considered. Research results of adhesion strength of coatings from nickel-ceramic and cobalt-ceramic mechanical mixes are shown. The adhesion strength of obtained ceramic-metal plasma coatings from mechanical mixtures is slightly lower in comparison with the adhesion strength of standard powder coatings. It is explained by specific structure of the resulting coatings. However, the adhesion strength value of ceramic-metal coatings is retained at the acceptable level to ensure the operability of machine parts.

Keywords

wear-resistance, plasma spraying, mechanical mixtures, ceramic-metal coating, oxide ceramic, nickel powder, cobalt powder, adhesion strength

УДК: 621.762.02:669.295

**ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕСФЕРИЧЕСКИХ ТИТАНОВЫХ
ПОРОШКОВ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ***В.Е. ОЛЬШАНЕЦКИЙ, доктор техн. наук, профессор**А.В. ОВЧИННИКОВ, доктор техн. наук, профессор**А.А. ДЖУГАН, аспирант**(ЗНТУ, г. Запорожье)*

Джуган А.А. – 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64,
Запорожский национальный технический университет,
e-mail: o.a.dzhugan@gmail.com

Аддитивные технологии являются перспективным направлением в развитии таких отраслей промышленности как высокоточное машиностроение и авиадвигателестроение. В тоже время высокая себестоимость процесса 3D печати и отсутствие альтернативного (сферическому порошку) сырья препятствует широкому распространению указанных технологий. В данной работе показана принципиальная возможность использования более дешевых порошковых материалов на основе титана с несферической формой частиц, получаемых по технологии гидрирования-дегидрирования и предназначенных для изготовления объемных изделий различными методами аддитивных технологий. Рассмотрена возможность применения разных источников энергии для послойного наращивания материала при формировании изделий. Определены оптимальные режимы процессов пошагового сплавления тонких слоев порошковых материалов. Описано преимущество предложенных порошков в сравнении с применяемыми на сегодняшний день порошками сферической формы. Проведены металлографические исследования образцов, полученных из опытных порошков.

Ключевые слова: аддитивные технологии; титан; порошок; частица; форма; фракция; поверхность; слой; компактирование; сплавление; структура; свойства.

Введение

Применение аддитивных технологий является перспективным направлением в развитии различных отраслей промышленности (особенно таких, как высокоточное машиностроение и авиадвигателестроение), позволяющим получать готовые изделия, а также и изготавливать необходимую в промышленности технологически сложную оснастку. Эти технологии (AM-технологии Additive Manufacturing) позволяют объединить в себе главные преимущества таких методов получения изделий, как порошковая металлургия, литейное производство и наплавка. Указанные технологии предполагают изготовление изделия по данным цифровой модели (или САД-файла) методом послойного добавления материала. Процесс послойного наращивания изделий различными методами аддитивных технологий приобретает все большую популярность, поскольку обладает рядом значительных преимуществ перед существующими, традиционными методами изготовления, обработки и ремонта деталей. Формирование изделия происходит пошагово, в соответствии с конфигурацией сечения цифровой модели и соединения каждого последующего слоя с предыдущим, (вместо существующей технологии обработки металлов резаньем, когда материал как бы «отнимается») [1 - 4].

Технологии 3D печати позволили объединить в себе не только преимущества порошковой металлургии, такие как высокий коэффициент использования материала, что не получается достичь методами литья, но также и преимущества литейного производства при получении деталей сложной формы и различной конфигурации.

Теория

Сегодня указанные технологии успешно применяются для производства изделий из пластика, но уже ведутся активные работы по использованию в качестве сырья для таких технологий различных металлических и керамических порошков. Однако вызванные при этом сложности процесса уменьшают номенклатуру металлических изделий, получаемых с помощью АМ-технологий [5 - 10].

Важнейшей задачей при этом является замена существующих дорогостоящих импортных порошковых материалов более дешевыми аналогами. Таким образом, развитию АМ-технологий в секторе промышленности, безусловно, способствовало бы существенное расширение номенклатуры металлопорошковых материалов различной морфологии. Если в начале 2000-х годов это был перечень с не более 5-6 наименований, то сегодня пытаются использовать десятки видов разнообразных композиций от обычных конструкционных сталей до жаропрочных сплавов и драгметаллов в основном порошков сферической формы [2 - 4]. В тоже время порошки из специальных сплавов (например, титановые) имеют очень ограниченную номенклатуру видов этих материалов.

К основным преимуществам аддитивных технологий можно отнести следующее:

1. Возможность изготовления деталей сложной геометрии и различной конфигурации.
2. Возможность оперативно менять геометрию деталей.
3. Высокий коэффициент использования материала.
4. Различные методы 3D печати позволяют использовать их для восстановления и ремонта изделий, а также дают возможность изготавливать детали с закрытыми полостями.

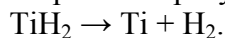
Несмотря на все достоинства и преимущества, которые предоставляет использование 3D печати, остается ряд проблем, сдерживающих распространение этой технологии в промышленности. Одной из них является необходимость тщательных исследований свойств (механических, физических) получаемых изделий из различных порошковых материалов, в зависимости от таких факторов как влияние фракционного состава и формы самих частиц, что безусловно очень важно в таких ответственных отраслях производства, как авиастроение. При этом следует отметить, что на сегодняшний день уже существует ряд деталей, изготовленных методами 3D печати, которые устанавливаются на газотурбинные двигатели производства зарубежных компаний. Еще одной важной проблемой является дороговизна оборудования для 3D печати, хотя, исходя из опыта предприятий, которые внедряют в своем производстве технологии послойного выращивания изделий, можно сделать вывод, что главным сдерживающим фактором на пути к широкому применению АМ-технологий является дороговизна сырья для объемной печати. Особенно это сказывается при использовании порошков титана, как легированных, так и нелегированных, и основную роль в ценообразовании здесь играет не столько стоимость легирующих элементов, сколько стоимость самой технологии получения порошков необходимой сферической формы (которая составляет около 500-700 долларов за килограмм).

Таким образом, существует необходимость разработки порошков для АМ-технологий. Поэтому основной задачей, поставленной в данной работе, было определить возможность применения титановых порошков несферической формы, которые прошли процессы гидрирования и дегидрирования, в аддитивных технологиях для получения готовых изделий.

Процесс гидрирования титана (губчатого) состоит в прямом насыщении водородом титана и проходит при температурах 400...600°C.

Гидрирование титана губчатого производится с целью насыщения и охрупчивания исходного материала для дальнейшего измельчения.

Процесс дегидрирования осуществляется при температурах 700...900 °С и заключается в дегазации гидрида титана при температурах разложения гидрида:



Анализ технологических показателей производства порошков, их преимуществ и недостатков показал, что наиболее перспективным материалом для АМ- технологий является порошок, получаемый по гидридной технологии. Такой материал имеет низкоразвитые поверхности граней порошинок, приближенных по форме к сфероидам. Он менее, чем остальные, загрязнен примесями, поскольку водород способствует очищению титана при дегидрировании [11].

Поэтому нами предложено использование титановых порошков, которые были предварительно подвергнуты операциям гидрирования и дегидрирования в технологической цепочке их производства для дальнейшего получения изделий различными методами аддитивных технологий.

Совокупность технологических решений производства таких порошков титана позволяет получать более плотный материал с меньшим содержанием вредных примесей, что повышает качество порошка и улучшает морфологию отдельных его частиц. На рис. 1 показан внешний вид и структура сферических и несферических порошков.

Обычно считают, что наилучшими по форме частицами являются сфероиды примерно одинакового размера [1, 2], при этом каждый слой таких частиц обычно компактируют путем приложения незначительных поверхностных усилий (например, с помощью вращающегося валика). Поскольку последующая технологическая операция предусматривает спекание или проплавление слоя из такого рода частиц [8-10], то необходимо изначально предусмотреть возможность использования чисто термодинамических подходов для получения наилучших результатов как по времени завершения процесса сочленения слоев, так и по качеству формируемой поверхности.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены реальные частицы металлического порошка (сферического титана и порошка титана, полученного по технологии гидрирования-дегидрирования [11]), которые отвечают упрощенным моделям, представленным в работе [12] разных типов укладки гипотетических частиц той или иной формы.

Вопрос о характере сопряженности частиц по контактными поверхностям (точкам и линиям в плоских моделях) можно приблизительно решить с помощью прогона головки профилометра-профилографа вдоль и поперек насыпанных и закрепленных с подложкой порошковых слоев минимальной толщины (одинарной укладки) то есть слоев, имеющих минимальную высоту.

Для получения указанных объектов исследования нами были использованы стеклянные плоские образцы, покрытые тонким слоем маловязкой клеевой основы. Предварительные графические результаты экспериментов с использованием указанного прибора приведены на рис. 2.

Они свидетельствуют о том, что в случае порошков различных фракций «наиболее гладкая» внешняя поверхность получается при использовании порошкового материала, в котором частицы имеют форму многогранников, условно принимаемых за объекты, приближающиеся по форме к частицам, в виде гексаэдров и их разновидностей.

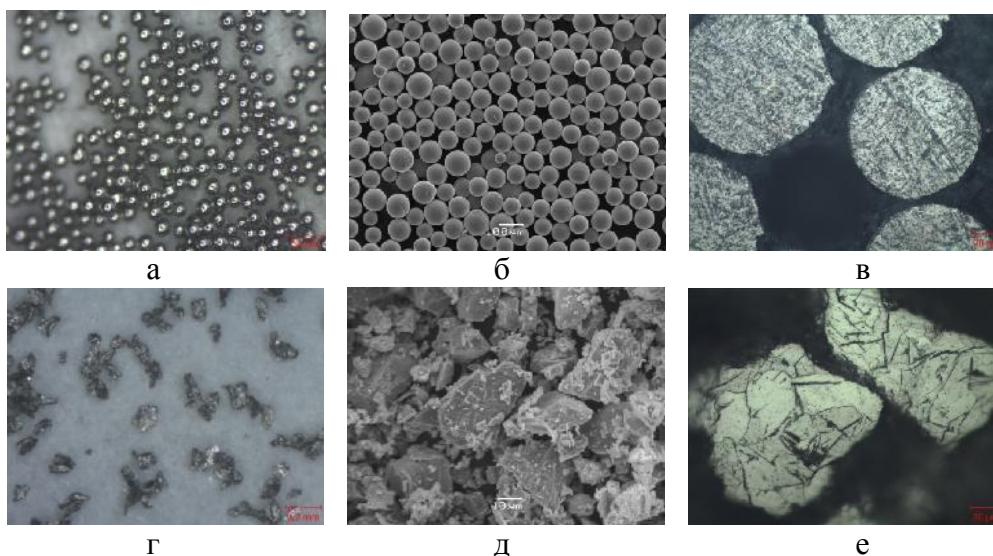
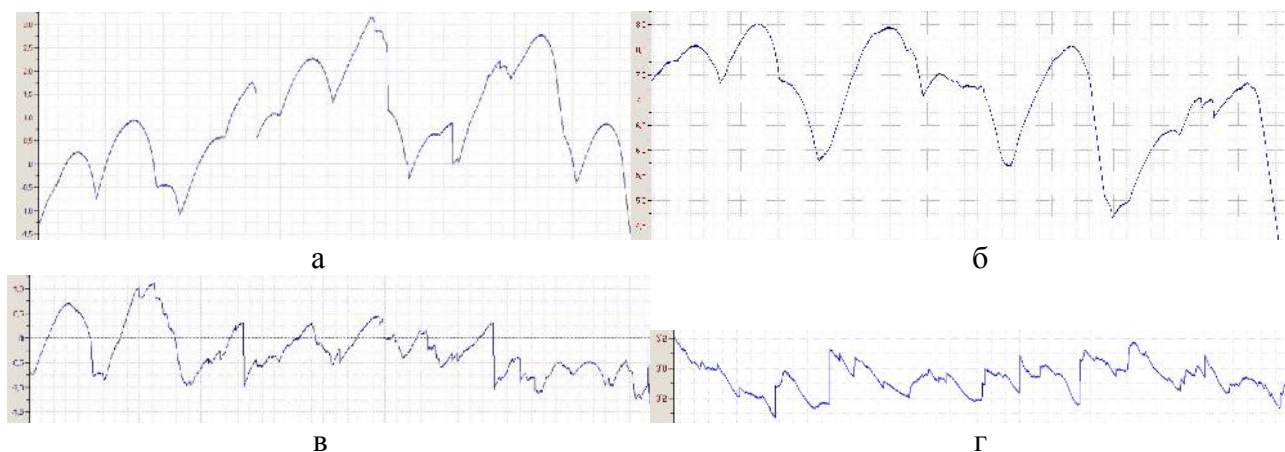


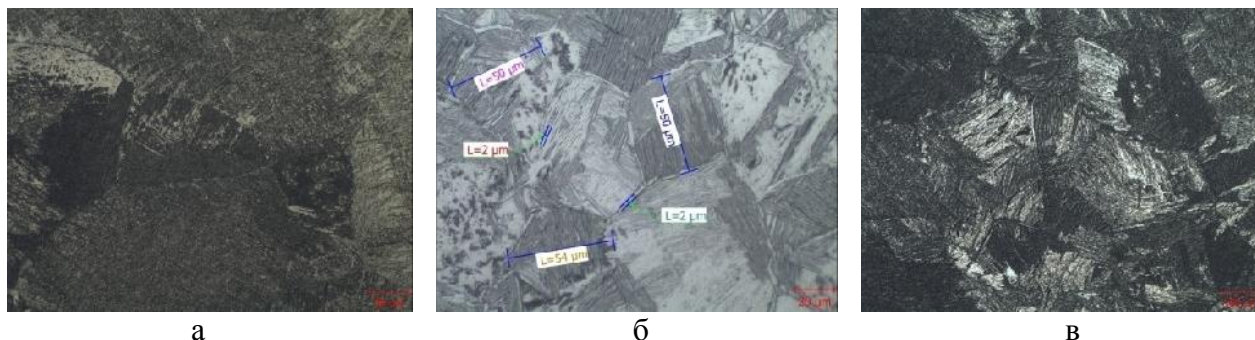
Рис. 1. Внешний вид и структура сферических (а, б, в) и несферических (г, д, е) порошков титана (фракция-100 мкм)



а, б – сферический порошок фракцией -200+100 мкм.;
в – несферический порошок фракцией -250+100 мкм.;
г – несферический порошок фракцией -50 мкм.

Рис. 2. Результаты исследования порошков на профилометре-профилографе

Это свидетельствует о том, что ориентация на использование порошков такого типа обещает при использовании аддитивных технологий хорошее исходное уплотнение, которое должно способствовать получению более плотных и однородных слоев 3D образцов при их формировании путем послойного спекания или сплавления [6, 7, 12]. На приведенной ниже (рис. 3) микрофотографии многослойного образца из нелегированного титана (полученного сплавлением по технологии SLM – селективного лазерного сплавления) показан достаточно хороший уровень сочленения слоев без каких-либо видимых дефектов, типа несплошностей (раковин или непроваров).



а – метод электронно-лучевой сварки
б, в – метод аргодуговой сварки

Рис. 3. Микроструктура опытных образцов полученных по технологии послойного наращивания из титанового порошка (фракция -250+100мкм.)

Наплавки порошка по химическому составу соответствующего марке сплава ВТ1-0 осуществлялась методом ЭЛС (электронно-лучевой сварки) на установке ЭЛУ-20, с предварительной насыпкой порошка. Скорость наплавки составляла 1,11 мм/сек; ток наплавки 40...50 мА; ток фокусировки 605...610 мА. Наплавки АДС (аргодуговой сваркой) производились вручную, с послойной насыпкой и оплавлением порошка, в камере с контролируемой средой (аргон). Режим наплавки были примерно одинаковый для всех образцов (сварочный ток до 30А, источник тока Fronius TT3000).

Выводы

Из приведенных выше рисунков видно, что полученный (сплавленный) слой материала характеризуется наличием равноосной, однородной, плотной и безпористой структуры без каких-либо видимых дефектов (в виде несплошностей или пор). При этом, структура опытных образцов приближена к структуре заготовок, полученных методами литья.

Таким образом, можно констатировать, что относительно дешёвый порошок, полученный по технологии гидрирования – дегидрирования, является перспективным с точки зрения замены существующих дорогостоящих порошков титана сферической формы.

Список литературы

1. Довбыш В.М., Забеднов П.В., Зленко М.А. Аддитивные технологии и изделия из металла // Библиотечка литейщика. – 2014. – № 9. – С. 14–71.
2. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 221 с.
3. Балака Е.В. Основные факторы влияния на процесс формообразования деталей с помощью технологий послойного выращивания (rapid prototyping) // Високи технології в машинобудуванні. – 2011. – №1. – С. 29–36.
4. Волхносский А.Е., Дудков К.В. Методы изготовления прототипов и деталей агрегатов различных изделий промышленности с помощью аддитивных технологий // Образовательные технологии. – 2014. – № 1. – С. 127–143.
5. Xiao B., Zhang Y. Partial melting and resolidification of metal powder in selective laser sintering // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 2006. – Vol. 20, N 3. – P. 439–448.

6. Моделирование процесса 3-d печати с использованием несферических гидрированных – дегидрированных порошков титана / А.В. Овчинников, А.А. Джуган, А.В. Шевченко и др. // Стародубовские чтения: сборник трудов. – Днепропетровск, 2015. – С. 222–228.

7. Овчинников А.В., Ольшанецкий В.Е., Джуган А.А. Применение несферических гидрированных и дегидрированных порошков титана для получения изделий в аддитивных технологиях // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 1. – С. 114–117.

8. Microstructure-controllable laser additive manufacturing process for metal products / W.-C. Huang, C.-S. Chuang, C.-C. Lin, C.-H. Wu, D.-Y. Lin, S.-H. Liu, W.-P. Tseng, J.-B. Horng // Physics Procedia. – 2014. – Vol. 56. – P. 58–63.

9. The processing of Mg-Ti for hydrogen storage; mechanical milling and plasma synthesis / G. Çakmak, Z. Karoly, I. Mohai, T. Ozturk, J. Szepevolgui // International Journal of Hydrogen Energy. – 2010. – Vol. 35. – P. 118–125.

10. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms / D.D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe // International Materials Reviews. – 2012. – Vol. 57, iss. 3. – P. 133–164.

11. Поверхневі явища при нагріванні порошку гідриду титану / О.М. Івасишин, О.Б. Бондарчук, М.М. Гуменяк, Д.Г. Саввакін // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. – Т. 12, № 4. – С. 900–907.

12. Уплотняемость порошковых материалов с различной формой частиц / В.Е. Ольшанецкий, А.В. Овчинников, А.А. Джуган и др. // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2015. – № 1. – С. 130–133.

POSSIBILITY OF USING OF NON-SPHERICAL TITANIUM POWDERS FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES

Olshanetskiy V.E., D.Sc. (Engineering), Professor, Head of department
Ovchinnikov A.V., D.Sc. (Engineering), Professor, Head of department
Dzhugan A.A., Ph.D. student, e-mail: o.a.dzhugan@gmail.com

Zaporozhye National Technical University, 64 Zhukovskogo str., Zaporozhye, 69063, Ukraine

Abstract

Additive technology is a promising direction in the development of industries such as the high-precision engineering and Aircraft engine building. At the same time, the high cost of 3D printing process and the lack of alternative (spherical powder) raw materials prevents the wide dissemination of these technologies. In this paper, the possibility of using cheaper powder materials based on titanium with particles of non-spherical shape, obtained by hydrogenation-dehydrogenation technology and intended for the three-dimensional products production by various methods of additive technologies is shown. The possibility of using different energy sources to build layered material in the formation of products is considered. The optimal modes of process of step fusing of thin layers of powdered materials are settled. Advantages of offered powders in comparison with applied today powders of spherical shape are described. The results of metallographic investigation of samples derived from the experimental powders are presented.

Keywords

additive technologies; titanium; powder; particles; shape; fractions; surface; layer; compaction; fusion; structure; properties

УДК 621.914.1

**РАЗРАБОТКА 3D-МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ
ТОРЦОВОЙ ФРЕЗОЙ В ПРИКЛАДНОМ ПАКЕТЕ RECURDYN**

В.И. ПОДДУБНЫЙ, доктор техн. наук, доцент
Ю.А. КРЯЖЕВ, канд. техн. наук, доцент
Е.Ю. ГОРИН, аспирант
(АлтГТУ, г. Барнаул)

Горин Е.Ю. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: evgenijgorin@gmail.com

В работе решаются задачи обеспечения стабильности параметров качества деталей, изготавливаемых методами механической обработки путём использования динамических моделей, прогнозирующих технологические параметры, которые оптимальны и обеспечивают устойчивость выполнения технологической операции. Для решения этих задач использован пакет прикладных программ RecurDyn, который широко применяется для создания моделей различных механических систем, их анализа и оптимизации конструкции, использует идеологию визуального объектно-ориентированного программирования и компьютерное исследование объемных твердотельных моделей режущего инструмента, заготовки и других элементов технологической системы для прогнозирования напряжений, деформаций, частот собственных колебаний, момента инерции, амплитудно-частотных характеристик и других параметров, характерных для процесса механической обработки резанием. Использование пакета прикладных программ RecurDyn позволило смоделировать динамическое состояние сборной торцовой фрезы в процессе резания стальной заготовки заданных размеров и физико-механических свойств и провести динамический анализ процесса стружкообразования для различных параметров режима фрезерования.

Ключевые слова: Фреза, торцовое фрезерование, моделирование, динамическое состояние, амплитудно-частотные характеристики, RecurDyn.

Введение

В современном машиностроении предъявляются высокие требования к точности получаемых размеров, к отклонениям формы, шероховатости и другим геометрическим параметрам качества поверхности изготавливаемых деталей [4]. Огромное значение при этом имеет задача - обеспечение стабильности параметров качества деталей, изготавливаемых методами механической обработки. В настоящее время, традиционно используется для проектирования операций механической обработки подход, основанный на применении нормативов, составленных по систематизированным экспериментальным данным. Данный подход не всегда удовлетворяет требования современного машиностроения. Разработанные теоретические модели процессов механической обработки не всегда могут быть использованы при проектировании технологических процессов из-за высокой сложности расчётов и низкой точности прогнозируемых технологических параметров. Кроме того, традиционно используемый подход при проектировании

операций механической обработки не позволяет проводить анализ устойчивости технологической системы при изменении её параметров (динамические колебания параметров режущего инструмента, заготовки, узлов станка, станочного приспособления, вспомогательной оснастки и других элементов технологической системы). Известно, что процессы механической обработки не являются стабильными, нестабильны и параметры всех элементов технологической системы. Поэтому для обеспечения стабильности параметров качества деталей, изготавливаемых методами механической обработки необходимо использование динамических моделей, прогнозирующих технологические параметры, которые оптимальны и обеспечивают устойчивость выполнения технологической операции. Современные прикладные объектно-ориентированные программные пакеты (CAMeL-View, RecurDyn, ANSYS) позволяют произвести разработку модели технологической системы (станок, приспособление, инструмент, деталь) с возможностью программного управления её движениями. Для решения этих задач может быть использован пакет прикладных программ RecurDyn, который широко применяется для создания моделей различных механических систем, их анализа и оптимизации конструкции, и использует идеологию визуального объектно-ориентированного программирования [2]. Это объясняется функциональными возможностями 3D моделирования и наличием полного спектра средств инженерного анализа.

Моделирование напряжений, деформаций, частот собственных колебаний, момента инерции, амплитудно-частотных характеристик и других параметров, характерных для процесса механической обработки резанием, осуществляется компьютерным исследованием объемных твердотельных моделей режущего инструмента, заготовки и других элементов технологической системы.

Методика экспериментального исследования

Твердотельная модель сборной торцовой фрезы и заготовки создавалась с помощью программы SolidWorks Version 2014. На рисунке 1 показаны модель торцовой фрезы с цилиндрическими вставками (демпфирующими элементами) из резины для регулирования жесткости и модель обрабатываемой стальной заготовки. Конструкция данной сборной торцовой фрезы разработана на кафедре «технология машиностроения» АлтГТУ им. И.И. Ползунова и защищена патентом РФ (патент на изобретение № 2559078).

Для моделирования динамического состояния сборной торцовой фрезы при резании стальной заготовки использовался программный комплекс RecurDyn V8R3(рис. 2) [3].

Торцовая фреза и стальная заготовка моделируются как твердые тела, массово-геометрические характеристики которых определяются по задаваемым пользователем размерам и плотности материала.

Силы, действующие на режущие пластинки фрезы в процессе резания, определяются в инерциальной системе отсчета в блоке Force (упругую силу Spring с задаваемой жесткостью и демпфированием, силу Axial, действующую в задаваемом направлении и описываемой аналитическим выражением и др.) (рис. 3) [1].

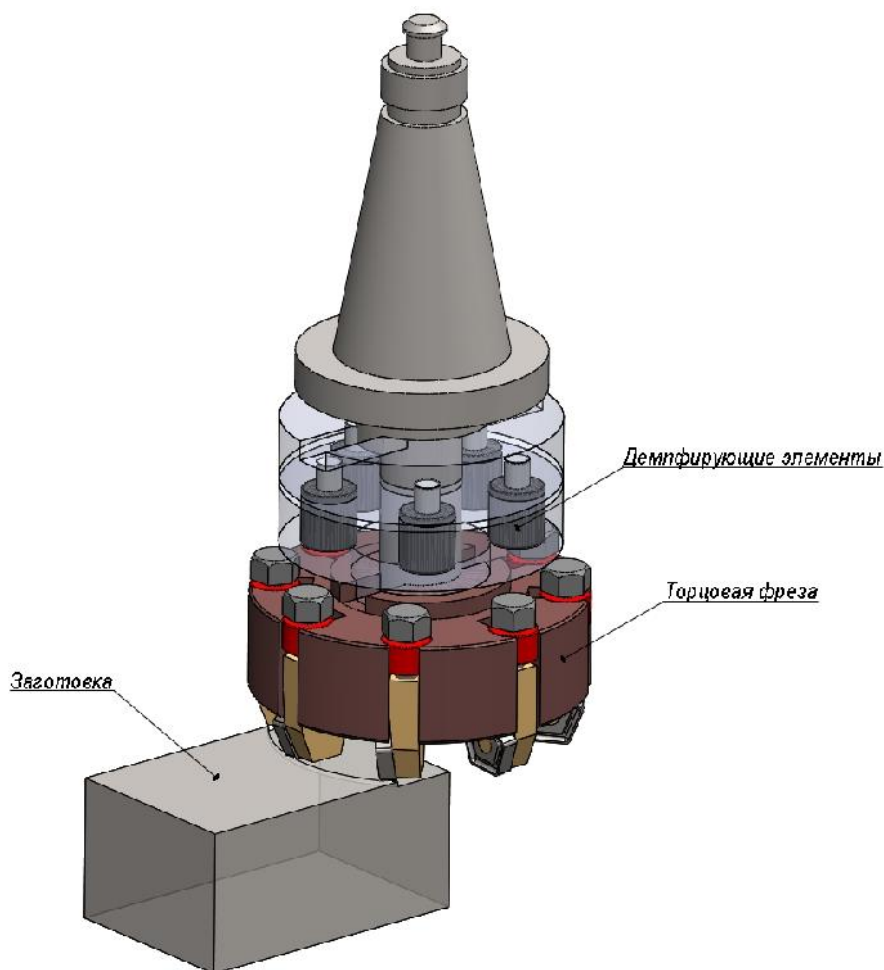


Рис. 1. Динамическая модель процесса резания стальной заготовки сборной торцовой фрезой с демпфирующими элементами

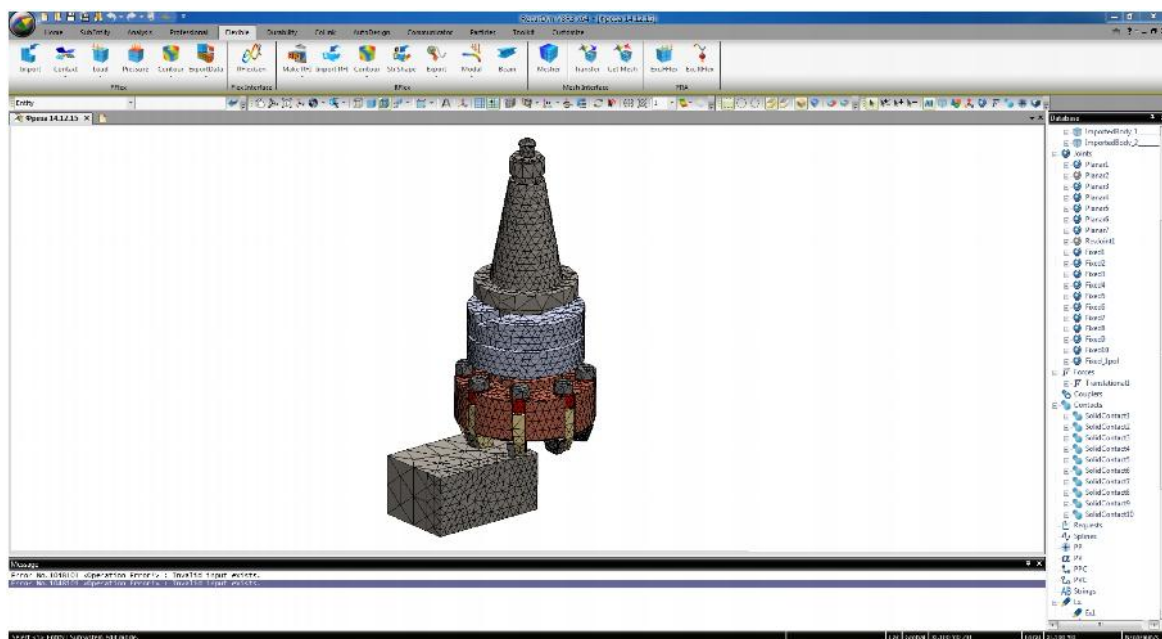


Рис. 2. Окно программы ResurDyn с импортированной твердотельной моделью торцовой фрезы при резании стальной заготовки



Рис. 3. Библиотека Force на ленте размещения блоков функций программы RecurDyn

Библиотека Joint содержит множество сочленений, обеспечивающих различные движения соединяемых тел технологической системы относительно друг друга (рис. 4) [1].



Рис. 4. Библиотека Joint на ленте размещения блоков функций программы RecurDyn

Исследования в блоке Analysis позволили смоделировать динамическое состояние сборной торцовой фрезы в процессе резания стальной заготовки заданных размеров и физико-механических свойств и провести динамический анализ для различных параметров режима фрезерования. При этом программное обеспечение RecurDyn, учитывая соединения между элементами, разрабатывает уравнения, связывающие реакцию со свойством материала, ограничением и нагрузкой. После этого программа RecurDyn упорядочивая уравнения в большую систему совместных алгебраических уравнений, находит неизвестные.

Результаты и обсуждение

Используя команду FRA (частотная характеристика), мы получили график амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) процесса торцового фрезерования стальной заготовки с заданными размерами и физико-механическими свойствами. На рисунке 5 показан пример сравнения АЧХ реальной и смоделированной технологических систем при торцовом фрезеровании.

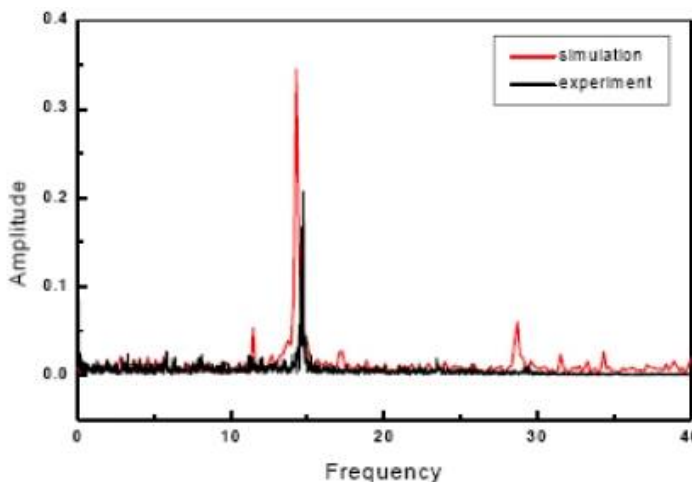


Рис.5. Сравнение АЧХ реальной и смоделированной технологических систем при торцовом фрезеровании

Выводы

Разработанная модель динамического процесса торцового фрезерования позволяет решать задачи: 1. оптимизации параметров режима резания по критериям качества обработанной поверхности; 2. прогнозирования колебаний элементов технологической системы для управления геометрическими параметрами поверхности детали; 3. прогнозирования микропрофиля поверхности детали в зависимости от геометрии режущего инструмента, режимов резания, физико-механических свойств материала инструмента и заготовки; 4. создания адаптивной системы управления процессом механической обработки на станках с ЧПУ, использующей экспресс-методику оценки операции механической обработки по технологическим критериям, реализованной на основе модели динамического процесса механической обработки.

Список литературы

1. Поддубный В.И., Поддубная М.Л. Разработка математических моделей механических систем с использованием прикладного пакета RecurDyn // Ползуновский вестник. – 2015. – № 1. – С. 56–60.
2. RecurDyn. Professional multi-body dynamics simulation software [Electronic resource]. – URL: http://www.functionbay.org/phocadownload/Whats_new_V8/RecurDyn%20Brochure%202015.pdf.
3. Nobuyuki Shimizu. RecurDyn for beginners: innovation for design & analysis. – FunctionBay, Inc., 2015.
4. Сулов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

THE DESIGN OF 3D MODEL OF DYNAMIC PROCESS OF CUTTING FACE MILLS IN THE APPLICATION RECURDYN

Poddubny V. I., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: poddubny@list.ru

Kryazhev J. A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kryazhev57@mail.ru

Gorin E. J., Ph.D. student, e-mail: evgenijgorin@gmail.com

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

Abstract

In this article we solve the problems of provision of stability of quality parameters of parts, which are produced by machining methods through the use of dynamic models that predict the technological parameters which are optimal and provide the stability of technological operation. To solve these problems the application program RECURDYN is used, which is widely used to create models of various mechanical systems, their analysis and design optimization, it uses the ideology of visual object-oriented programming and computer research of volume solid models of the cutting tool, billets and other elements of the technological system for prediction of voltage, deformations, natural vibration frequencies, the moment of inertia, the amplitude-frequency characteristics and other parameters, which are specific for the process of machining cutting. The use of application program RecurDyn allowed to model dynamic state of build-up face mill during the cutting of steel billet of specified size and physical-mechanical properties, and conduct the dynamic analysis of shavings formation process for various parameters of milling mode.

Keywords

Mill, face milling, modeling, dynamic state, the amplitude-frequency characteristics, application program RECURDYN

УДК 621.9.06:678.5

**КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ТОЧНОСТИ
ПРИ ОБРАБОТКЕ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ**

*А.М. МАРКОВ, доктор техн. наук, профессор
П.О. ЧЕРДАНЦЕВ, канд. техн. наук, ст. преподаватель
С.В. ГАЙСТ, аспирант
С.А. КАТАЕВА, магистрант
Е.Ю. ЛАПЕНКОВ, магистрант
(АлтГТУ, г. Барнаул)*

Лапенков Е.Ю. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: ewgenii018@mail.ru

На основе обобщения результатов информационного поиска предложена классификация способов управления точностью при механической обработке стеклопластиков, в частности при фрезеровании. Рассмотрены особенности обработки стеклопластиков, связанные с их физико-механическими свойствами: анизотропия, низкая теплопроводность, высокие упругие свойства, высокая твердость и абразивное воздействие на режущий инструмент. Указаны возможные виды брака. Рассмотренные при построении классификации технологические решения были проанализированы по возможности устранения таких видов погрешностей как недопустимая шероховатость, погрешности размеров, формы и расположения поверхностей, глубина дефектного слоя. Показано, что для принятия окончательного решения о возможности реализации того или иного способа обеспечения точности необходимо использовать методы математического моделирования процесса формирования погрешностей обработки, например, на основе компьютерных систем SolidWorks, ANSYS и др.

Ключевые слова: стеклопластики, способы управления точностью, классификация, погрешности.

Введение

В настоящее время использование композиционных материалов является перспективным направлением. Это связано с их малым весом, высокой коррозионной стойкостью, относительно высокой прочностью и хорошими теплоизоляционными свойствами.

Существующие технологии изготовления изделий из стеклопластиков не обеспечивают предъявляемые требования по точности размеров, формы и взаимного расположения, качеству поверхностей. Для обеспечения указанных показателей необходима дальнейшая механическая обработка, в частности фрезерование.

Такие факторы как анизотропия свойств данного материала, его низкая теплопроводность, высокие упругие свойства, высокая твердость и абразивное воздействие наполнителя затрудняют процесс механической обработки. Часто процесс фрезерования сопровождается появлением характерных дефектов поверхности (сколы, расслоения), возникновением дефектного слоя (прижоги, разрыхление), образованием

мелкодисперсной стружки, попадание которой в дыхательные пути вызывает различные заболевания [1].

В связи с этим при проектировании операций фрезерования стеклопластиков перед технологом стоит задача выбора (разработки) способов обеспечения заданных показателей точности и качества обработанных поверхностей с учетом особенности обработки и физико-механических свойств этих материалов.

Методика

В настоящее время в РФ и за рубежом накоплен определенный опыт управления процессом фрезерования стеклопластиков. Существующие методы различаются, как путем реализации, так и характером устраняемых погрешностей. Ниже приведены описание наиболее характерных технологических решений.

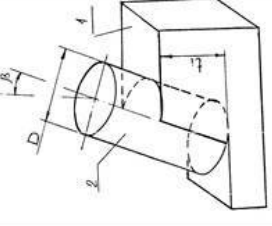
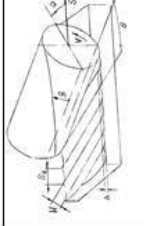
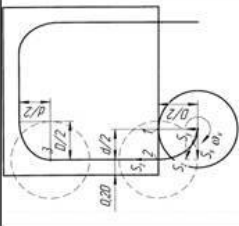
Способ фрезерования заготовок с переменным припуском [2] позволяет повысить точность формы и расположения поверхностей за счет стабилизации величины силы резания, это достигается путем обеспечения постоянства площади контакта фрезы и заготовки. При использовании способа чистового фрезерования [3] повышается качество поверхности, это достигается наклоном оси фрезы в сторону рабочего движения режущих кромок. Способ торцового фрезерования [4] плоских поверхностей позволяет увеличить стойкость фрезы, за счет чего уменьшаются погрешности размеров и дефекты поверхности, вызванные износом режущего инструмента. Стойкость фрезы повышается благодаря криволинейному движению врезания фрезы в заготовку. То же самое можно получить и при использовании прерывистого резания [7], что достигается за счет снижения теплонапряженности процесса резания. Осуществляется с помощью дополнительного устройства, передающего колебания в зону резания. Методом обработки композитов [6] решается проблема низкого качества поверхности и появления дефектов на поверхности отверстий в стеклопластиках. Так же эффективны такие методы, как способ резания с дополнительным технологическим покрытием (ДТП) [8] и метод резания с предразрушением срезаемого слоя [8], устраняющие все перечисленные погрешности. Метод с ДТП позволяет снизить отрицательное влияние образовавшегося ворса на процесс обработки. Способ с предразрушением срезаемого слоя хорош тем, что существенно повышает стойкость инструмента, что дает возможность существенно повысить точность обработки за счет уменьшения размерного износа инструмента.

В последнее время широко используется высокоскоростная обработка (ВСО) [5], она является перспективным направлением обработки стеклопластиков. Данный вид обработки с теоретической точки зрения имеет ряд преимуществ: снижается сила резания в некотором диапазоне скоростей, а также происходит перераспределение тепла в зоне резания. Это позволяет повысить производительность процесса и точность обрабатываемой детали.

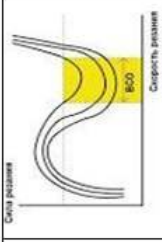
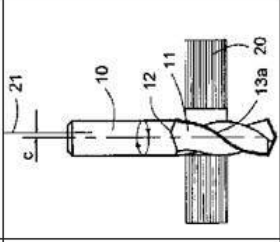
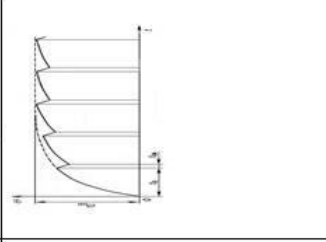
Как видно из описаний каждый из представленных способов позволяет управлять различными видами показателей качества обработки. Это дает возможность представить их в виде классификации, где в качестве классификационных признаков выбраны виды погрешностей: недопустимая шероховатость, погрешности размеров, формы и расположения поверхностей, дефектный слой (табл.).

Таблица

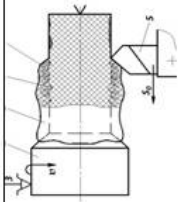
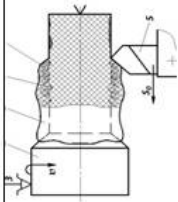
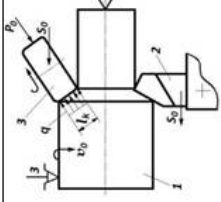
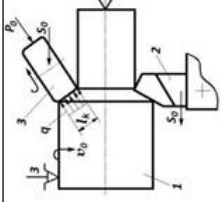
Классификация способов управления показателями точности

Технологические решения		Устраняемые погрешности						
№	Название	Схема	Описание	Лит.	Недопустимая шероховатость	Погрешность размеров	Погрешности формы и расположения	Дефектный слой
1	Способ фрезерования заготовок с переменным припуском		Сущность способа обработки заготовок с переменным припуском, заключается в перемещении концевой фрезы с постоянной подачей по траектории, эквидистантной обрабатываемой поверхности, при обработке участков поверхности с максимальным по величине припуском ось фрезы устанавливается перпендикулярно направлению подачи. При обработке остальных участков угол наклона оси концевой фрезы такой, что площадь контакта рабочей поверхности концевой фрезы и заготовки на данном участке была равна площади контакта рабочей поверхности концевой фрезы и заготовки на участке с максимальным припуском.	[2]		+		
2	Способ чистового фрезерования		Технический результат достигается тем, что при чистовом фрезеровании в сторону рабочего движения режущих кромок фрезы ее ось наклоняют к направлению фрезерования, в сторону выходных концов режущих кромок. При этом скорость фрезерования может быть увеличена с соответствующим уменьшением скорости рабочего движения кромок, уменьшен наклон кромок и увеличен угол наклона оси фрезы.	[3]	+			+
3	Способ торцового фрезерования плоских поверхностей		Способ может быть использован при фрезеровании плоских поверхностей. Фрезе сообщают главное вращательное движение и криволинейное врезание в заготовку с двумя движениями подачи S_x и S_y . Криволинейное врезание фрезы в заготовку осуществляют при согласовании подач S_x и S_y с обеспечением траектории врезания фрезы в виде четверти эллипса, большая ось которого равна диаметру фрезы, а меньшая определена из приведенной зависимости.	[4]		+		+

Продолжение таблицы

<p>ВСО</p>		<p>Высокоскоростная обработка (ВСО) резанием является прогрессивной и быстро развивающейся технологией обработки металлов. Сущность ВСО заключается в том, что скорость резания возрастает в 10 и более раз по сравнению с обычными режимами обработки данного материала. Скорость резания при ВСО составляет 500-5000 м/мин и более. Особенностью ВСО является снижение сил резания и перераспределения тепла в зоне резания. При небольших сечениях срезаемого слоя основная часть тепла остается в стружке, не успевая переходить в заготовку. Благодаря этому, при ВСО тепло более благоприятно распределяется в системе, чем при умеренных скоростях.</p>	<p>[5]</p>	<p>+</p>	<p>+</p>	<p>+</p>	<p>+</p>
<p>Метод обработки композитов</p>		<p>Способ получения отверстий или углублений в деталях из КМ, с использованием концевых фрез. Предварительно сверлится отверстие, затем поверхность обрабатывается КФ. Фрезе задается вращательное движение вокруг своей оси, и эксцентричное движение вокруг оси отверстия. Метод позволяет устранить дефекты на поверхности отверстия.</p>	<p>[6]</p>	<p>+</p>	<p>+</p>	<p>+</p>	<p>+</p>
<p>Прерывистое резание</p>		<p>Режущему инструменту или (и) заготовке дополнительным внешним источником энергии целенаправленно задают вынужденные колебания. Наиболее существенное повышение периода стойкости инструмента имеет место на режимах колебаний, обеспечивающих периодический выход инструмента, его режущих лезвий из зоны резания. За время холостого пробоя инструмента происходит охлаждение его рабочей части, отдых контактных поверхностей, обеспечивается беспрепятственный доступ смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) к режущим кромкам лезвия.</p>	<p>[7]</p>	<p>+</p>	<p>+</p>	<p>+</p>	<p>+</p>

Продолжение таблицы

7	<p>Способ резания с доп. техн. покрытием (ДТП)</p> 		<p>Сущность способа заключается в том, что при обработке поверхности заготовки в окончательный размер образовавшийся ворс связывают нанесением твердого технологического покрытия, которое затем удаляют при втором (окончательном) проходе инструмента в тот же размер. Механическая обработка образовавшегося покрытия на режимах тонкого точения позволяет получить шероховатость поверхности деталей $Ra = 0,5 \dots 1,25$ мкм, отклонение от круглости – 3...4 степени точности, высокоую точность размеров (6 – 7 качества), практически полностью исключает ворсистость обработанной поверхности.</p>	<p>[8]</p>	+	+	+	+
9	<p>Метод резания с преразруш. срезаемого слоя</p> 		<p>Метод позволяет при точении стекло- и углепластиков повысить период стойкости режущего инструмента до 3...10 раз и более. При этом может быть существенно повышена точность обработки деталей за счет уменьшения размерного износа инструмента. Сущность метода заключается в целенаправленном изменении энергетического состояния материала срезаемого слоя за счет предварительного его деформирования, которое осуществляется в процессе резания дополнительным устройством.</p>	[8]	+	+	+	+

Выводы

Наглядное представление способов управления точностью при фрезеровании стеклопластиков существенно облегчает для технолога выбор конкретного технологического решения на этапе проектирования технологической операции. Кроме того, классификация позволяет разрабатывать новые способы управления за счет комбинации отдельных элементов и признаков известных технологических решений, а также оценивать технологические решения на патентную чистоту. Она может быть использована при создании информационного обеспечения в системах автоматизированного проектирования технологических решений по обеспечению качества обработки изделий из стеклопластиков.

Окончательное решение о возможности принятия к реализации того или иного способа обеспечения точности может быть сделано на основе математического моделирования процесса обработки в системах SolidWorks, ANSYS и др.

Список литературы

1. Проектирование технологических операций обработки композиционных материалов на основе искусственных нейронных сетей / М.В. Доц, Е.Б. Бондарь, А.М. Марков, В.Б. Маркин // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1-1. – С. 81–84.
2. Патент 2107593 Российская Федерация, МПК В 23 С 3/00. Способ фрезерования заготовок с переменным припуском / А.М. Марков, Е.Н. Спиринов, А.А. Ситников, Е.Ю. Татаркин, Ю.В. Федоров. – № 96110049/02; заявл. 21.05.1996; опубл. 27.03.1998.
3. Патент 2137575 Российская Федерация, МПК В 23 С 3/00. Способ чистового фрезерования / С.Е. Бархатов. – № 96111269/02; заявл. 04.06.1996; опубл. 20.09.1999.
4. Патент 2498882 Российская Федерация, МПК В 23 С 3/00. Способ торцового фрезерования плоских поверхностей / С.К. Амбросимов, А.Н. Большаков, К.С. Амбросимов, К.И. Ноздрачев. – № 2012122904/02; заявл. 04.06.2012; опубл. 20.11.2013.
5. Высокоскоростная обработка [Электронный ресурс]. 2013. – URL: <http://www.delcam-ural.ru/cam/tehpodderjka> (дата обращения: 21.03.2016).
6. Patent 5,685,674 United States. Method of machining composites / Lennart Taquist, Uno Backman; publ. date 11.11.1997.
7. Ярославцев В.М., Назаров Н.Г. Оценка эффективности прерывистого резания на основе использования закономерностей изменения теплонапряженности процесса // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – № 10. – С. 35–42.
8. Ярославцев В.М. Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. – 77-30569/361759. – № 4. – С. 3–24.

CLASSIFICATION OF WAYS OF MANAGEMENT OF ACCURACY INDICATORS WHEN MACHINING OF FIBERGLASS

Markov A. M., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: andmarkov@inbox.ru

Cherdancev P. O., Ph.D. (Engineering), Senior Lecturer, e-mail: p004092@yandex.ru

Gayst S. V., Ph.D. student, e-mail: sergei_gaist@mail.ru

Kataeva S. A., Master's Degree student, e-mail: bysinka_sof@list.ru

Lapenkov E. Y., Master's Degree student, e-mail: ewgenii018@mail.ru

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038,
Russian Federation

Abstract

The classification features of ways of management of accuracy when machining of fiberglass. Ways analyzed on nature of elimination of errors. The most typical of ways are reflected in classification: way of milling of preparations with a variable allowance, High Speed Machining, Method of machining composites and others. The derived results can be used for designing technology operations of milling of parts made of fiberglass. These ways eliminate of errors: inadmissible roughness, errors of the sizes, forms and arrangements of surfaces, defective layer. It can be used for information support in systems of computer aided designed and manufacturing for management of accuracy when machining of fiberglass.

Keywords

Fibreglasses, ways of management of accuracy, a classification, a errors.

УДК 621.9

**РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ***Д.А. РЫЧКОВ, канд. техн. наук, доцент
(БрГУ, г. Братск)*

Рычков Д.А. – 665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40,
Братский государственный университет,
e-mail: dielektrik84@mail.ru

Представлены исследования параметров процесса резания полимерных композиционных материалов на примере фрезерования. Установлено, что для обработки армированных полимеров применяются твердые сплавы с высокой теплопроводностью и износостойкостью. Однако нет однозначных рекомендаций по режимам резания и геометрии режущей части инструмента. Эффективность обработки композитов оценивалась с точки зрения качества обработанной поверхности и мощности резания. Исследования показали, что твердосплавный инструмент интенсивно изнашивается при резании стеклотекстолита. С увеличением фаски износа по задней поверхности растет мощность резания. Также установлено, что увеличение режимов резания приводит к ухудшению качества обработки и увеличению мощности резания стеклотекстолита. По результатам исследований разработаны рекомендации по параметрам резания полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: композиционные материалы, режимы резания, фрезерование, шероховатость, мощность резания

Введение

Полимерные композиционные материалы широко распространены в разных отраслях промышленности: автомобилестроении, авиастроении, машиностроении, судостроении и т.п. Основными материалами для армирования полимеров являются стеклянные, борные и углеродные волокна или ткани. Эти армирующие компоненты являются высокопрочными и оказывают негативное воздействие на параметры процесса обработки. Существуют исследования, посвященные различным способам обработки материалов [1 – 5], среди которых распространенным является фрезерование. Основными проблемами являются низкая работоспособность режущего инструмента и сложность получения высокого качества обработанной поверхности [4].

Проблемам механической обработки композиционных материалов на полимерной основе посвящен ряд исследований, где выявлена специфика резания и даны рекомендации по назначению режимов резания, конструкции режущего инструмента, выбору оборудования и оснастки [5 – 7].

В научных трудах [5] авторами обозначены специфические особенности полимерных композиционных материалов, которые приводят к различию процесса их резания от конструкционных сталей и сплавов. При обработке стеклопластиков и углепластиков рекомендуется применять вольфрамкобальтовые твердые сплавы с высокой износостойкостью и теплопроводностью. Для чистовой обработки стеклопластиков эффективно применение алмазных резцов, однако существуют трудности в обеспечении необходимой геометрии режущей части ввиду хрупкости алмаза. Появляются новые

прогрессивные износостойкие материалы, которые могут использоваться в качестве режущей части инструментов [8, 9]

Авторы [6] рекомендуют не допускать превышения установленной величины износа режущего инструмента во избежание ухудшения качества обрабатываемой поверхности; не применять смазочно-охлаждающие жидкости, так как это может привести к понижению прочности материала; оборудовать станок пылеотсасывающими устройствами; применять режущий инструмент с высокой теплопроводностью.

Специфические особенности полимеров приводят к необходимости изменения технологических характеристик процесса фрезерования в отличие от аналогичной обработки конструкционных сталей и сплавов.

Существующие рекомендации по назначению геометрии режущей части фрез и режимов резания имеют весьма обширные диапазоны, которые в разных источниках отличаются. Так, авторы [5] рекомендуют устанавливать передний угол $\gamma = 5...8^\circ$ и задний угол $\alpha = 18...20^\circ$, при этом авторы [4] рекомендуют следующее: $\gamma = 20...25^\circ$ и $\alpha = 10...12^\circ$, а в ОСТ 5.9569-74 даны рекомендации для фрез с пластинками из твердого сплава для установки $\gamma = 5...10^\circ$ и $\alpha = 20...30^\circ$. Согласно общемашиностроительным нормативам обработки полимерных композиционных материалов геометрия режущей части должна находиться в пределах $\gamma = 5...8^\circ$ и $\alpha = 16...18^\circ$.

Режимы резания при фрезеровании полимерных композитов выбираются в зависимости от требований шероховатости поверхности, производительности обработки и стойкости инструмента. Литературные источники [4 – 6] позволяют выбрать оптимальные режимы резания полимеров. Однако номенклатура обрабатываемых и инструментальных материалов весьма ограничена.

Таким образом, поиск рациональных параметров процесса фрезерования полимерных композиционных материалов является актуальной проблемой для промышленности. Целью исследования является повышение эффективности обработки полимерных композиционных материалов твердосплавным инструментом за счет установления рациональных режимов фрезерования.

Методика экспериментального исследования

Для оценки эффективности фрезерования выбраны следующие параметры:

1. Качество обработанной поверхности стеклотекстолита, которое оценивалось величиной шероховатости R_a . Она измерялась с помощью комплекса для изучения топографии поверхности *Zygo NewViewTM 7300*;

2. Мощность резания фиксировалась в процессе обработки композиционных материалов на измерительном приборе K506.

Для исследований применялась сборная фреза, которая имеет угол заострения $\beta = 55^\circ$, передний угол $\gamma = 25^\circ$ и задний угол $\alpha = 10^\circ$. [10 – 12]

В качестве инструментальных материалов выбраны вольфрамкобальтовые и безвольфрамовые твердые сплавы марок ВК8, ВК3М и ВК15 поскольку они имеют достаточно высокую теплопроводность, прочность, теплостойкость и твердость, широко применяются в промышленности и рекомендуются для обработки высокопрочных композиционных материалов.

Одним из перспективных и высокопрочных полимерных композиционных материалов являются стеклотекстолиты, среди которых можно выделить следующие марки: СТЭФ, СТЭФ-1, СТЭФ-У, СТЭБ, СТТ, СТ-ЭТФ и др. Для исследования был выбран стеклотекстолит марки СТЭФ-1, поскольку он труднее поддается обработке резанием [13],

имеет более мелкочаеистую структуру, что позволяет уменьшить ворсистость и получить детали мелких размеров.

Режимы обработки находились в следующих пределах: скорость резания $V = 45 \dots 48$ м/с, $S_0 = 1,0 \dots 2,0$ м/мин (при количестве рабочих зубьев фрезы $z = 1$ при данной скорости получим подачу на зуб $S_z = 0,17 \dots 0,33$ мм/зуб); глубина резания $t = 0,5 \dots 1,5$ мм.

Результаты и обсуждение

Одним из факторов, влияющих на качество обработанной поверхности стекловолоконистых композиционных материалов является износ инструмента.

График (рис. 1) показывает, что уже после двух минут фрезерования размер фаски износа приобретает высокое значение, характеризующее время приработки инструмента, а затем увеличивается с меньшей интенсивностью.

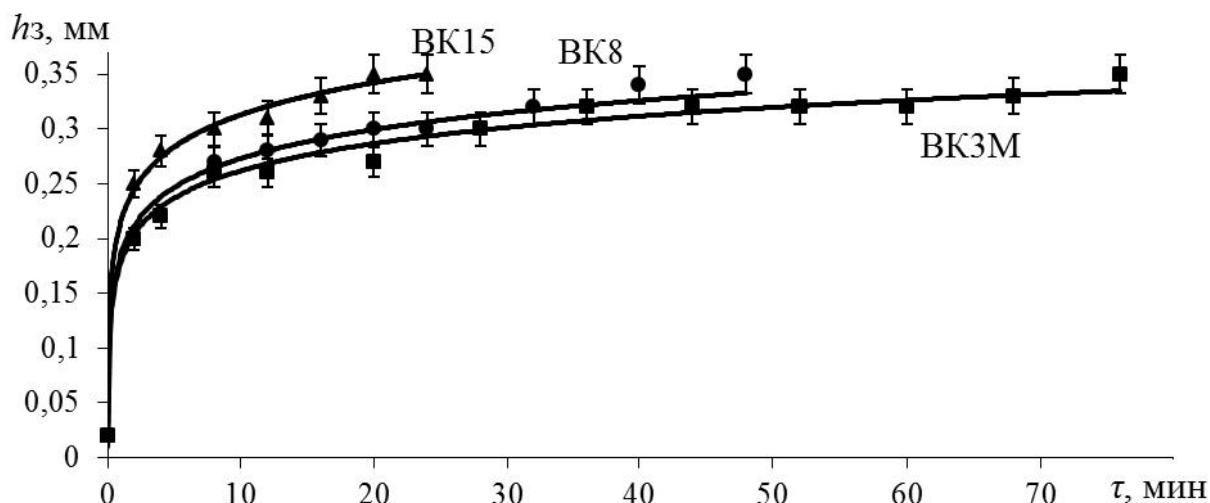


Рис. 1. Зависимость изменения фаски износа по задней поверхности от времени обработки при $S_z = 0,17$ мм/зуб и $t = 0,5$ мм

Период приработки инструмента, характеризующийся интенсивным износом режущей кромки, составляет от 2 до 5 минут в зависимости от применяемого твердого сплава. Далее следует период равномерного износа инструмента, продолжительность которого различна для исследуемых инструментальных материалов. Сплав ВК15 при данных условиях обработки выходит из зоны приработки, практически достигая предела, при котором работа данным инструментом должна быть прекращена в связи с неудовлетворительным качеством обработанной поверхности и возрастанием энергетических затрат. Для сплавов ВК8 и ВК3М период приработки составил порядка 2 минут с величиной фаски износа по задней поверхности равной 0,15 и 0,2 мм соответственно.

Оценка качества поверхности композиционного материала после фрезерования на различных режимах резания оценено по параметру шероховатости R_a с помощью топографии поверхности на примере твердого сплава ВК3М.

Графики зависимости шероховатости R_a от подачи и глубины резания (рис. 2) показывают, что R_a растет с увеличением режимов резания и в условиях полужесткой обработки может составлять менее 3 мкм.

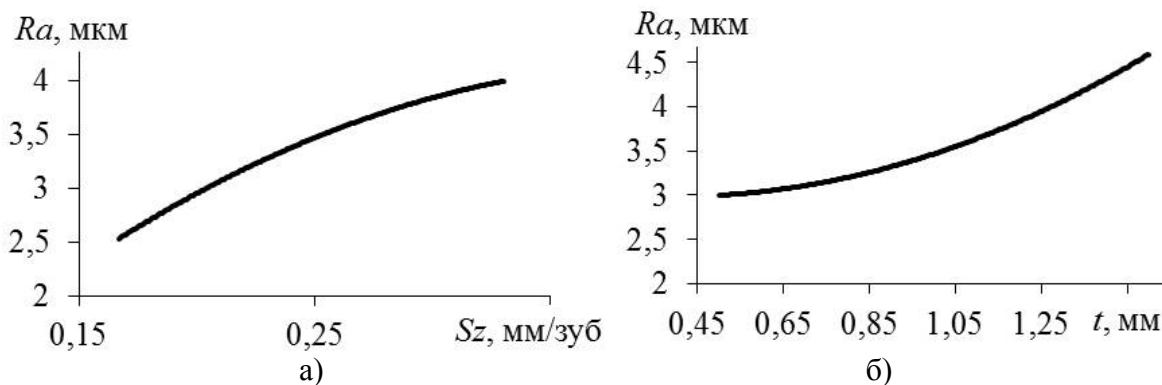


Рис. 2. Зависимости шероховатости R_a от: а) подачи на зуб при $t = 1$ мм; б) глубины резания при $S_z = 0,25$ мм/зуб

Мощность при фрезеровании стеклотекстолита в зависимости от роста фаски износа h_3 по задней поверхности с 0,01 до 0,35 мм увеличилась на 0,15...0,18 кВт (рис. 3), что свидетельствует о возрастании сил резания. Это объясняется тем, что при образовании фаски износа по задней поверхности, связанной с износом режущего инструмента, увеличивается сила трения, оказывающая сопротивление резанию. С течением времени обработки величина износа растет и вызывает дополнительные затраты энергии для преодоления трения (рис. 4).

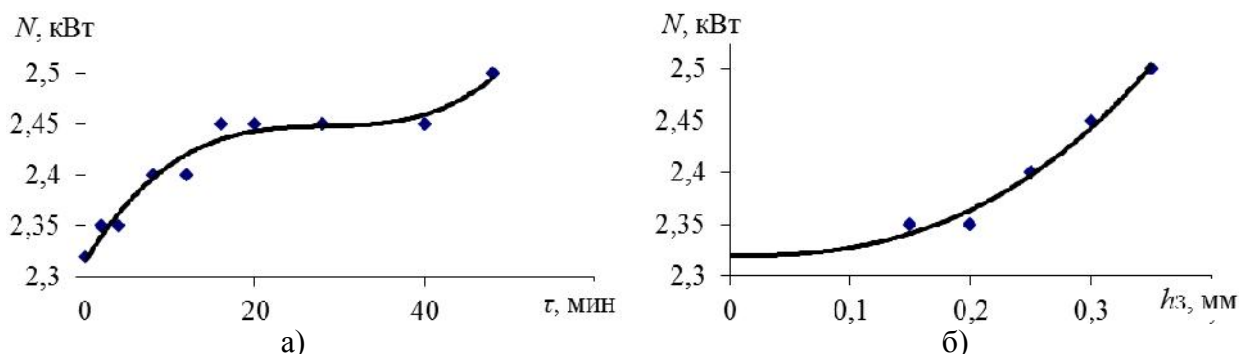


Рис. 3. Зависимость мощности резания от времени обработки (а) и величины фаски износа по задней поверхности инструмента (б)

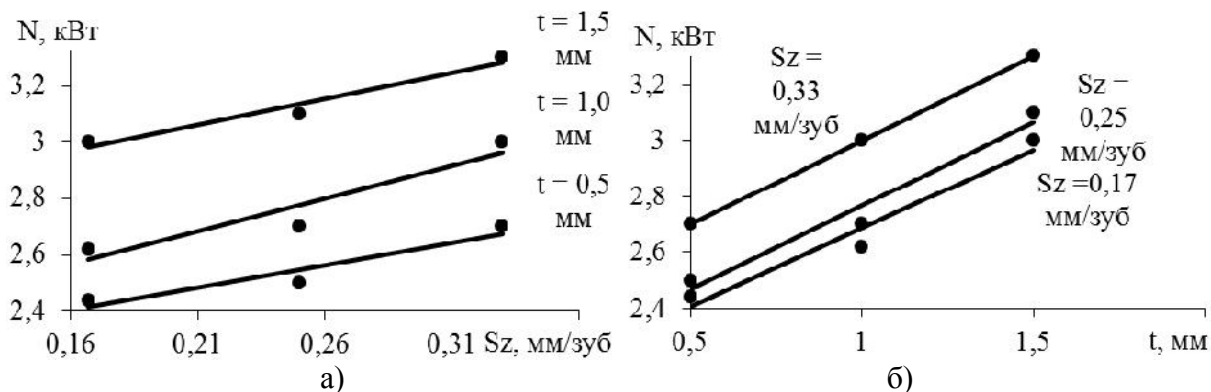


Рис. 4. Зависимость мощности резания от подачи на зуб инструмента (а) и глубины резания (б)

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы и рекомендации по обработке полимерных композиционных материалов:

1. Армированные полимерные композиционные материалы широко применяются в различных отраслях промышленности, однако существуют проблемы при их резании;
2. Рекомендации по режимам резания и геометрии режущей части неоднозначны и имеют широкий диапазон значений;
3. В литературе нет исследований мощности резания при обработке армированных полимеров;
4. Для получения гарантированного качества обработанной поверхности и незначительных затрат мощности рекомендуется устанавливать следующие режимы резания: $t = 1,0 \dots 1,2$ мм; $S_z = 0,25 \dots 0,26$ мм/зуб. Износ должен составлять не более $h_3 = 0,35$ мм.

Список литературы

1. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeebe, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2015. – Vol. 30, iss. 12. – P. 1408–1411. – doi: 10.1080/10426914.2014.973595.
2. Skeebe V., Ivancivsky V., Pushnin V. Numerical modeling of steel surface hardening in the process of high energy heating by high frequency currents // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698. – P. 288–293. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.288.
3. Perspective of high energy heating implementation for steel surface saturation with carbon / N. Plotnikova, A. Losinskaya, V. Skeebe, E. Nikitenko // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698. – P. 351–354.
4. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 296 с.
5. Баранчиков В.И., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Обработка специальных материалов в машиностроении: справочник. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с. – (Библиотека технолога).
6. Мордвин М.А., Якимов С.В., Баклушин С.М. Рекомендации по механической обработке композиционных материалов // *Вестник Ижевского государственного технического университета*. – 2010. – № 2. – С. 26–29.
7. Особенности фрезерования полимерных композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Д.В. Лобанов, Е.В. Ткаченко, Н.А. Ткаченко // *Системы. Методы. Технологии*. – 2013. – № 2. – С. 88–90.
8. Керамические нанокompозиты на основе диборида циркония / Е.Г. Скрипняк, Д.В. Лобанов, В.В. Скрипняк, А.С. Янюшкин, В.А. Скрипняк, Д.А. Рычков // *Системы. Методы. Технологии*. – 2011. – № 10. – С. 95–98.
9. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Ковалевский С.В. Повышение качества подготовки твердосплавного инструмента // *Системы. Методы. Технологии*. – 2009. – № 1. – С. 95–98.
10. Новые конструктивные решения сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков, А.М. Кузнецов // *Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки*. – 2013. – Т. 1. – С. 153–157.
11. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Анализ конструктивных решений фрезерного сборного инструмента для обработки композиционных материалов // *Технология машиностроения*. – 2011. – № 5. – С. 20–25.

12. Шлифовальный инструмент на основе силикокарбида титана / Г.И. Смагин, В.Н. Филимоненко, Н.Д. Яковлев, М.А. Корчагин, В.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 1. – С. 27–30.

13. *Yuanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V.* Surface quality of the fiberglass composite material after milling // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 682. – P. 183–187.

RATIONALIZATION OF MILLING PARAMETERS OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Rychkov D. A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: dielektrik84@mail.ru

Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

Abstract

Presented the study parameters of the cutting process of polymeric composite materials on the example of milling. It is found that for processing reinforced polymers used hard metals with high thermal conductivity and wear resistance. However, no definitive recommendations on cutting conditions and the geometry of the cutting tool. Composites processing efficiency estimated in terms of the quality of the machined surface and cutting power. Studies have shown that carbide tool wear rapidly when cutting fiberglass. With increasing wear of the chamfer on the rear surface of the cutting power increases. It is also found that an increase in the mode of cutting leads to a deterioration in the quality of treatment and increase the capacity of fiberglass cutting. According to the research recommendations on the cutting parameters of polymer composite materials.

Keywords

composite materials, cutting conditions, milling, roughness, cutting power

УДК 621.9 (045)

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ФОНДА ЭВРИСТИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ**

*А.М. ФИРСОВ¹, канд. техн. наук, доцент
Е.Ю. ТАТАРКИН², доктор техн. наук, профессор
В.А. КАЛИСТРУ¹, аспирант
(¹ БТИ АлтГТУ, г. Бийск, ² АлтГТУ, г. Барнаул)*

Фирсов А.М. – 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27,
Бийский технологический институт
(филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова,
e-mail: mrsi@bti.secna.ru

В статье приведена методика проектирования технологического процесса с применением фонда эвристических приемов. Эта методика, по мнению авторов, позволяет ускорить процесс проектирования и устранить недостатки на этапе проектирования. Также в статье приведен пример применения предлагаемой методики для совершенствования технологической операции растачивания базового отверстия корпусной детали. Используя фонд эвристических приемов предложены технологические решения, позволяющие разработать средства оснащения технологической операции, защищенные патентами и позволяющие устранить недостатки.

Ключевые слова: Технологический процесс, фонд эвристических приемов, методика проектирования, базовые отверстия, нестабильная шероховатость, технологические решения.

Введение

Современное машиностроительное производство характеризуется широкой номенклатурой выпускаемой продукции, что требует непрерывного проектирования новых технологических процессов (ТП), оснастки, инструмента и других средств оснащения. При проектировании, обычно, основываются на известных типовых решениях, которые изложены в нормативно-справочной литературе. Однако эти решения не всегда позволяют получить требуемый результат и тогда необходима отладка, доводка ТП, что значительно увеличивает сроки выпуска продукции и снижает конкурентоспособность предприятия. С целью сокращения сроков выпуска продукции необходимо при проектировании применять творческие методы, например, метод эвристических приемов [1, 2]. Этот метод объединяет в доступной форме опыт многих проектировщиков и исследователей. Однако несмотря на определенную известность этого метода он не находит широкого применения при проектировании ТП. В настоящей статье изложена методика применения метода эвристических приемов для проектирования ТП и приведен пример реализации этой методики для совершенствования ТП обработки базового отверстия корпусной детали.

Теория

При проектировании ТП перед технологом ставится ряд задач, которые он обычно путем логического анализа и синтеза пытается решить. При этом он опирается на

собственный опыт, на типовые решения, описанные в справочной литературе, т.е. он идет по пути «проб и ошибок» и тем самым приобретает новые знания. Так технолог формирует набор способов, правил которые позволяют ему в дальнейшем решать все более сложные технологические задачи. Такие способы, правила, приемы, которые позволяют найти решение на поставленные задачи, объединяются в фонды эвристических приемов (ФЭП).

При проектировании ТП возможно применение межотраслевого или специализированного ФЭП [1]. Межотраслевой ФЭП имеет универсальный характер и может быть использован в разных областях производства. Независимо от вида ФЭП при проектировании необходимо выполнить ряд последовательных этапов.

1. Предварительно сформулировать задачу. При этом следует выполнить ряд действий: а – описать проблемную ситуацию (в чем состоит проблемная ситуация, что требуется сделать для устранения проблемной ситуации, что мешает устранению проблемной ситуации, что дает решение задачи); б – описать функцию (назначение) ТП, операции, перехода (вначале дается качественное, а затем количественное описание функции) ; в – выбор прототипа и составление списка требований (в качестве прототипа возможно взять объект подлежащей усовершенствованию, список основных требований составляют в зависимости от уровня описания объекта, количественное описание объекта со списком основных требований представляет техническое задание на проектирование); г – составление списка недостатков прототипа (необходимо стремиться выявить все недостатки прототипа, которые могут быть устранены при проектировании, список недостатков необходимо упорядочить по степени важности); д – на основании вышеизложенного сформулировать задачу на проектирование.

2. Выбор подходящих эвристических приемом из имеющего фонда. Исходной информацией для этого являются: прототип, который требуется улучшить; главный недостаток прототипа; главное противоречие прототипа.

3. Преобразование прототипа с помощью выбранных приемов фонда и фиксация идеи улучшенного технологического или технического решения в виде описания или схемы. При этом может быть использовано несколько эвристических приемов. В результате чего может быть получено множество улучшенных решений. В случае если не удастся получить удовлетворительного решения, то рекомендуется наиболее перспективный из найденных вариантов принять за прототип и повторить его обработку с помощью подходящего приема.

4. Преобразование прототипа проводится по всем выявленным недостаткам, в результате получают множество улучшенных допустимых решений.

5. Для найденных технологических или технических решений проводится анализ их совместимости со смежными и вышестоящими по иерархии техническими объектами. Выявляются какие отрицательные или положительные последствия принесет новое решение с вышестоящими и смежными техническими объектами. Для особо перспективных вариантов делаются попытки устранить недопустимые отрицательные последствия.

6. Технологические или технические решения, полученные в результате преобразования прототипа и направленные на его улучшение необходимо оценить при помощи критериев, которые включают известные четыре группы критериев: функциональные; технологические; экономические; антропологические [1].

7. Технологические решения, которые позволяют устранить недостатки ТП должны быть занесены в информационный фонд технологических или технических решений, позволяющих обеспечить требуемые выходные параметры ТП при обработке конструкторско-технологических модулей различных деталей.

Результаты и обсуждение

Предложенная методика, основанная на применении фонда эвристических приемов, использована для совершенствования ТП процесса обработки базового отверстия корпусной детали. Заготовка корпусной детали из алюминиевого сплава АК12, получена литьем под давлением, имеет тонкие разной толщины стенки. Обработка заготовки выполняется на токарном станке с ЧПУ мод. 16К20Ф3, расточным резцом, оснащенным твердым сплавом ВК6. Обработка производилась на режимах, принятых по нормативам [3]. При растачивании базового отверстия возникла проблема в виде нестабильной шероховатости как у одной заготовки, так и в партии. На основе анализа причин нестабильной шероховатости было установлено, что переменная толщина стенок базового отверстия в продольном и в поперечном сечениях приводит к тому, что во время получения заготовок литьем под давлением, при охлаждении заготовок, скорость кристаллизации разного объема металла будет разной. В результате этого структура, а, следовательно, и физико-механические свойства поверхности заготовки базового отверстия будут разные, что и приводит к формированию нестабильной шероховатости. Используя межотраслевой фонд эвристических приемов, приведенный в работе [1] были выбраны приемы, которые, по мнению авторов, позволят устранить отмеченные недостатки технологической операции. В таблице 1 приведены выбранные приемы и варианты технологических решений, которые позволят устранить отмеченный недостаток.

Таблица 1

Варианты технологических решений, полученных помощью фонда эвристических приемов

Выявленный недостаток	Эвристический прием	Варианты технологических решений
1	2	3
Нестабильная шероховатость	1.Изменить действие рабочей силы или среды во время обработки	ТР1– Изменять режимы обработки ТР2–Подбирать геометрию обрабатываемого инструмента
	2.Изменить поверхностные свойства объекта; упрочнить поверхность	ТР3–Провести термическую, механическую или другую обработку, стабилизирующую физико-механические свойства поверхности детали
	3.Заменить механическую обработку способом обработки без снятия стружки	ТР4–Применить методы поверхностно-пластического деформирования (ППД): выглаживание, раскатывание, дорнование и т.п.
	4.Совместить технологические процессы, операции	ТР5–Применить комбинированную обработку

Как видно устранение недостатка может быть выполнено с помощью разных эвристических приемов и каждый прием дает возможность реализовать одно или несколько технологических решений (ТР). Технологические решения ТР1 и ТР2 возможно реализовать при незначительном различии физико-механических свойств обрабатываемой поверхности. Если колебания свойств значительно, то эти ТР не дают должного результата и требуют непрерывной корректировки условий обработки. Стабилизация свойств поверхности

возможна перед обработкой (ТР3) и во время обработки (ТР4, ТР5). Термические или другие методы обработки, позволяющие стабилизировать свойства обрабатываемой поверхности перед обработкой, возможно, применять при условии, если материал, конструкция, размеры заготовки или другие условия позволяют это выполнить. В данной работе предлагаются технические решения, которые реализуют ТР4 и ТР5. Поверхностно-пластическое деформирование (ППД) поверхности (ТР4), предлагается производить инструментом с одиночным деформирующим элементом, что расширяет технологические возможности ППД и позволяют обрабатывать разные размеры отверстий с широким диапазоном свойств поверхности.

Реализация ТР5 производилась исходя из того, что достижение требуемой точности при обработке отверстий корпусных деталей возможно как растачиванием, так и ППД. А так как обработка ППД позволяет достичь требуемых параметров качества за более короткий цикл, было принято решение разработать комбинированный метод, объединяющий лезвийную обработку и ППД. Совмещение обработки резанием и ППД с использованием особенностей и достоинств той и другой – одно из основных направлений совершенствования металлообработки как в отношении сокращения цикла обработки и повышения производительности труда, так и повышения качества обрабатываемых деталей.

Применение комбинированных методов требует разработки новых подходов в проектировании операций: при определении структуры операции; при выборе оборудования; инструмента; режимов обработки. В зависимости от размеров и конструкции отверстия (сквозное, глухое, прерывистое и другие признаки) обработка может осуществляться последовательно (резание → ППД) или параллельно (резание +ППД).

Реализация комбинированного метода, требует особого инструмента, который бы обеспечивал требуемое качество при растачивании и при ППД. На основе поискового проектирования разработаны способ и комбинированные инструменты, которые удовлетворяют поставленным требованиям [4–7]. Таким образом, предложенная методика проектирования ТП с использованием фонда эвристических приемов, позволяет ускорить поиск технологических решений, обеспечивающих требуемые выходные параметры.

Выводы

Авторами предложена методика проектирования ТП с использованием фонда эвристических приемов. Эта методика позволяет ускорить поиск технологических или технических решений, позволяющих достичь желаемых результатов на стадии проектирования ТП. Приведенный пример, по обеспечению стабильности шероховатости поверхности базового отверстия, показывает, что данная методика может успешно применяться для совершенствования, а также и для проектирования ТП.

Список литературы

1. *Половинкин А.И.* Основы инженерного творчества: учебное пособие для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
2. *Мушталь В.И., Токарев В.Е.* Основы инженерного творчества: учебное пособие для вузов. – М.: Дрофа, 2005. – 254 с.
3. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: справочник / под ред. В.И. Гузеева. – М.: Машиностроение, 2005. – 368 с.

4. Патент 2293012 Российская Федерация. Комбинированный способ обработки отверстий и устройство для его осуществления / В.Н. Беляев, А.М. Фирсов. – Заявл. 21.04.2005; опубл. 10.02.2007.

5. Патент на полезную модель RU № 50458. Комбинированный инструмент для резания и поверхностно-пластического деформирования / В.Н. Беляев, Ф.И. Ризинков, А.М. Фирсов. – Заявл. 14.04.2005; опубл. 20.01.2006.

6. Патент на полезную модель RU № 53612. Комбинированный инструмент для обработки отверстий / В.Н. Беляев, Ф.И. Ризинков, А.М. Фирсов. – Заявл. 14.04.2005; опубл. 27.05.2006.

7. Патент на полезную модель RU № 66264. Инструмент для совмещенного резания и поверхностно-пластического деформирования / В.Н. Беляев, Е.Н. Беляев, А.В. Беккер, А.М. Фирсов. – Заявл. 20.04.2007; опубл. 10.09.2007.

DESIGNING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES BY USING THE FOUNDATION OF HEURISTIC TECHNIQUES

Firsov A. M.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: mrsi@bti.secna.ru

Tatarkin E. Yu.², D. Sc. (Engineering), Professor, e-mail: etatarkin@mail.ru

Kalistru V. A.¹, Ph.D. student, e-mail: mrsi@bti.secna.ru

¹Biysk Technological Institute, Branch of Polzunov Altai State Technical University, 27 Trafimova st., Biysk, Altai region, 659305, Russian Federation

²I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenin Prospekt, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

Abstract

In the article the technique of designing of technological process with application of the Foundation of heuristic techniques. This technique, according to authors, allows to accelerate the design process and eliminate defects at the design stage. The article also provides an example of applying the proposed method to improve manufacturing operation of boring a base hole of a body part. Using the Foundation of heuristic techniques we proposed technological solutions to develop means of equipping a technological operation that are protected by patents and to eliminate deficiencies.

Keywords

the technological process, the foundation of heuristic techniques, the design procedure, base hole, unstable roughness, technological solutions

УДК 621.787:621.91

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЫ ТРЕНИЯ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ
УПРОЧНЯЮЩЕ-ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКЕ**

В.П. ГИЛЕТА, канд. техн. наук, доцент
А.И. БЕЗНЕДЕЛЬНЫЙ, канд. техн. наук, доцент
В.Б. АСАНОВ, канд. техн. наук, доцент
(НГТУ, г. Новосибирск)

Гилета В.П. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: gileta.viktor@yandex.ru

Исследовано влияние колебаний инструмента с ультразвуковой частотой на силы трения при различных условиях и режимах поверхностного пластического деформирования. Эксперименты проводились на специализированном стенде, состоящем из токарного станка модели 1К62, ультразвукового генератора УЗГ3-4 с магнитострикционным преобразователем, устройств нагружения, снятия и регистрации сигнала. Образцы изготавливались из стали ШХ15СГ. Ультразвуковой инструмент оснащался деформатором из твердого сплава ВК8. Исследованиями установлено, что наложение на деформатор ультразвуковых колебаний при поверхностном пластическом деформировании значительно снижает силы трения, как в условиях смазки, так и в условиях сухого трения. Варьирование режимов обработки вызывает изменение силы трения. Увеличение амплитуды колебаний инструмента приводит к уменьшению силы трения, а увеличение статической нагрузки – к ее росту. Влияние скорости относительного скольжения на силу трения неоднозначно.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование ультразвуковым инструментом (УЗО), деформатор, сила трения, смазка, статическая нагрузка, скорость, амплитуда.

Введение

Упрочняюще-чистовая обработка ультразвуковым инструментом (УЗО) широко используется для повышения износостойкости, усталостной прочности, контактной жесткости и других эксплуатационных свойств деталей машин и инструментов [1-12].

Среди многих факторов, влияющих на качество поверхностного слоя при УЗО, существенную роль играют силы трения в зоне взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности. Эти силы во многом определяют назначение режимов обработки при этом методе.

Поэтому, целью настоящей работы было изучение влияния режимов УЗО на изменение силы трения в зоне взаимодействия инструмента с поверхностью обрабатываемой детали.

Изменение сил трения в условиях колебательного воздействия экспериментально установлено в ряде работ [13, 14]. Однако почти все имеющиеся данные об изменении сил трения относятся к узкому диапазону скоростей, относительного скольжения и амплитуд колебаний, существенно отличающихся от применяемых при УЗО.

На сегодняшний день силы трения при УЗО недостаточно изучены и требуют проведения дальнейших исследований.

Материалы, оборудование и методика экспериментального исследования

Эксперименты проводились на стенде (рис. 1), состоящем из токарного станка модели 1К62, ультразвукового генератора УЗГЗ-4 с магнитострикционным преобразователем, устройства нагружения и регистрационной аппаратуры, состоящей из усилителя ТА-5 и самопишущего потенциометра КСП-4. Первичными преобразователями сигналов являлись проволочные тензодатчики, наклеенные на балку равного сопротивления. Тензосистема предварительно тарировалась образцовыми грузами.

Образцами для исследований служили цилиндрические кольца диаметром 150 мм из стали ШХ 15СГ с твердостью HRC₃ 60...62, предварительно обработанные шлифованием до шероховатости Ra 1,25...0,63 мкм. Контролем для образцов служил деформатор из твердого сплава ВК 8, которым оснащался ультразвуковой инструмент. Рабочая часть деформатора выполнялась в виде сферы радиусом 5 мм [15].



Рис. 1. Стенд для измерения силы трения при ультразвуковой упрочняюще-чистовой обработке

Влияние колебаний на трение инструмента с обрабатываемой поверхностью изучалось по сравнению с обработкой без наложения на деформатор ультразвуковых колебаний.

Силы трения определялись при изменении статической нагрузки ($P_{ст} = 200...700$ Н), скорости обработки ($V = 20...200$ м/мин), амплитуды колебаний инструмента ($2A = 20...60$ мкм) при постоянной частоте колебаний $f = 18$ кГц, и подачи инструмента $S = 0,07$ мм/об в условиях смазки (масло «Индустриальное 45») [16] и сухого трения.

Результаты и обсуждение

Проведенные опыты показали, что сила трения деформатора с деталью величина не постоянная. В исследуемой области факторного пространства на графических зависимостях наблюдаются две зоны: первая - зона возрастания и вторая - зона убывания силы трения, что свидетельствует о существенном изменении условий контактного взаимодействия при варьировании режимов обработки.

Во всем исследованном диапазоне скоростей относительного скольжения и статических усилий, увеличение амплитуды колебаний приводит к снижению силы трения. Однако интенсивность этого снижения различна для вышеупомянутых зон. Если увеличение двойной амплитуды с 20 до 40 мкм в первой зоне приводит к снижению силы трения на 40-50 % при $P_{ст} = 200$ Н, то во второй зоне - на 5-8%. Изменение размаха колебаний с 20 до 60 мкм смещает границу зон сил трения в область более высоких скоростей, в частности с 60 до 100 м/мин (рис. 2).



Рис. 2. Зависимость силы трения от двойной амплитуды колебаний (2А) и статической нагрузки ($P_{ст}$) и при различных скоростях обработки:
1 – $P_{ст} = 200$ Н; 2А = 20 мкм; 2 – $P_{ст} = 400$ Н; 2А = 20 мкм;
3 – $P_{ст} = 200$ Н; 2А = 60 мкм; 4 – $P_{ст} = 400$ Н; 2А = 60 мкм

Статическое усилие прижима, в выбранном диапазоне нагрузок, не оказывает влияния на положения максимумов кривых $P_v = f(V)$ (рис. 3). Положение максимума силы трения сохраняется в интервале скоростей 60...80 м/мин при изменении статической нагрузки с 200 Н до 700 Н. Увеличение статической нагрузки приводит к почти пропорциональному увеличению силы трения на обоих участках.

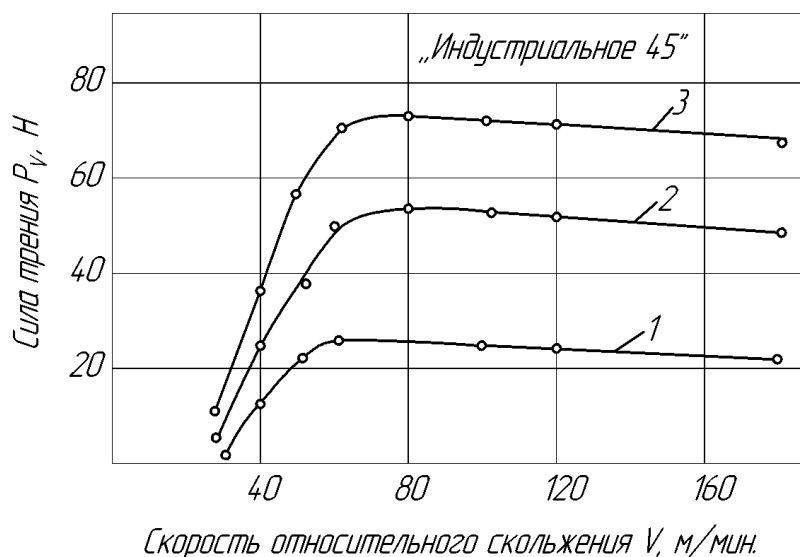


Рис. 3. Зависимость силы трения от статической нагрузки (2А = 40 мкм, $S = 0,07$ мм/об) при различных скоростях обработки:
1 – $P_{ст} = 200$ Н; 2 – $P_{ст} = 400$ Н; 3 – $P_{ст} = 700$ Н

Анализ кривых, представленных на рис. 4, показал, что наложение колебаний на инструмент снижает силу трения, как в условиях смазки, так и без, особенно в интервале скоростей до 70 м/мин. Для реализации сухого трения поверхности образца и инструмента обезжиривались бензином «калоша» и этиловым спиртом.

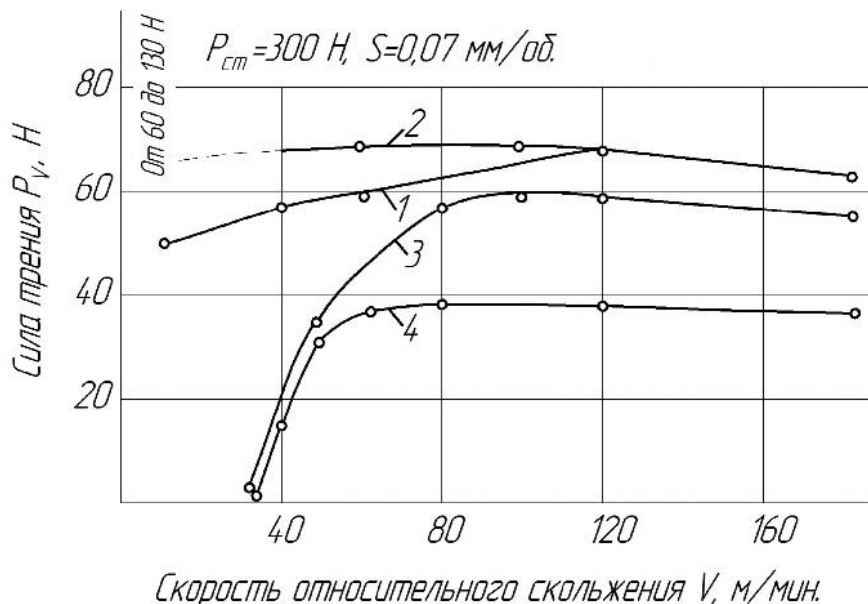


Рис. 4. Зависимость силы трения от условий контактного взаимодействия и смазки: 1, 2 – без колебаний инструмента (деформатора); 3, 4 с ультразвуковыми колебаниями инструмента ($2A = 40$ мкм); 2, 3 – без смазки; 1, 4 – со смазкой («Индустриальное 45»)

Представляет интерес изучение влияния направления ввода колебаний на силу трения. Проведенными опытами с наклоном инструмента в направлении подачи установлено, что зависимости $P_v = f(V, P_{ст}, 2A)$ сохраняются, но наблюдается незначительные смещения максимума сил трения в сторону меньших скоростей относительного скольжения (рис. 5).

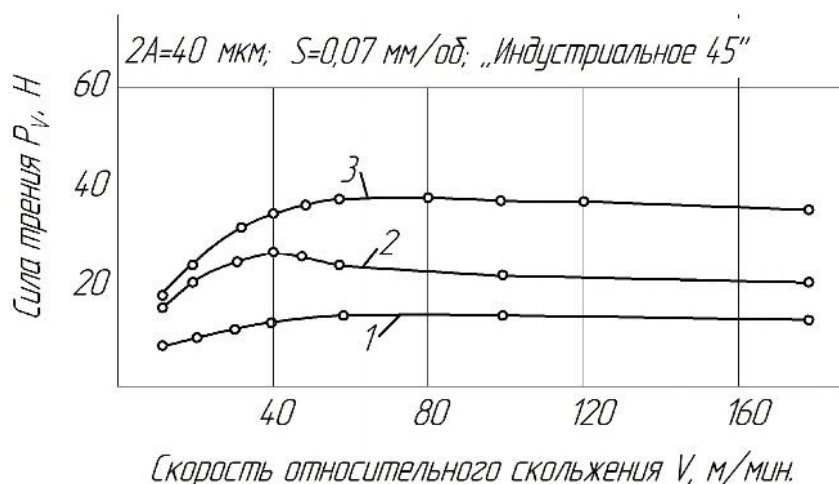


Рис. 5. Зависимость силы трения от статической нагрузки при угле наклона инструмента 60° : 1 – $P_{ст} = 100$ Н; 2 – $P_{ст} = 200$ Н; 3 – $P_{ст} = 300$ Н

Выводы

1. Установлено, что наложение на деформатор ультразвуковых колебаний при поверхностном пластическом деформировании значительно снижает силы трения, как в условиях смазки, так и в условиях сухого трения.
2. Увеличение амплитуды колебаний инструмента приводит к уменьшению силы трения, а увеличение статической нагрузки – к ее росту.
3. Значительное влияние на изменение сил трения оказывает скорость относительного скольжения, особенно в интервале скоростей до 80 м/мин.

Список литературы

1. Муханов И.И. Импульсная упрочняюще-чистовая обработка деталей машин ультразвуковым инструментом. – М.: Машиностроение, 1978. – 44 с.
2. Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование / В.Ф. Казанцев, Б.А. Кудряшов, Р.И. Нигмедзянов, В.М. Приходько, Д.С. Фатюхин // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2009. – № 46.
3. Гилета В.П., Асанов В.Б., Безнедельный А.И. Технологические возможности поверхностного пластического деформирования с использованием ультразвуковых колебаний // Инженерия поверхностного слоя деталей машин: труды международной научно-практической конференции / Кузбасский государственный технический университет, Белорусский национальный технический университет; под ред. В.Ю. Блюменштейна, Ф.И. Пантелеенко. – Кемерово, 2009. – С. 75–79.
4. Гилета В.П., Асанов В.Б., Безнедельный А.И. Технологические рекомендации по применению ультразвуковой упрочняюще-чистовой обработки // Труды 4-ой международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении». – Новосибирск, 2013. – С. 248–253.
5. Приходько В.М., Чудина О.Д. Комбинированные технологии поверхностного упрочнения конструкционных сталей с применением ультразвукового воздействия // Вестник Московского автомобильно-дорожного института. – 2003. – № 3. – С. 11–20.
6. Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S., Eremina A.F. Technological peculiarities providing the surface quality parameters at ultrasonic surface hardening // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 482–486.
7. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
8. Гилета В.П., Асанов В.Б., Безнедельный А.И. Повышение стойкости вытяжных пуансонов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2007. – № 4 (37). – С. 11–12.
9. Рахмянов Х.М., Семенова Ю.С. Технологическое обеспечение геометрических параметров качества поверхности при ультразвуковом пластическом деформировании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3 (56). – С. 33–36.
10. Statnikov E.Sh., Vityazev V.N., Korolkov O.V. Study of comparative characteristics of ultrasonic impact and optimization of deformation treatment processes // The Fourth International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies MMT–2006. – Ariel, Israel, 2006. – P. 110–119.
11. Increasing the life-time of wheels, rails, shafts and axes using ultrasonic processing of surfaces / V.A. Klimenov, Zh.G. Kovalevskaya, O.N. Nekhoroshkov, P.V. Uvarkin, V.P. Tolstov // Proceedings of the 14th International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2005, Czech

Republic, Hrades nad Moravici, Ostrava, 24–26 May 2005. – P. 214–221.

12. Improving service life of steel bridges, light poles and sign structures through the use of ultrasonic impact treatment (UIT) / K. Krishna, P.E. Verma, E.S. Statnikov, L. Theini // Bridge Maintenance, Safety, Management and Costs: proceedings of the Second International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 18–22 October 2004, Kyoto, Japan / E. Watanabe, D.M. Frangopol, T. Utsunomiya (eds.). – London: Taylor & Francis Group, 2004.

13. Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко А.Б. Обработка металлов давлением с ультразвуком. – Минск: Наука и техника, 1973. – 286 с.

14. Попов П.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения: от нанотрибологии до динамики землетресений. – М.: Физматлит, 2013. – 352 с.

15. Гилета В.П., Безнедельный А.И., Асанов В.Б. Выбор материала деформаторов для упрочняюще-чистовой обработки ультразвуковым инструментом // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 163–168.

16. Гилета В.П., Безнедельный А.И., Асанов В.Б. Влияние СОЖ и присадок на износ инструмента при ультразвуковой упрочняюще-чистовой обработке // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 158–162.

STUDY OF THE FRICTION FORCE UNDER ULTRASONIC REINFORCING FINISHING TREATMENT

Gileta V.P., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: gileta.viktor@yandex.ru

Beznedelnyy A.I., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: beznedelnyy@corp.nstu.ru

Asanov V.B., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: asanov@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

An influence of the tool vibration with ultrasonic frequency on the friction forces under different conditions and modes of surface plastic deformation was investigated. Experiments were performed with the special bedstead consisting of the 1K62 turning machine, UZG3-4 ultrasonic generator with the magnetostrictive convertor, and apparatus for loading, removal and registration of the signal. Samples were produced from the SHX15SG steel. The ultrasonic tool was equipped with deformer from the VK8 hard metal. It was determined that loading ultrasonic vibrations on the deformer under surface plastic deformation significantly decreases the friction forces in the conditions of both oiling and dry friction. Variation of the treatment modes leads to alteration of the friction force. Increase of the amplitude of the tool vibration results in decrease of the friction force whereas the static load increase leads to grows of the friction force. The influence of the slip velocity on the friction force is ambiguous.

Keywords

surface plastic deformation with the ultrasonic tool (UT), deformer, friction force, oiling, static load, velocity, amplitude

УДК 621.9 (0.45)

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ТОЧНОСТИ
ФОРМЫ ОТВЕРСТИЙ ТОНКОСТЕННЫХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

*В.А. КАЛИСТРУ, аспирант
А.М. ФИРСОВ, канд. техн. наук, доцент
(БТИ (филиал) АлтГТУ, г. Бийск)*

Калистру В.А.– 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27,
Бийский технологический институт,
e-mail: mrsi@bti.secna.ru

В работе предложена методика прогнозирования отклонений точности формы отверстий тонкостенных корпусных деталей из-за тепловых деформаций (ТД), основанная на двухэтапном способе управления технологическим процессом. Первый этап (вспомогательный) основан на методе конечного элементного анализа (LS-DYNA), второй (прогнозирующий) этап основан на обучении и построении нейронной сети (Statistica Neural Networks). Разработан алгоритм расчета входных и выходных параметров данной сети при помощи LS-DYNA, включающий в себя структуру искусственной нейронной сети (ИНС) для прогнозирования и корректировки траектории движения инструмента на стадии подготовки технологического процесса для изделий входящих в группы деталей близких по конструктивным признакам.

Ключевые слова: тепловая деформация, корпусные детали, точность формы, искусственные нейронные сети, метод конечных элементов.

Введение

В условиях конкурентной среды современное машиностроительное производство должно быть ориентировано на повышения качества выпускаемой продукции, удовлетворяющей требованиям современных тенденций рынка. Современное компьютерное моделирование в полной мере способствует достижению данных целей. Одним из способов улучшения таких показателей, как точность изготовления и качество поверхности деталей, является использование искусственных нейронных сетей в комплексе с методом конечных элементов.

Механическая обработка резанием все еще не удовлетворяет необходимым требованиям, что приводит к включению в технологический процесс дорогостоящих финишных операций. Поэтому совершенствования лезвийной обработки за счет применения информационных технологий, позволяющих повысить производительность и обеспечить высокое качество изделий, является актуальной задачей.

Объектами исследования были выбраны базовые отверстия тонкостенных корпусных деталей, т.к. к ним предъявляются высокие требования по точности размеров (6-8 квалитет), отклонению формы (4-5 степень), шероховатости поверхности ($Ra=1,6-0,08$ мкм) (рис. 1).

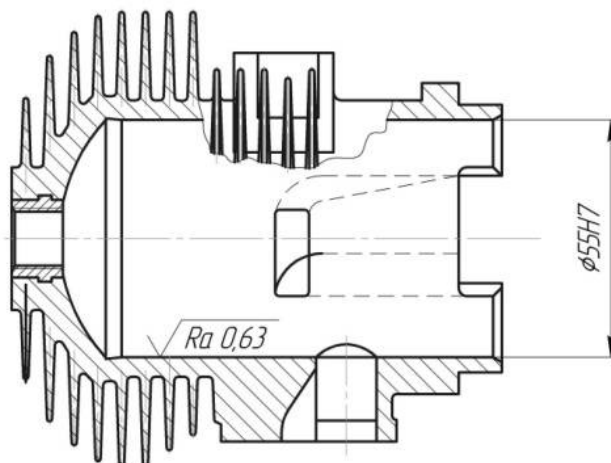


Рис. 1. Тонкостенная корпусная деталь.

Тонкостенные корпусные детали, в целях облегчения массы, изготавливаются литьем из алюминиевых сплавов. При охлаждении отливок из-за разной толщины стенок, образуется неоднородная структура, что приводит при обработке к формированию нестабильных механических свойств поверхности, разной шероховатости и к отклонению размеров и формы поверхности. Точность формы является одним из важных требований в обработке базовых отверстий корпусных деталей, выполняющих функцию направляющих поверхностей, т.к. к ним предъявляются повышенные требования по износостойкости [1].

Ожидаемая точность обработки является суммарным результатом влияния многочисленных элементарных погрешностей. Каждая из них, вносит свою долю в общую погрешность и в это же время опосредованно или напрямую влияет на остальные элементарные погрешности [2].

Доля различных элементарных погрешностей в общей погрешности для наиболее распространенных случаев примерно составляет [2]:

- погрешность установки при обработке отверстий данных корпусных деталей: 2...40%;
- погрешности, связанные с упругими деформациями системы технологической системы: 0...80%;
- погрешности от настройки и износа инструмента: 5.. .40%;
- погрешности от тепловых деформаций элементов ТС: 15.. .70%;
- погрешности формы обрабатываемой поверхности из-за геометрических погрешностей станка: 1...15%;

В предыдущей работе [3], были проведены исследования и выявлено, что значительное влияние на общую погрешность обработки формы отверстий оказывают тепловые деформации. Для тонкостенных деталей с переменной толщиной стенки погрешности, связанные с тепловой деформацией, могут составлять до 70%. Следовательно, снижение теплообразования при резании и, соответственно, уменьшение ТД заготовки возможно, в основном, путем уменьшения режимов обработки, что приводит к снижению производительности.

Таким образом, необходимо прогнозировать величину тепловой деформации на стадии проектирования технологического процесса с использованием комплексного подхода, который состоит из двух этапов: первый этап (вспомогательный) основан на методе конечного элементного анализа (LS-DYNA), второй (прогнозирующий) этап основана обучении и построении нейронной сети (Statistica Neural Networks).

Теория

Преимущества анализа в LS-DYNA состоят в автоматизации и упрощении расчётных параметров, но недостаточны, поскольку увеличивается длительность подготовки технологического процесса; требуются высококвалифицированные специалисты; усложняется подготовительный этап. Тем самым, расчет по методу конечных элементов (МКЭ) является вспомогательным этапом и применяется для нахождения входных и выходных параметров искусственной нейронной сети, которая используется для прогнозирования отклонений точности формы отверстий.

Во время данного расчета строятся упрощенные модели по выбранной детали. Данные модели представляют собой обучающую выборку и включают в себя следующие характеристики: длина отверстия (L), диаметр отверстия (D), разность между минимальной и максимальной толщиной стенки (a), материал заготовки, материал режущего инструмента.

Так как ТД рассчитывается только для заготовки, то вместо режущего инструмента используется режущий клин, что повышает производительность расчета.

Тем самым, алгоритм строится следующим образом (рис. 2,3,4):



Рис. 2. Алгоритм прогнозирования отклонений точности формы отверстий тонкостенных корпусных деталей.

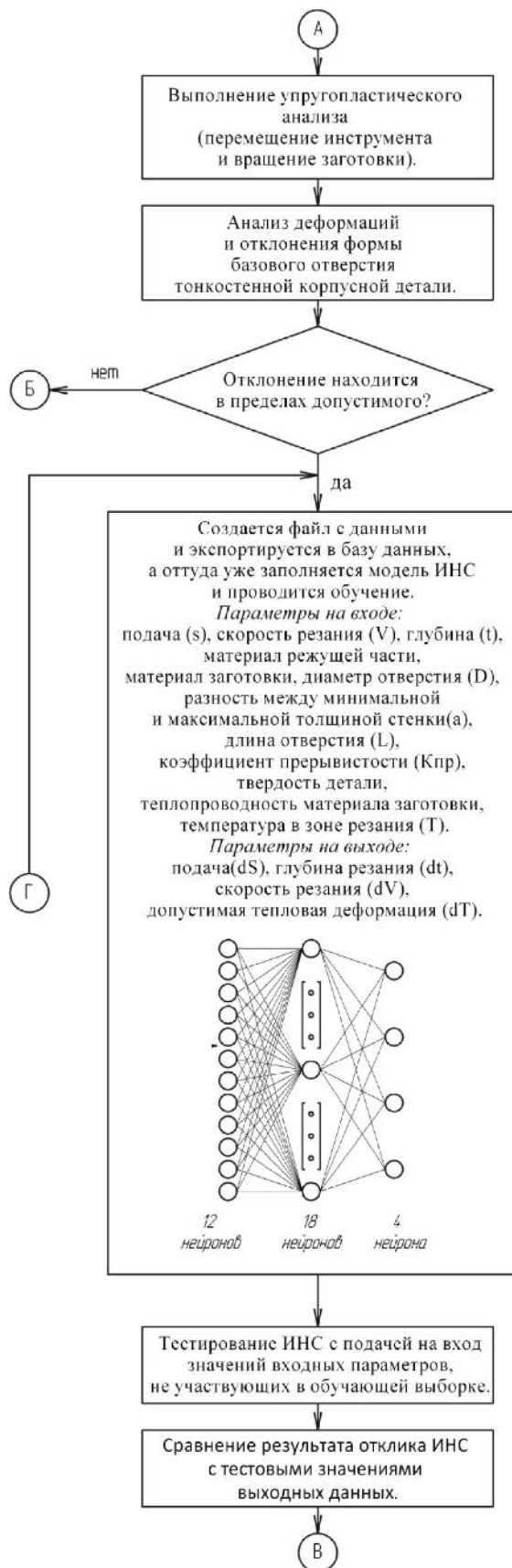


Рис. 3. Алгоритм прогнозирования отклонений точности формы отверстий тонкостенных корпусных деталей.



Рис. 4. Алгоритм прогнозирования отклонений точности формы отверстий тонкостенных корпусных деталей

Результаты и обсуждение

Данная методика позволит провести корректировку траектории движения режущего инструмента на основе ТД заготовки еще на стадии проектирования технологического процесса и поспособствует обеспечению запаса технологической точности, сократит время технологической подготовки при проектировании группового технологического процесса, уменьшит вероятность брака. Метод, основанный на ИНС, способен учитывать не только большое количество факторов, но и их взаимное влияние друг на друга. Он, теоретически, имеет возможность аппроксимации сколь угодно сложных зависимостей, что позволяет выполнять прогнозирование точности обработки напрямую в зависимости от значений входных параметров процесса. Недостатками данного метода являются: использование однотипных инструментальных материалов и материалов заготовки (в нашем случае твердые сплавы различных марок и алюминиевые сплавы различной твердости и плотности). Поэтому прогнозирование технологического процесса обработки базовых отверстий тонкостенных корпусных деталей при помощи данной нейронной сети будет работать в границах группы деталей близких по конструктивным признакам.

Вывод

С точки зрения экономической эффективности применение данной методики в производстве позволит сократить сроки и затраты на разработку технологического процесса изготовления разных тонкостенных корпусных деталей, а также позволит повысить эксплуатационную пригодность изделий.

Экономический эффект будет достигнут путем автоматизации инженерного труда с использованием программного обеспечения на основе ИНС. В результате этого будет снижена себестоимость продукции за счет постоянных расходов, приходящихся на одно изделие, вследствие увеличения выпуска новых изделий и за счет переменных затрат вследствие снижения трудоемкости производства. Таким образом, общий экономический эффект будет достигать нескольких миллионов рублей.

Список литературы

1. *Татаркин Е.Ю., Фирсов А.М.* Обеспечение точности отверстий при обработке малогабаритных корпусных деталей на токарных станках // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1-1. – С. 286–290
2. *Колев К.С.* Вопросы точности при резании металлов. – М.: Машгиз, 1961. – 134 с.
3. *Калистру В.А, Фирсов А.М.* Проблема технологического обеспечения точности формы отверстий тонкостенных корпусных деталей // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 92–95.

THE METHOD OF FORECASTING OF DEVIATION PRECISION SHAPES OF THIN-WALLED BODY PARTS

Kalistru V.A., Ph.D. student, e-mail: mrsi@bti.secna.ru

Firsov A.M., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of Department,
e-mail: mrsi@bti.secna.ru

Biysk Technological Institute, Branch of Polzunov Altai State Technical University,
27 Trafimova st., Biysk, Altai region, 659305, Russian Federation

Abstract

In this paper we propose the method for predicting deviations of precision of a hole shape are thin-walled body parts due to thermal deformation (TD). This method is based on a two-step technique of process control. The first stage (auxiliary) is based on the method of finite element analysis (LS-DYNA); the second (prediction) stage is based on training and building a neural network (Statistica Neural Networks). In this paper is developed an algorithm of calculation of input and output parameters of the network using LS-DYNA. A structure of the artificial neural network (Ann) to predict and to adjust a trajectory of a movement of a tool at the preparation stage of the technological process for work pieces included in group process is invented in this article.

Keywords

thermal deformation, body parts, accuracy of shape, artificial neural networks, finite element method

УДК 621.9.06:678.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ СТЕКЛОПЛАСТИКА

С.В. ГАЙСТ, аспирант
А.М. МАРКОВ, доктор тех. наук, профессор
П.О. ЧЕРДАНЦЕВ, канд. техн. наук, доцент
С.А. КАТАЕВА, магистрант
Е.Ю. ЛАПЕНКОВ, магистрант
(АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул)

Гайст С.В. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail:sergei_gaist@mail.ru

В данной статье рассматриваются проблемы связанные с механической обработкой стеклопластиков, в частности операции фрезерования. Особое внимание уделено теплоте, выделяющаяся в процессе резания стеклопластиков, так как распределение теплоты между инструментом, стружкой и обрабатываемой деталью в следующем соотношении: $\approx 90\%$, $\approx 5\%$, 5% . Кроме того, при температурах выше $300 - 350^{\circ}\text{C}$ начинаются интенсивная термодеструкция и разложение полимерного связующего, что приводит к его налипанию на режущие кромки инструмента. Таким образом, описание методики исследований по определению степени влияния режимов резания процесса фрезерования стеклопластиков на температуру в зоне резания, а также получение эмпирические зависимости могут быть использованы для прогнозирования температуры при проектировании операций фрезерования, а также сравнительной оценки различных конструкций фрез.

Ключевые слова: Стеклопластик, режущий инструмент, фрезерование, теплота, температура, зона резания, режимы резания, эксперимент, инфракрасный термометр, эмпирические зависимости.

Введение

Особое внимание при проектировании операций механической обработки стеклопластиков, в частности операций фрезерования, необходимо уделять температуре в зоне резания. Как известно, теплота, образующаяся при резании, является результатом работы деформаций, трения стружки и обрабатываемого изделия о переднюю и заднюю поверхность инструмента, механических превращений полимерного наполнителя, разрушения армирующих волокон.

Так как теплопроводность стеклопластиков низкая, отвод тепла из зоны резания вместе со стружкой и в обрабатываемое изделие затрудняется, и, как следствие, режущий инструмент работает в термически напряжённых условиях.

Теплота, выделяющаяся в процессе резания стеклопластиков, в отличие от обработки металлов, распределяется между инструментом, стружкой и обрабатываемой деталью в следующем соотношении: $\approx 90\%$; $\approx 5\%$, 5% [1]. Отвод выделяющаяся теплоты в окружающую среду пренебрежимо мал. Концентрация теплоты в инструменте приводит к значительному повышению температуры на его режущих кромках. Этот факт необходимо

учитывать при выборе конструкторско-геометрических параметров инструмента и материала режущей части.

Кроме того, при температурах выше 300 – 350 °С начинаются интенсивная термодеструкция и разложение полимерного связующего, что приводит к его налипанию на режущие кромки инструмента. Наличие разогретого связующего в зоне резания также губительно сказывается на стойкости инструмента, являясь причиной его адсорбционно-усталостного износа.

Увеличение температур в зоне резания также приводит к резкому ухудшению свойств материала, появлению прижогов и увеличению дефектного слоя [2]. Поэтому обработку стеклопластиков рекомендуется вести при таких режимах резания, чтобы температура в зоне резания не превышала 300°С.

Таким образом, при выборе режимов резания как по критерию производительности, так и по критерию стойкости инструмента, температура в зоне резания является одним из ключевых ограничивающих факторов.

Методика экспериментальных исследований

Основными задачами экспериментальных исследований являются:

- изучение влияния режимных характеристик процесса фрезерования на величину температуры в зоне резания;
- получение эмпирических зависимостей температуры от режимных характеристик процесса фрезерования.

В качестве исследуемого режущего инструмента были взяты концевые фрезы диаметром 10 мм, предназначенные для обработки уступов, плоскостей, пазов и закрытых контуров.

Технические требования к фрезам определяются согласно ГОСТ 18372-73. Твердость рабочей части в пределах 88-91 HRA, хвостовиков 37-53 HRC. Параметры шероховатости поверхностей фрез: передней и задней поверхности главных режущих кромок не более $Ra = 0,32$ мкм, цилиндрической части хвостовика, поверхности вспомогательных режущих кромок и поверхности фасок 0,63 мкм, прочих поверхностей – $Rz = 20$ мкм.

Все фрезы (рис. 1.) изготовлены из твердосплавного материала марки ВК8, выполнены в трехзубом исполнении со следующей геометрией: передний угол $\gamma=15^0$; задний угол $\alpha=20^0$; угол подъема винтовой канавки $\omega=30^0$.

В качестве экспериментальных образцов для проведения исследований были выбраны трубы, изготовленные из композиционного материала с криволинейной продольно-поперечной намоткой волокон КППН, что обеспечивает физико-механические свойства указанные в таблице 1.



Рис.1. Режущий инструмент

Таблица 1

Физико-механические свойства

Предел прочности, Па	
В тангенциальном направлении	4,6e+08
В осевом направлении	8,8e+08
Модуль упругости при растяжении, Па	
В тангенциальном направлении	3,43e+10
В осевом направлении	1,28e+11
Плотность, кг/м ³	1,97×10 ³

Экспериментальные исследования проводились с использованием методики планирования эксперимента (дробно факторный эксперимент). Достаточность повторяемости опытов оценивалась по однородности дисперсий (критерий Кохрена). Рассчитывались коэффициенты размерной модели. Значимость коэффициентов модели оценивалась по критерию Стьюдента, адекватность модели реальному процессу - по критерию Фишера.

Варьируемыми параметрами приняты режимы резания: скорость резания V , м/мин, подача S , мм/зуб и глубина фрезерования t , мм. В процессе экспериментов контролировали следующие параметры: износ инструмента Δ , мкм, шероховатость обработанной поверхности R_a , мкм, и глубина дефектного слоя h , мкм. В таблице 2 представлена матрица планирования эксперимента [4].

Таблица 2

Матрица планирования экспериментальных исследований

№	Варьируемые параметры		
	V , м/мин	S , мм/зуб	T , мм
1	-	-	+
2	-	+	-
3	+	+	+
4	+	-	-

Для определения интервалов варьирования факторов был проведен информационный поиск, а также серия предварительных экспериментов. Таким образом, интервал варьирования скорости резания $V=63...200$ м/мин, подачи $S=0,02...0,1$ мм/зуб, глубины фрезерования $t=1...10$ мм. Нижние границы интервалов варьирования определяются минимальной производительностью, верхние – качеством обработанной поверхности [3].

Исследования проводились на фрезерном станке VMC850 оснащённом системой ЧПУ FANUC. Заготовка закреплялась на столе станка с помощью трёхкулачкового самоцентрирующегося патрона. Движение подачи реализовывалось путём винтовой интерполяции. Общий вид наладки станка представлен на рис. 2.

Для контроля температуры в зоне резания был использован инфракрасный термометр модели KIRAY 300, с разрешающей способностью 0.1 °С.

Результаты и обсуждения

Результаты исследования зависимости температуры от режимов резания представлены в виде графиков (рис. 3.).

Как видно из графиков на рассматриваемом интервале времени механической обработки стеклопластика выявлена линейная связь между изменением температуры от режимных характеристик, в частности, от глубины фрезерования t и подачи на зуб S .



Рис. 2. Наладка станка VMC850 для проведения экспериментов

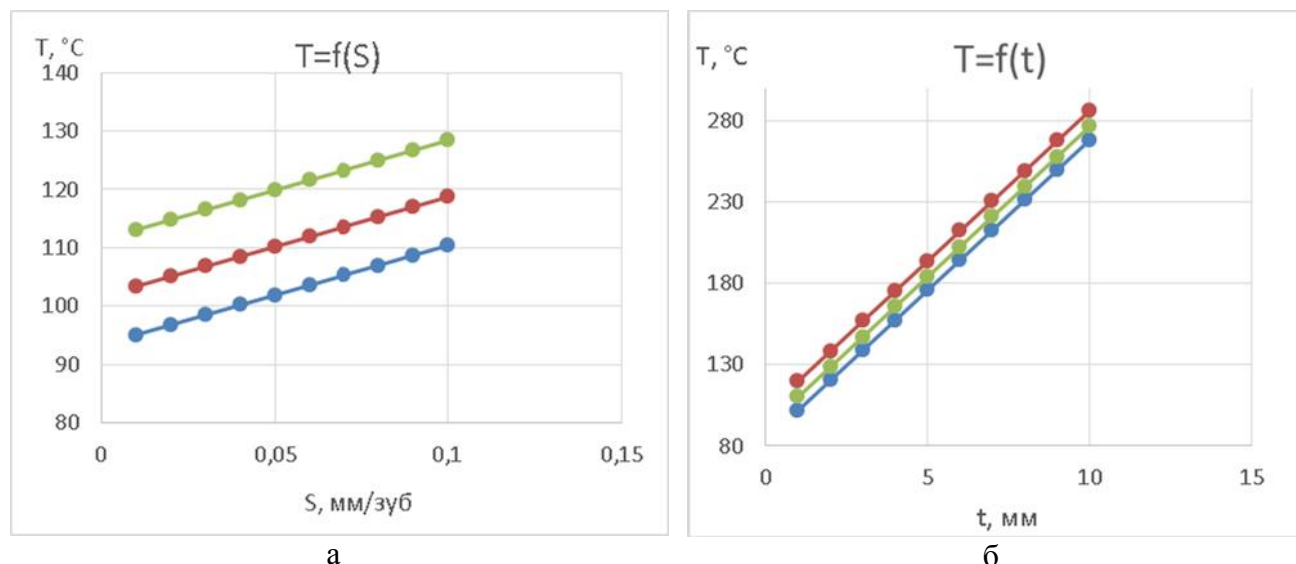


Рис. 3. Зависимость изменения температуры от режимов резания
а) изменения температуры в зависимости от подачи, при $t=5$ мм;
б) изменение температуры от глубины резания, при $S=0,06$ мм/зуб.

Математическая обработка полученных экспериментальных данных позволила получить эмпирическую зависимость температуры от режимных характеристик процесса фрезерования:

$$T=A+B(\tau) \quad (1)$$

где $A = -127,141 + 0,872416V + 1074,219S + 3,5926t$;

$B = -75,1027 + 0,304139V + 621,5419S + 4,467983t$;

τ – время обработки, мин.

Однако, для оценки качества обработанной поверхности необходимо знать распределение температурного поля по телу заготовки и инструмента. Это позволит прогнозировать появление прожогов, величину дефектного слоя, а также преждевременного выхода из строя режущего инструмента.

Выводы

1. Полученные эмпирические зависимости могут быть использованы для прогнозирования температуры при проектировании операций фрезерования, а также сравнительной оценки различных конструкций фрез.

2. Разработанная методика по исследованию изменения температуры от режимных характеристик процесса механической обработки стеклопластиков может применяться для исследования работоспособности фрез, а также и других лезвийных инструментов.

3. На рассматриваемом интервале времени механической обработки стеклопластика выявлена линейная связь между изменением температуры от режимных характеристик

Список литературы

1. Баранчиков В.И., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Обработка специальных материалов в машиностроении: справочник. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с. – (Библиотека технолога).

2. Чижов М.И., Огурцов М.С., Сергеенко А.В. Влияние режимов резания и жесткости конструкции на точность механической обработки деталей из ПКМ на станках с ЧПУ [Электронный ресурс] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 6. – С. 48–50. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rezhimov-rezaniya-i-zhestkosti-konstruktsii-na-tochnost-mehanicheckoy-obrabotki-detaley-iz-pkm-na-stankah-s-chpu> (дата обращения: 21.03.2016).

3. Исследование процесса фрезерования стеклопластиков / Е.Ю. Лапенков, С.А. Катаева, С.В. Гайст, П.О. Черданцев, А.М. Марков // Вестник Алтайской науки. – 2015. – № 3/4. – С. 39–44.

4. Проектирование технологических операций обработки композиционных материалов на основе искусственных нейронных сетей / М.В. Доц, Е.Б. Бондарь, А.М. Марков, В.Б. Маркин // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1-1. – С. 81–84.

INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE AT MILLING FIBREGLASS

Gayst S. V., Ph.D. student, e-mail: sergei_gaist@mail.ru

Markov A. M., Vice Rector, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: andmarkov@inbox.ru

Cherdancev P. O., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: p004092@yandex.ru

Kataeva S. A., Master's Degree student, e-mail: Kataeva.Sof@gmail.com

Lapenkov E. Y., Master's Degree student, e-mail: ewgenii018@mail.ru

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenin Prospekt, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

Abstract

This article discusses the problems associated with machining fiberglass plastics, in particular milling operations. Special attention is given to the heat generated during cutting fiberglass plastics, as the distribution of heat between the tool, workpiece and chips in the following ratio: $\approx 90\%$; $\approx 5\%$, 5% . Additionally, at temperatures above $300 - 350^\circ \text{C}$ start intensive thermal destruction and degradation of the polymeric binder, which causes it to stick to the cutting edge of the tool. Thus, the method described studies to determine the degree of influence of the cutting process modes fiberglass plastics milling temperature in the cutting zone, as well as obtaining empirical relationships can be used to predict the temperature in designing milling operations as well as the comparative evaluation of various designs of cutters.

Keywords

Fiberglass, cutting tools, milling, heat, temperature, cutting area, cutting conditions, experiment, infrared thermometer, empirical relationships

УДК 621.9.047

**ИССЛЕДОВАНИЕ АНОДНОГО ПОВЕДЕНИЯ КРЕМНИЯ В ЩЕЛОЧНЫХ
ЭЛЕКТРОЛИТАХ****С.И. ВАСИЛЕВСКАЯ, аспирант
В.Ф. МАКАРОВ, магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск)****Василевская С.И.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: Svetlana.vasilevskaya.87@mail.ru

В работе рассмотрены процессы электрохимического растворения кремния в 5 % водных щелочных электролитах гидроксида калия и натрия (KOH, NaOH) в стационарных (потенциодинамических) условиях и при интенсификации поверхности исследуемого образца. Для поляризационных исследований использовано оборудование: потенциостат модели П – 5827М, прибор, регистрирующий значение тока и трехэлектродная электрохимическая ячейка. Объектом исследования являлась кремневая пластина на металлической подложке площадью $S = 0,22 \text{ см}^2$, толщиной $h = 0,3 \text{ мм}$. Выявлено, что в условиях ЭХО при потенциодинамическом методе в диапазоне потенциалов от 0 В до 2,5 В наблюдается увеличение плотности тока до $0,02 \text{ А/см}^2$ в электролите KOH и до $0,008 \text{ А/см}^2$ в NaOH, а в диапазоне потенциалов от 2,5 В до 8 В происходит процесс пассивации. Из результатов установлено, что при интенсификации поверхности плотность тока возрастает во всем исследуемом диапазоне потенциалов. Определено, что плотность тока при механическом обновлении поверхности в исследуемых электролитах в диапазоне потенциалов от 0 В до 8 В увеличилась до 10 раз.

Ключевые слова: анодное поведение, электролит, кремний, интенсификация поверхности, поляризационные зависимости, потенциал, плотность тока, электрохимическая обработка.

Введение

Развитие современной промышленности тесно связано с развитием полупроводниковой техники и технологии. Одним из основных полупроводниковых материалов является кремний (Si).

Из известных методов обработки кремния привлекательным представляется электрохимическое формообразование [1]. Из анализа литературных данных [2] установлено, что наиболее активное растворение кремния осуществляется в растворах плавиковой и азотной кислот. Травление кремния в кислотных составах проводят при высоких концентрациях и температурах, что не удовлетворяет требованиям по технике безопасности. В связи с этим для обработки кремния предлагается использовать щелочные растворы гидроксида калия и натрия (KOH и NaOH).

Электрохимическая обработка (ЭХО) представляет собой процесс растворения детали – анода при прохождении тока через электролит в зазоре между деталью и инструментом. Развитие ЭХО в техническом и технологическом смысле направлено на повышение точности, производительности и качества обработки различных классов материалов [3 – 9].

Известно что, при ЭХО кремния в щелочных электролитах на его поверхности образуются оксидные пленки, что приводит к торможению процесса [2]. Данное явление называют пассивацией.

Для устранения причин торможения процесса ЭХО применяют различные методы его интенсификации, такие как метод вращающегося дискового электрода, гидродинамический, лазерный метод и т.д. [10 – 16]. Каждый из этих методов позволяет воздействовать их на ту или иную стадию процесса растворения.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование анодного поведения кремния в водных щелочных электролитах при стационарных (потенциодинамических) условиях и при механической интенсификации поверхности исследуемого материала.

Методика экспериментального исследования

В данной работе для поляризационных исследований использовались: потенциостат модели П – 5827 М, задающий по определенному алгоритму развертку потенциала или тока; прибор, регистрирующий значение тока; трехэлектродная электрохимическая ячейка.

В качестве электролитов для поляризационных исследований применялись 5% водные щелочные растворы гидроксида калия и натрия.

Для исследования анодного поведения кремния в условиях ЭХО использовались образцы площадью $S = 0,22 \text{ см}^2$ и толщиной $h = 0,3 \text{ мм}$. Образцы приклеивались на металлическую подложку специальным, токопроводящим клеем «Контакт». К каждому образцу припаивался провод. Образцы помещались в эбонитовую оправку, заливались эпоксидным клеем марки ЭПО – 8, химически стойким к применяемым в ЭХО растворам электролитов. Перед каждым экспериментом исследуемую поверхность образца подготавливали согласно методике, изложенной в работах [17, 18].

Потенциодинамический метод заключается в непрерывном снятии поляризационных зависимостей с заданной скоростью развертки потенциалов при одновременной регистрации плотности тока, кривые 1 (рис. 1, 2).

Потенциостатическим методом, при механическом обновлении поверхности кремния, снимались токи включения $i = f(t)$ при значении анодного потенциала от 0 до 8 В с шагом 0,5 В. Обработка результатов потенциостатических исследований позволила определить плотность тока в начальный момент времени при соответствующих потенциалах, на основании которых были построены поляризационные кривые 2 (рис. 1, 2).

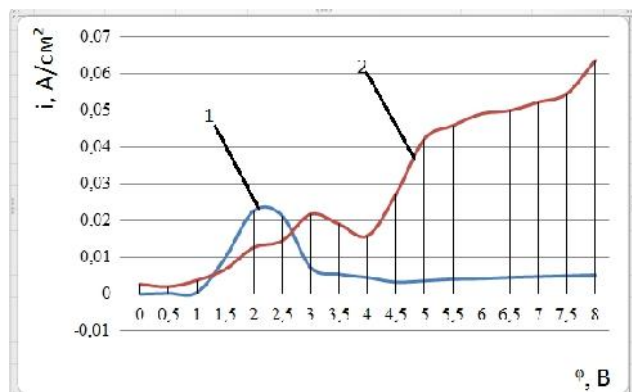


Рис. 1 Поляризационные зависимости при обработке кремния в 5% электролите KOH:
1 – потенциодинамический метод;
2 – потенциостатический метод при интенсификации поверхности

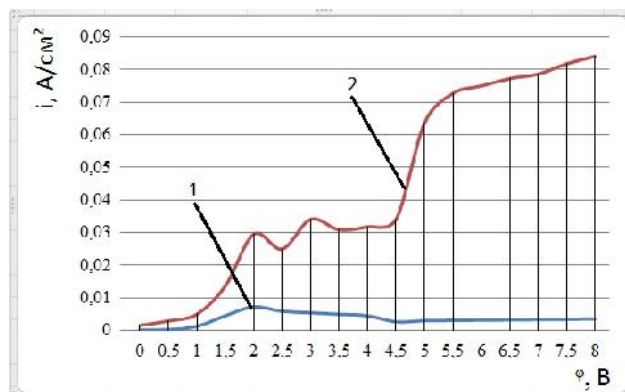


Рис. 2 Поляризационные зависимости при обработке кремния в 5% электролите NaOH:
1 – потенциодинамический метод;
2 – потенциостатический метод при интенсификации поверхности

Результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментальных исследований получены поляризационные зависимости электрохимического растворения кремния в 5% водных щелочных электролитах гидроксида калия и натрия при потенциодинамическом методе (кривые 1) и при интенсификации поверхности (кривые 2), рис. 1, 2.

Анализ результатов показывает, что в условиях ЭХО при потенциодинамическом методе в диапазоне потенциалов от 0 В до 2,5 В наблюдается увеличение плотности тока до 0,02 А/см² (в электролите КОН) и до 0,008 А/см² в (NaOH). В диапазоне потенциалов от 2,5 В до 8 В происходит процесс пассивации. Это объясняется тем, что на поверхности кремния образуется оксидная пленка.

При интенсификации поверхности плотность тока повышалась во все исследуемом диапазоне потенциалов. Об этом свидетельствует непрерывное увеличение плотности тока с ростом потенциалов (кривые 2, рис. 1, 2).

На основании численного анализа данных поляризационной кривой 1 (рис. 1, 2), полученной в стационарных условиях и кривой 2 (рис. 1, 2) – при интенсификации исследуемой поверхности возможно рассчитать увеличение плотности тока при механическом обновлении поверхности. При интенсификации анодного растворения кремния степень локализации определяется соотношением $L = i_0/i$ [11, 19] где i_0 – плотность тока анодного растворения материала с активацией и i – плотность тока анодного растворения материала без активации.

Результаты расчета показали, что плотность тока увеличилась до 10 раз, (таблица 1).

Таблица 1

Значения плотности тока при ЭХО кремния в стационарных условиях и при механической интенсификации поверхности

Название электролита	Плотность тока в области пассивации	Плотность тока в области активного растворения при интенсификации поверхности	Соотношение плотностей токов i_0/i
5 % NaOH	$i = 0,005 \text{ А/см}^2$	$i = 0,08 \text{ А/см}^2$	10
5% КОН	$i = 0,005 \text{ А/см}^2$	$i = 0,062 \text{ А/см}^2$	8

Выводы

Проведенные исследования позволили выявить характер анодного растворения кремния при обработке в 5% водных щелочных электролитах гидроксида калия и натрия (5 % КОН и NaOH) при интенсификации поверхности материала в условиях ЭХО. Выявлено, что при интенсификации поверхности материала плотность тока увеличилась до 10 раз. Это объясняется тем, что с поверхности материала удаляются пленки.

Список литературы

1. Мороз И.И. Электрохимическая обработка металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 208 с.
2. Бок Р. Методы разложения в аналитической химии. – М.: Химия, 1984. – 432 с.
3. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В. Анодное растворение быстрорежущей стали Р6М5 и ее составляющих в водных растворах // Сборник научных трудов НГТУ. – 2003. – № 4 (34). – С. 141–147.
4. Кабанов Б.Н., Давыдов А.Д., Кащеев В.Д. О взаимосвязи между особенностями анодного растворения металлов и точностью электрохимической размерной обработки // Размерная электрохимическая обработка деталей машин: материалы IV всесоюзной конференции. – Тула, 1975. – Ч. 1: Основы теории процесса. – С. 10–14.
5. Электрохимическая обработка безвольфрамовых твердых сплавов / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский, Д.Б. Красильников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 3. – С. 3–7.
6. Давыдов А.Д. О влиянии электродных процессов на точность электрохимической размерной обработки // Электрохимия. – 1972. – Т. 6, № 10. – С. 1500–1501.
7. Саушкин Б.П. О динамике анодной поверхности при ЭХРО металлов в нестационарных условиях // Электронная обработка материалов. – 1973. – № 5. – С. 11–14.
8. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н. Размерная обработка деталей с покрытиями из наноструктурированных порошковых материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 4. – С. 22–26.
9. Электрохимическое растворение покрытий из порошковых материалов / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский, М.И. Никитенко, А.Н. Моисеенко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 2. – С. 3–5.
10. Давыдов А.Д., Камкин А.Н. Развитие теории анодной активации пассивных металлов // Электрохимия. – 1978. – Т. 14, № 7. – С. 979–992.
11. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И. Исследование электролитов, обеспечивающих точность электрохимической обработки меди М1 // Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: материалы VI международной научно-технической конференции. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 100–104.
12. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н. Электроалмазная обработка напыленных износостойких покрытий // Инженерия поверхностного слоя деталей машин: труды международной научно-практической конференции / Кузбасский государственный технический университет, Белорусский национальный технический университет; под ред. В.Ю. Блюменштейна, Ф.И. Пантелеенко. – Кемерово, 2009. – С. 365–368.
13. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимьянов К.Х. Точность формообразования при электроалмазной прорезке пазов в аморфных и нанокристаллических сплавах // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 2. – С. 32–33.
14. Влияние гидродинамического режима на скорость анодного растворения меди в пассивирующих электролитах / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, А.С. Захаров, С.И. Василевская // Механика XXI века. – 2015. – № 14. – С. 112–115.
15. Гаар Н.П., Рахимьянов Х.М. Пути интенсификации электрохимической размерной обработки // Ползуновский альманах. – 2008. – № 4. – С. 191–192.
16. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И. Степень локализации процесса при интенсификации анодного растворения меди // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 3 (68). – С. 58–65. – doi: 10.17212/1994-6309-2015-3-58-65.

17. Фрейман Л.И., Макаров В.А., Брыскин И.Е. Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите / под ред. Я.М. Колотыркина. – Л.: Химия, 1972. – 240 с.

18. Василевская С.И., Герасимов Н.В. Исследование анодного поведения меди в условиях электрохимической обработки // Наука. Промышленность. Оборона: труды 16 Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 70-летию Победы в Великой Отечественной войне, Новосибирск, 22–24 апреля 2015 г. – Новосибирск, 2015. – С. 178–182.

19. Локализация процесса / Ю.Н. Петров, Г.Н. Корчагин, Г.Н. Зайдман, В.П. Саушкин // Основы повышения точности электрохимического формообразования. – Кишинев: Штиинца, 1977. – С. 26–31.

STUDY OF SILICON ANODIC BEHAVIOR IN ALKALINE ELECTROLYTE

Vasilevskaya S.I., Ph.D. student, e-mail: Svetlana.vasilevskaya.87@mail.ru

Makarov V.F., Master's Degree student, e-mail: lion77167@gmail.com

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The paper discusses processes of electrochemical dissolution of silicon in a 5% aqueous potassium alkaline electrolytes and sodium hydroxide (KOH, NaOH) in a stationary (potentiodynamic) conditions and intensification of the sample surface. For polarization studies following equipment is used: potentiostat model P – 5827M, a device for current registration and three-electrode electrochemical cell. The object of study of this research is the silicic plate on a metallic substrate with the area $S = 0.22 \text{ cm}^2$ and thickness $h = 0.3 \text{ mm}$. It is revealed that the conditions under potentiodynamic method ECM in the range of potentials from 0 V to 2.5 V the increase the current density 0.02 A / cm^2 is observed in KOH and up to 0.008 A / cm^2 in NaOH. At potentials ranging from 2.5 V to 8 V the passivation process is occurs. It is found from the results that the current density is increased during intensification of the surface in the entire investigated range of potentials of from 0 V to 8 V. It is determined that the current density increased in 10 times under mechanical surface stripping in electrolytes in the potential range of 0 V to 8 V.

Keywords

anodic behavior, electrolyte, silicon, and intensification of the surface, the polarization dependence, potential, current density, electrochemical machining

УДК 65.011.56

**ФОРМИРОВАНИЕ ГРУПП ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГРУППОВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

В.В. СМИРНОВ, канд. техн. наук, доцент
А.Г. ОВЧАРЕНКО, доктор техн. наук
(БТИ АлтГТУ, г. Бийск)

Смирнов В.В. – 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27,
Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова,
e-mail: mrsi@bti.secna.ru

В статье представлена методика формирования групп деталей в групповых технологиях машиностроения. Методика основана на вычислении специальной метрики на множестве конструктивных признаков деталей. Метрика представляет собой меру несходства двух деталей с точки зрения групповых технологий обработки. Исходная математическая модель группирования представляет собой неориентированный полный граф. Для поиска групп деталей решается задача кластеризации с использованием алгоритма поиска минимального остовного дерева. После анализа результирующего графа принимается решение о составе групп деталей для проектирования группового технологического процесса и/или об оптимизации размещения производственного оборудования на участке.

Ключевые слова: математическая модель, механическая обработка, групповые технологии

Введение

Эффективная технологическая подготовка производства, позволяющая применить высокопроизводительные методы массового производства к условиям серийного и мелкосерийного, во многом обусловлена достигнутым уровнем технологической унификации и предполагает разработку и внедрение САПР типовых и групповых технологических процессов [1-4].

Проектирование типовых технологических процессов основано на идее типизации деталей, разработанной проф. А.П. Соколовским. В качестве типовых классификационных признаков детали обычно принимают: форму и размеры, точность и качество обработанной поверхности, материал детали. Групповой метод обработки (group technology) предполагает, что объекты производства (детали) представлены группами. Характерной особенностью групповых технологий обработки является наличие в технологических процессах групповых операций, которые спроектированы таким образом, что на одном станке с одной наладкой или минимальной переналадкой можно производить обработку некоторой группы деталей. Детали одной группы могут иметь отличия в конструкции, технологическом маршруте, составе и объёме работ по операциям и т.п. Несмотря на эти отличия, можно утверждать, что в данном случае конкретное рабочее место отвечает современным модульным принципам организации производства. А групповые технологии, в свою очередь, являются одним из ключевых компонентов системы «бережливое производство» в машиностроении и элементом концепции SMED (single minute exchange of die или «быстрая переналадка») [5,6].

Вопросы технологической подготовки производства при организации групповых технологий подробно рассматривались в трудах С.П. Митрофанова, А.Г. Сусллова, А.М.

Дальского, Б.М. Базрова, В.Ф. Безъязычного и др. Многие исследователи указывают, что одной из проблем выявления групп деталей является использование технологами преимущественно интуитивных аналитических методов, обусловленных наличием субъективного опыта и собственных знаний производства [7]. Вместе с тем существуют специальные методики группирования, пригодные для компьютерной реализации, наиболее известной из которых является методика анализа деталей в n -мерном признаковом пространстве, разработанная под руководством проф. С.П. Митрофанова [1, 8]. В настоящей работе предлагается к рассмотрению реализация этой методики с использованием аналитических и программных инструментов дискретной математики.

Теория

Математическая постановка задачи разделения множества обрабатываемых деталей на классы (типы, группы) относится к типу структурных моделей [9, 10] и в общем случае следующая. Задано множество деталей, каждая из которых описывается набором конструктивных и/или технологических признаков. Необходимо разбить множество деталей на непустые непересекающиеся подмножества, т.е. отыскать классы эквивалентности. При этом, если разбиение детали на типы является однозначным, то на группы нельзя назвать таковым (теоретически одна и та же деталь может принадлежать к нескольким группам), тем не менее количество таких разбиений является конечным.

В общем случае можно утверждать, что при выделении групп деталей, принадлежность трёх деталей a , b , c из множества A к одной группе определяется бинарным отношением ρ , для которого не выполняется свойство транзитивности:

$$\forall (a, b, c) \in A, [a, b] \in \rho \wedge [b, c] \in \rho \rightarrow [a, c] \in \rho.$$

Таким образом вместо отношения эквивалентности между деталями, принадлежащими одной группе, можно зафиксировать бинарное отношение толерантности, т.е. одна деталь может быть сходна с другой, а та другая – с третьей, но это не значит, что все три детали схожи между собой. Таким образом, детали будут толерантны друг другу, если их поверхности (конструктивные элементы формы) обрабатываются на одном и том же оборудовании.

Решение задачи о выделении классов толерантности тесно связано с областью интеллектуального анализа данных (Data Mining) и может быть найдено с использованием процедуры кластеризации [11-13]. Для этого необходимо не только определить пространство признаков, в котором производится разбиение множества деталей на группы, но и выбрать критерий оценки принадлежности детали к группе. После этого следует выполнить процедуру кластеризации, на основе которой группы деталей будут сформированы непосредственно.

При решении подобных задач, как правило, бывает достаточно сложно найти оптимальное решение и определить алгоритм группировки, который будет работать лучше всего для всех возможных сценариев. Предлагаемый способ группирования предполагает ведение на множестве деталей специальной метрики, в качестве критерия оценки принадлежности детали к группе, которая послужит основой для последующего решения задачи кластеризации.

Ввиду того, что количество технологических элементов формы для различных деталей неодинаково, многие стандартные метрики, вводимые на множествах, оказываются неприменимы. В данной работе предлагается использовать в качестве метрики функцию, определяющую меру несходства двух деталей по числу элементов формы, обрабатываемых на одном станке.

Мерой несходства между деталями i и j будем считать величину $w_{i,j}$ вычисляемую по формуле

$$w_{i,j} = 1 - \frac{n_{i,j}}{n_{i,j} + m_{i,j}}, \quad (1)$$

где $n_{i,j}$ – количество операций, используемых как для изготовления детали i , так и для изготовления детали j ; $m_{i,j}$ – количество операций, характерных только для детали i или только для детали j .

Задачу кластеризации будем решать с помощью графов с построением минимального остовного дерева. В общем случае она формулируется так. Пусть имеется связный, неориентированный граф с весами на ребрах $G(\mathbf{V}, \mathbf{E})$, в котором \mathbf{V} – множество вершин (деталей), а \mathbf{E} – множество их возможных попарных соединений (ребер графа). Пусть для каждого ребра (i, j) однозначно определено некоторое вещественное число – значение функции несхожести (1). Задача кластеризации состоит в нахождении такого связного ациклического подграфа $T \subset G$, содержащего все вершины, что суммарный вес его ребер будет минимален.

Таким образом, методика формирования групп деталей включает следующие этапы:

1) выделение технологических элементов формы деталей (определяем пространство признаков);

2) отнесение технологических элементов формы к методам обработки;

3) выбор оборудования, соответствующего методам обработки;

4) вычисление метрики – значения функции (1) для каждой пары детали;

5) выполнение процедуры кластеризации на множестве деталей;

6) вывод о принадлежности конкретных деталей к группам.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим работу методики на использовании модельных данных. Пусть в результате выполнения этапов 1-3 получена таблица соответствия деталей операциям, выполняемым на производственном оборудовании. Фрагмент таких данных представлен в таблице 1, где на пересечении строки и столбца стоит единица, если для изготовления данной детали необходима технологическая операция с соответствующим кодом, ноль – если такая операция не нужна.

Таблица 1

Соответствие деталей технологическим операциям

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
Д01	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
Д02	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Д03	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0
...
Д25	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1

Вычисленные $w_{i,j}$ значения для каждой пары из 25 деталей приводятся в таблице 2.

Таблица 2

Вычисленные значения метрики

	Д01	Д02	Д03	...	Д25
Д01	-	0,71	0,63	...	0,5
Д02	0,71	-	0,78	...	0,78
Д03	0,63	0,78	-	...	0,67
...
Д25	0,5	0,78	0,67	...	-

Для поиска кластеров (групп деталей) на графе может быть использовано универсальное программное обеспечение [14], однако при увеличении количества деталей наглядность решения задачи кластеризации существенно страдает, а производительность подготовки входных данных падает, что обуславливает актуальность разработки специальных программных средств САПР. На рис.1 показана исходная сеть (полный граф) для решения модельной задачи с 25-ю деталями: вершины – номера деталей, а связывающие их дуги имеют параметры вычисленных метрик (таблица 2).

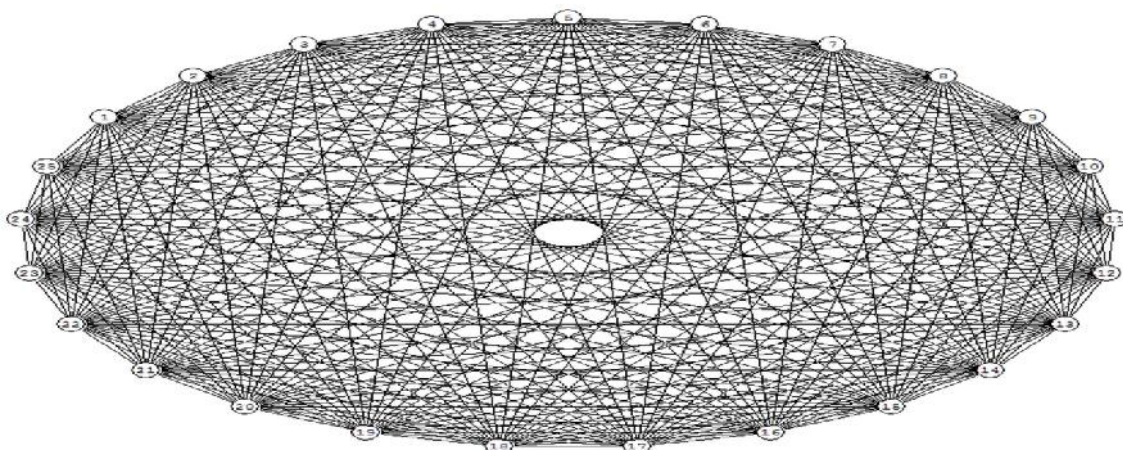


Рис.1. Исходная сеть для решения задачи о группировании деталей

На рис. 2 представлен вариант решения задачи поиска минимального остовного дерева с выделенными кластерами, представляющими собой группы деталей. Каждая группа деталей может быть основой для экспертного проектирования технологического процесса, а также для решения задачи об оптимальном размещении оборудования на производственном участке [15-17].

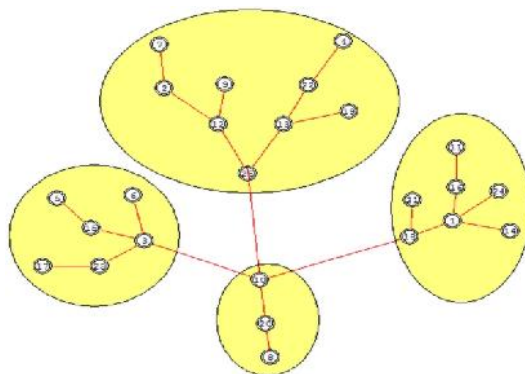


Рис.2. Решение задачи о группировании деталей: минимальное остовное дерево с выделенными кластерами (группы деталей)

Выводы

1. Групповые технологии в машиностроении являются важным аспектом концепции «бережливое производство».
2. При делении множества деталей на технологические группы фиксируется бинарное отношение толерантности (ослабленная форма эквивалентности).
3. Задача группирования деталей решается с помощью алгоритма минимального основного дерева и последующим анализа кластеров.
4. Решение задачи группирования может быть получено с применением универсального программного обеспечения или специальных программных средств в САПР.

Список литературы

1. Технологическая подготовка гибких производственных систем / С.П. Митрофанов, Д.Д. Куликов, О.Н. Миляев, Б.С. Падун. – Л.: Машиностроение, 1987. – 352 с.
2. Базров Б.М., Диланян Р.З., Мельников Г.Н. Групповая и модульная технологии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 92 с.
3. Куликов Д.Д., Падун Б.С., Яблочников Е.И. Перспективы автоматизации технологической подготовки производства // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2014. – Т. 57, № 8. – С. 7–11.
4. Родин А.В., Смирнов В.В. Анализ и синтез технологических процессов в САПР СПРУТ ТП // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 11-ой Всероссийской научно-практической конференции 27 марта 2013 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – С. 115–117.
5. Chiarini A. Lean organisation: from the tools of the Toyota Production System of lean office. – Milan; New York: Springer-Verlag Italia, 2013. – 165 p.
6. Sundara R, Balajib A.N., SatheeshKumar R.N. A review on lean manufacturing implementation techniques // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 97. – P. 1875–1885.
7. Падун Б.С., Рождественская М.Г., Бажанова В.А. Автоматизированная система группирования объектов производства // Известия вузов. Приборостроение. – 2010. – № 6. – С. 71–77.
8. Куликов Д.Д., Яблочников Е.И. Применение оценочных метрик для анализа технологической подготовки производства // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – № 6 (76). – С. 109–112.
9. Павлов В.В. Структурное моделирование в CALS-технологиях. – М.: Наука, 2006. – 307 с.
10. Моделирование и оптимизация технологических процессов механической обработки / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, О.И. Драчев, А.В. Капитанов, А.Н. Кравцов. – Волгоград: ВолГТУ; Тольятти: ОНИКС, 2013. – 457 с.
11. Анализ данных и процессов / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, И.И. Холод, М.Д. Тесс, С.И. Елизаров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 512 с.
12. Денисов А.Р. Выбор метода кластерного анализа для группирования деталей машиностроительного производства // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – Т. 32, № 2.3. – С. 350–353.
13. Смирнов В.В. К вопросу о выделении групп деталей в групповых технологиях машиностроения // Управление качеством образования, продукции и окружающей среды: материалы 9-й Всероссийской научно-практической конференции, 13–14 ноября 2015 г. – Бийск, 2015. – С. 153–156.
14. Печенкин В.В. GRaph INterface (GRIN) [Электронный ресурс] // ЭСМ:

Федеральный образовательный портал, 2008. – URL: <http://ecsocman.hse.ru/text/19282339/> (дата обращения: 21.03.2016).

15. Яблочников Е.И., Молочник В.И., Гусельников В.С. Метод разработки групповых технологических процессов для оборудования с числовым программным управлением // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, № 6. – С. 63–67.

16. Смирнов В.В., Шкурин В.В. Экспертная система технологического проектирования // Информационные технологии в науке, экономике и образовании: материалы всероссийской научно-практической конференции 16–17 апреля 2009 г. – Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2009. – Ч. 2. – С. 98–99.

17. Кутин А.А., Туркин М.В. Модель расстановки оборудования в условиях построения производственных ячеек замкнутого цикла // Вестник МГТУ Станкин. – 2011. – № 4. – С. 11–14.

FORMATION GROUP DETAILS IN GROUP TECHNOLOGIES ENGINEERING

Smirnov V. V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, v2s0@yandex.ru

Ovcharenko A. G., D.Sc. (Engineering), Professor, shura@bti.secna.ru

Biysk Technological Institute, Branch of Polzunov Altai State Technical University, 27 Trafimova st., Biysk, Altai region, 659305, Russian Federation

Abstract

The article presents the method of formation of groups of parts in the group technology of mechanical engineering. The technique is based on the calculation of metrics for the set of special structural features of details. The metric represents the measure of dissimilarity of the two parts in terms of group processing technology. The original mathematical grouping model is represented by an undirected complete graph. To search for groups of parts the problem of clustering by means of searching algorithm for a minimum spanning tree is solved. After analyzing the resulting graph it is being decided on the composition of groups of parts for designing of group technology and/or optimizing the production facilities at the site.

Keywords

mathematical modeling, machining, group technology

УДК 621.9.048.6

**ХАРАКТЕР НАСЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТНЫХ
И МИКРОГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ФИНИШНОЙ СТАДИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

*Ю.С. СЕМЕНОВА, канд. техн. наук, доцент
А.П. ЛИХАЧЕВ, магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Семенова Ю.С. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: nahat@yandex.ru

В данной работе рассмотрены особенности технологического наследования микрогеометрии и точности обработки на заключительных этапах механической обработки поверхностей деталей в технологических процессах, включающих ультразвуковое пластическое деформирование (УЗПД). Показано влияние исходной шероховатости поверхности перед УЗПД на окончательное состояние микрогеометрии. Предложен механизм назначения режимных параметров обработки, обеспечивающих формирование полностью нового регулярного микрорельефа без следов предшествующей обработки. С помощью математической модели определены границы значений параметра исходной шероховатости, в пределах которой на поверхности детали формируется полностью новый микрорельеф для реальных условий обработки. Получено экспериментальное подтверждение теоретических исследований. Также экспериментально установлено, что погрешность размеров после УЗПД уменьшается в пределах величины исходной шероховатости, что также соответствует основным положениям теории о технологическом наследовании.

Ключевые слова: Ультразвуковое пластическое деформирование, технологическое наследование, деформатор, шероховатость, поверхностный слой.

Введение

Согласно теории технологического наследования качество поверхностного слоя детали формируется поэтапно в ходе технологического процесса. При этом основной вклад в создание качества поверхности вносят заключительные операции [1-3]. Одним из перспективных методов обеспечения высоких эксплуатационных характеристик поверхности является ультразвуковое пластическое деформирование (УЗПД). Данный метод основан на пластическом деформировании поверхностного слоя, в результате которого формируется новый регулярный микрорельеф, снижается шероховатость, повышается микротвердость. При этом в поверхностном слое детали формируются благоприятные напряжения сжатия [3, 4]. Применение метода ультразвуковой обработки позволяет в широком диапазоне управлять параметрами качества поверхности, путем изменения режимов обработки. В работах [5, 6] показано, что существуют математические зависимости, устанавливающие взаимосвязь шероховатости и других геометрических параметров микрорельефа от режимов ультразвуковой обработки. Однако при недостаточном деформационном воздействии эти зависимости невозможно применить, поскольку не соблюдается условие формирования полностью нового рельефа - остаются следы предшествующей обработки.

В связи с этим данная работа посвящена:

- установлению взаимосвязей геометрических параметров исходной и окончательно обработанной поверхности;
- выявлению причин, устанавливающих ограничения по режимам обработки в связи с необходимостью получения полностью нового регулярного микрорельефа;
- установлению области режимных параметров, исключающих наличие следов предшествующей обработки после ультразвукового пластического деформирования.

Теоретические исследования

При УЗПД обработка осуществляется за счет сочетания вращения детали со скоростью (V_d , м/мин) и движения подачи (S , мм/об), сообщаемое деформатору, колеблющемуся с ультразвуковой частотой (f , Гц). (рис.1) [4]. Под действием статического усилия ($F_{ст}$, Н) и амплитуды (A , мкм), инструмент ударяется о поверхность детали, в результате чего формируются отпечатки, которые при наложении друг на друга образуют новый регулярный микрорельеф. При этом микронеровности, образовавшиеся на предшествующей обработке (точением, шлифованием или другими методами), примащаются. Таким образом, материал, формирующий микронеровности, перераспределяется по поверхности под действием деформирующего инструмента.

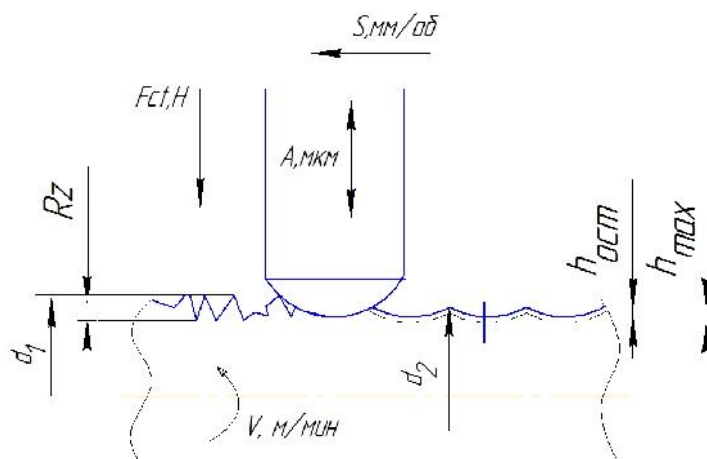


Рис. 1. Схема ультразвукового пластического деформирования

Предположим, что для обеспечения полностью нового микрорельефа достаточно, чтобы значение глубины внедрения деформатора h_{max} , мкм была не ниже величины исходной шероховатости Rz , т.е. $Rz \leq h_{max}$ [4, 5]. В этом случае необходимо назначить такие режимы, которые позволят обеспечить перекрытие следов исходной шероховатости и сформировать регулярный микрорельеф. Известно, что на глубину внедрения деформатора (h_{max}) влияют деформационные параметры обработки: статическое усилие прижатия инструмента к обрабатываемой детали - $F_{ст}$, частота (f) и амплитуда ($2A$) ультразвуковых колебаний. Имеющаяся установка для ультразвукового пластического деформирования позволяет управлять амплитудой лишь ступенчато за счет изменения мощности генератора ультразвуковых колебаний, а частота всегда остается постоянной. Поэтому для проведения исследований удобнее всего варьировать статическим усилием, поскольку его реализация осуществляется с помощью подвешивания груза соответствующей массы.

Расчет необходимого статического усилия $F_{ст}$ осуществлялся при помощи деформационной модели ультразвукового пластического деформирования [6]. Входными

данными для модели являются физико-механические свойства материала (HD – динамическая твердость, H/m^2 , μ – коэффициент Пуассона, E – модуль упругости, H/m^2), а также режимные параметры УЗПД (f – частота колебаний инструмента, Гц, $2A$ – амплитуда колебаний инструмента, мкм). Необходимые выходные данные – F_{ct} – статическое усилие, и h_{\max} – максимальная глубина внедрения деформатора. На рисунке 2. Представлен график, устанавливающий взаимосвязь F_{ct} и h_{\max} , пользуясь которым можно назначать статическое усилие, необходимое для перекрытия высоты микронеровностей, полученной на предшествующем этапе обработки.

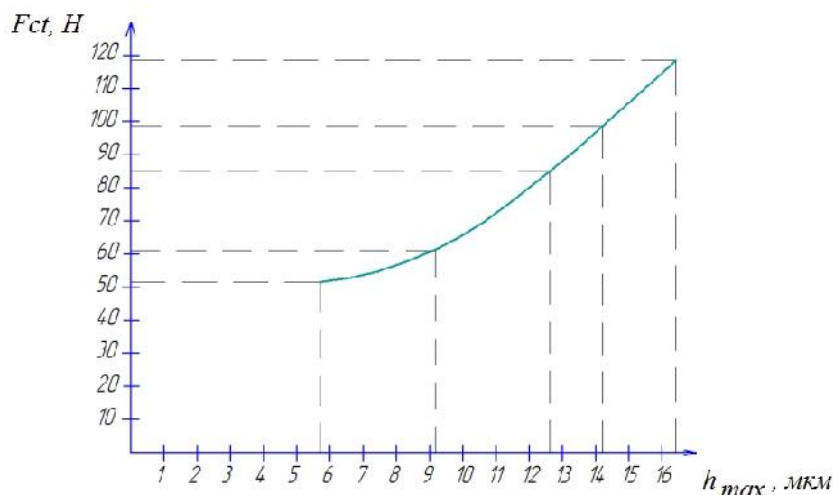


Рис. 2. Взаимосвязь статического усилия F_{ct} и максимальной глубины внедрения деформатора h_{\max}

При выборе режимов также необходимо учитывать, что для формирования нового микрорельефа должно выполняться условие перекрытия соседних отпечатков деформатора [6].

$$2\sqrt{D_c \times h_{\max}} \geq \sqrt{\left[S^2 + \left[\frac{VD \times (1-m)}{60 \times f} \right]^2 \right]} \times \sqrt{1 + \left(\frac{m \times VD}{60 \times f \times S} \right)^2} \quad (1)$$

где D_c – диаметр сферического наконечника, м; S – подача, мм/об; VD – скорость вращения детали, м/мин; f – частота колебаний ультразвукового инструмента, Гц; m – дробная часть числа фрагментов микрорельефа на одном витке при обработке цилиндрической поверхности.

Экспериментальные исследования

В качестве образцов использовались валы диаметром 50 мм из стали 45. Каждый образец был разделен на 6 участков (рис.3). При подготовке экспериментальных образцов учитывалось место УЗПД в технологическом процессе, т.к. оно относится к финишной обработке. На каждом из них проводилась токарная обработка для обеспечения исходной шероховатости. Токарная обработка проводилась на режимах: скорость $V=236$ м/мин ($n=1600$ об/мин), глубина резания $t=0.5$ мм. Диапазон подач в пределах от 0.07 до 0.34 мм/об. Материал режущей части Т15К6, радиус режущей кромки $R=1.2$ мм.

Для установления взаимосвязи между исходной и полученной после УЗПД шероховатости проводились ее измерения до и после УЗПД при помощи профилографа-профилометра модели 252. Для удобства расчетов режимов параметр шероховатости R_a

переводился в Rz. Затем, результатов исследований [2] проводились измерения диаметральных размеров каждого участка в двух взаимоперпендикулярных направлениях и рассчитывалось среднее значение.

Обработка УЗПД проводилась на следующих режимах: скорость $V=90$ м/мин, подача $S=0.07$ мм/об, частота колебаний $f=22600$ Гц, амплитуда $2A=25$ мкм. Статическое усилие $F_{ст}$, N назначалось в зависимости от значения исходной шероховатости в соответствии с зависимостью, установленной выше.



Рис. 3. Исследуемый образец

Результаты и обсуждения

В таблице 1 приведены измерения шероховатости поверхности до и после УЗПД. Из таблицы видно, что чем выше исходная шероховатость, тем больше разница ее значений после УЗПД, при этом шероховатость после УЗПД снижается, т.е. наблюдается повышение качества поверхности. Таким образом, подтверждаются основные положения о теории наследования характеристик поверхности от предшествующей обработки к последующей.

Таблица 1

Результаты измерений шероховатости до и после обработки

$Rz_{исх}$, мкм	Rz после УЗПД, мкм	$Rz_{исх}-Rz$, мкм
5.64	4.72	0.92
7.32	6.28	1.04
9.24	7.15	2.09
12.68	7.86	4.82
14.16	8.24	5.92
16.43	8.72	7.71

В таблице 2 представлены результаты измерения усредненных диаметральных участков опытного образца до и после УЗПД.

Таблица 2

Результаты измерения размеров до и после обработки

№ участка	Диаметр d_{1cp} до УЗПД, мм	Диаметр d_{2cp} после УЗПД, мм	$\Delta=d_{1cp}-d_{2cp}$, мм
1	45.06	45.05	0.01
2	45.33	45.32	0.01
3	45.21	45.2	0.01
4	44.68	44.58	0.1
5	46.43	46.3	0.11
6	45.14	45.01	0.13

Из таблицы 2 следует, что изменение размера Δ происходит в пределах высоты микронеровностей, полученных на предшествующем этапе обработки. Это явление обусловлено тем, что при ударе деформатора о поверхность образца происходит смятие микронеровностей, в результате чего происходит перераспределение материала в поверхностном слое. На рис. 4 представлены изображения поверхности детали после обработки УЗПД.

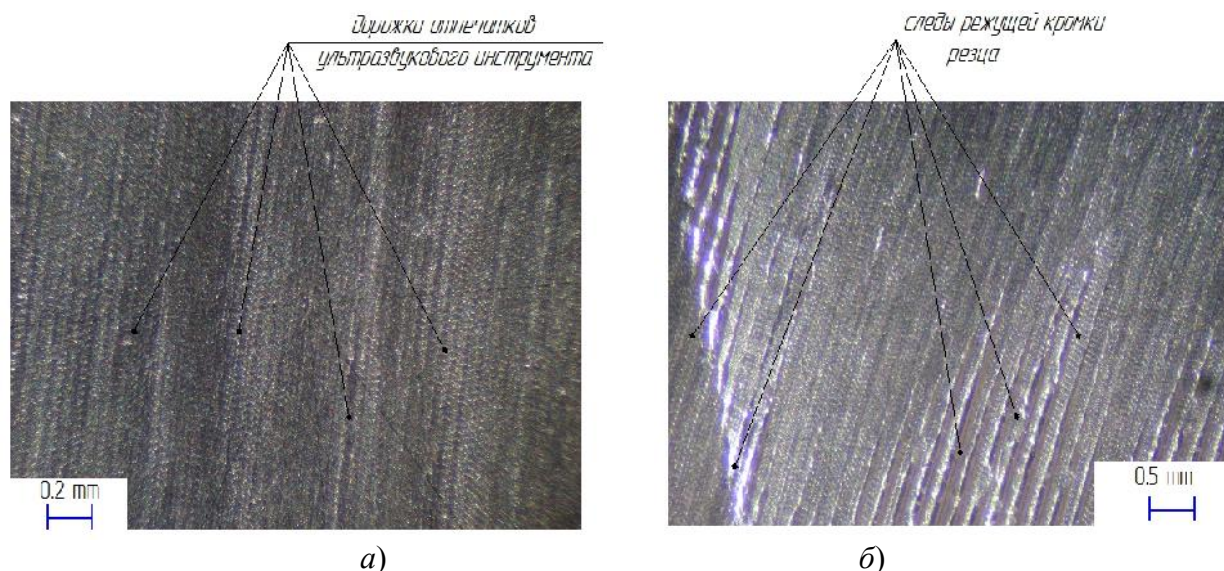


Рис. 4. Изображение поверхности детали после УЗПД

В первом случае (рис.4,а) назначены режимы, обеспечивающие получение полностью нового регулярного микрорельефа, а во втором (рис.4,б) выбрано статическое усилие, величина которого не обеспечивает внедрение инструмента на необходимую глубину. Это привело к появлению на обработанной поверхности следов предшествующей обработки в виде отдельных фрагментов канавок режущей кромки резца.

Выводы

В ходе проведенных исследований произведен подбор режимных параметров на этапе полустойковой токарной обработки с последующей обработкой УЗПД. Так, изменение размера после УЗПД происходит в пределах высоты микронеровностей, которые были получены при токарной обработке. Представлена взаимосвязь, в которой показано, что технологическое наследование качества поверхности имеет место при назначении не соответствующих режимов. В частности, недостаточное статическое усилие приводит к появлению следов предшествующей обработки в виде канавок режущей кромки токарного резца на обработанной поверхности детали (рис.4, б). Т.е. не происходит формирование нового микрорельефа.

Список литературы

1. Блюментейн В.Ю. Структурные модели технологического наследования // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 1. – С. 23–31.

2. Технологическое управление наследованием эксплуатационных показателей качества упрочненных поверхностей / А.С. Васильев, А.И. Кондаков, С.А. Клименко, М.Л. Хейфец, В.А. Гайко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 1. – С. 32–38.

3. *Безнедельный А.И., Асанов В.Б., Гилета В.П.* Влияние технологической наследственности на формирование качества поверхностного слоя закаленных сталей при упрочняюще-чистовой обработке ультразвуковым инструментом // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 4. – С. 19–22.

4. *Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С.* Прогнозирование геометрического состояния поверхности цилиндрических деталей из стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 3 – С. 11–17.

5. *Rakhimyanov Kh., Semyonova J., Eryomina A.* Technological peculiarities providing the surface quality parameters at ultrasonic surface hardening // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014. – P. 482–486.

6. Высокоэнергетические процессы обработки материалов / О.П. Солоненко, А.П. Алхимов, В.В. Марусин, А.М. Оришич, Х.М. Рахимьянов, Р.А. Салимов, В.Г. Щукин, В.Ф. Косарев. – Новосибирск: Наука, 2000. – 425 с. – (Низкотемпературная плазма; т. 18).

CHARACTER OF SURFACE MICROGEOMETRIC PARAMETERS AND ACCURACY INHERITANCE WHEN USING ULTRASONIC SURFACE HARDENING AT FINISHING STAGE OF MACHINING

Semenova Iu. S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: nahat@yandex.ru

Likhachev A. P., Master's Degree student, e-mail: andrei5431992@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

In this paper, the problem of technological inheritance of microgeometry and machining accuracy at the final stages of parts surfaces machining are considered. Features of ultrasonic surface plastic deformation role in technological inheritance are investigated. The influence of initial surface roughness before ultrasonic surface plastic deformation on the final microgeometry state is shown. A mechanism for processing parameters establishing, which ensuring the formation of a completely new regular microrelief without traces of previous processing suggested. The boundaries of the initial roughness value within which the part surface is completely new microrelief is formed are defined for the real processing conditions. Defining of boundaries was carried out by mathematical modeling. An experimental confirmation of theoretical studies is obtained. It is also experimentally found that after ultrasonic surface plastic deformation the size difference decreases within the magnitude of the initial roughness. This result is consistent with the basic laws of the theory of technological inheritance.

Keywords

ultrasonic surface plastic deformation, technological inheritance, deformer, surface roughness, surface layer.

УДК 691.791.631

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
МОДЕРНИЗИРОВАННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ
ГАЗОПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ**

А.И. ЩЁТКИН, аспирант
В.С. КИСЕЛЕВ, канд. техн. наук, доцент
М.В. РАДЧЕНКО, доктор техн. наук, профессор
(АлтГТУ, г. Барнаул)

Щёткин А.И. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова,
e-mail: aleksandr.shetkin@inbox.ru

В данной работе выполнены конструкторско-технологические исследования ранее запатентованного устройства для сверхзвуковой газопорошковой наплавки (СГП-наплавки) защитных покрытий [4]. Сформулированы основные требования, предъявляемые к модернизированному устройству. На основе полученных данных выполнено проектирование и изготовление устройства для СГПН-наплавки. Разработан алгоритм подготовки и настройки оборудования.

Ключевые слова: защитные покрытия; сверхзвуковая газопорошковая наплавка; напыление; разработка и изготовление газопламенного оборудования; сопло Лавалья; число Маха; критическое сечение; высокоточное оборудование; программный комплекс SolidWorks 2016; компьютерное моделирование; обжатие газопорошковой струи; алгоритм подготовки и настройки оборудования.

Введение

Промышленная безопасность при эксплуатации высоконагруженных машин и механизмов в большой степени зависит от их надёжности и долговечности. Одним из важных показателей при этом является износостойкость поверхностных слоев деталей – даже относительно небольшое повышение износостойкости дает значительный экономический эффект. Одним из наиболее прогрессивных и эффективных направлений создания деталей с заданными свойствами на их рабочих поверхностях является нанесение защитных покрытий с использованием концентрированных потоков энергии [1].

Среди различных методов нанесения покрытий в последние годы активно развиваются методы с использованием концентрированных сверхзвуковых газовых струй, в частности процессы напыления порошковых износостойких материалов [2].

Однако, как и всем методам напыления, этому методу присущ практически неустранимый недостаток – возможность с течением времени отслоения покрытия от основы, что снижает уровень промышленной безопасности при эксплуатации оборудования.

Эта проблема решается заменой процесса напыления на процесс создания неразъёмного соединения покрытия с поверхностью детали – наплавкой с использованием сверхзвуковых газопорошковых струй [3, 4].

Технология и аппаратура для сверхзвуковой газопорошковой наплавки самофлюсующихся порошковых сплавов системы Ni–Cr–B–Si на поверхности деталей

позволяет получить износостойкие комбинированные покрытия, устойчивые к различным видам износа в различных отраслях промышленности, включая машиностроение, в том числе и оборонное, теплоэнергетику.

Однако процесс наплавки на рынке российских технологий существует всего порядка 10 лет и при всей перспективности является малоизученным.

Целью работы является модернизация конструкции ранее запатентованного устройства для сверхзвуковой газопорошковой наплавки многофункциональных защитных покрытий.

Теория. Методика исследования. Материалы

При проведении конструкторско-технологических исследований были выявлены основные недостатки существующего оборудования, на основе этого выделены основные требования, предъявляемые к новому модернизированному устройству:

- более интенсивное охлаждение сверхзвуковой горелки;
- увеличение скорости и повышение ламинарности газовой струи;
- стабилизация и увеличение потока порошковой смеси;
- стабилизация сверхзвуковой газопорошковой струи.

В соответствии с сформулированными требованиями были поставлены и решены следующие задачи:

- увеличение диаметра каналов с целью свободного прохождения охлаждающей жидкости через все горелку;
- расчет, проектирование и изготовление сопел с числом Маха М4 и М6;
- изготовление внутреннего профиля сопел с более плавной конфигурацией (без переломов);
- изготовление канала подачи порошка не перпендикулярно газовой струе, а под максимально острым технически реализуемым углом для увеличения степени ламинарности газопорошкового потока;
- увеличение толщины стенки между каналом с охлаждающей жидкостью и каналом подачи порошка с целью минимизации конденсата в каналах, затрудняющего подачу наплавляемого материала;
- исследование влияния конфигурации насадок на сопла на процесс формирования газопорошковой струи в условиях её обжатия сжатым воздухом.

Помимо этого, конструкция пистолета должна быть надежной, простой в изготовлении и обслуживании, а также соответствовать всем современным нормам и правилам.

На современном этапе развития средств компьютерного моделирования процесс проектирования любого изделия сложно представить без проведения инженерного анализа, в том числе прочностного, теплового, электромагнитного и т.д. Инженерные расчеты призваны сократить время, затрачиваемое специалистом на поиск рациональных конструктивных решений, позволяют избежать ошибок до начала изготовления изделия, свести до минимума количество натурных испытаний и в кратчайшие сроки получить приемлемый результат.

Для проектирования модернизированного пистолета для СГП-наплавки был использован современный программный комплекс SolidWorks 2016, предназначенный для автоматизации работ промышленных предприятий на этапах конструкторской и технологической подготовки производства.

Результаты и обсуждение

Редактор SolidWorks 2016 позволяет создавать трехмерные модели отдельных деталей, сборочные единицы, состоящие из нескольких деталей, и чертежи по деталям.

Все детали новой конструкции горелки были изготовлены на токарно-фрезерном обрабатывающем центре высокой точности DMG 1250 CTX Beta.

Для изготовления внутреннего профиля сопел Лавая был разработан уникальный осевой режущий инструмент (зенкер), который, в свою очередь, был изготовлен на шлифовально-заточном станке ANCA RX7 из твердосплавного материала (рис. 1).

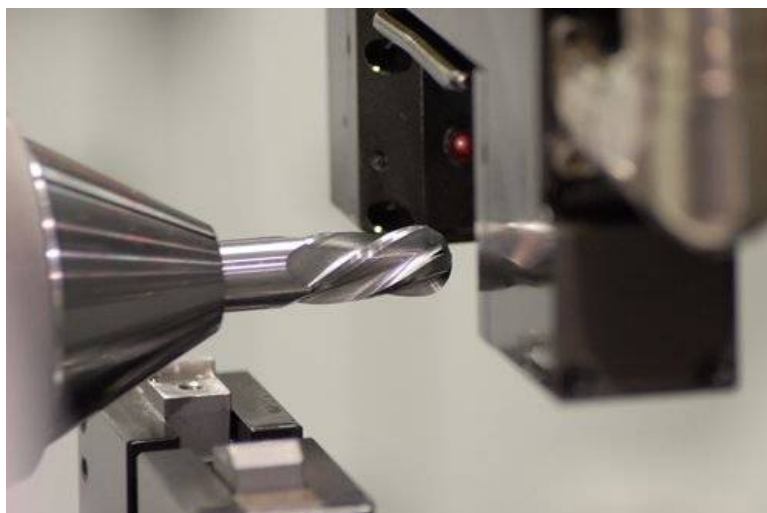


Рис. 1. Изготовление уникального зенкера на шлифовально-заточном станке ANCA RX7

Основная сложность заключалась в изготовлении критического сечения сопла, диаметр которого менее миллиметра. Расчетные значения диаметров критических сечений экспериментальных сопел Лавая (рис. 2) для чисел маха M2, M4 и M6 составляют 0,9; 0,7 и 0,5 мм соответственно. Данная операция была проделана на электроэрозионном микрофрезерном станке SARIX SX200 (Швейцария). Внутренняя поверхность отполирована вручную высококвалифицированным доводчиком.

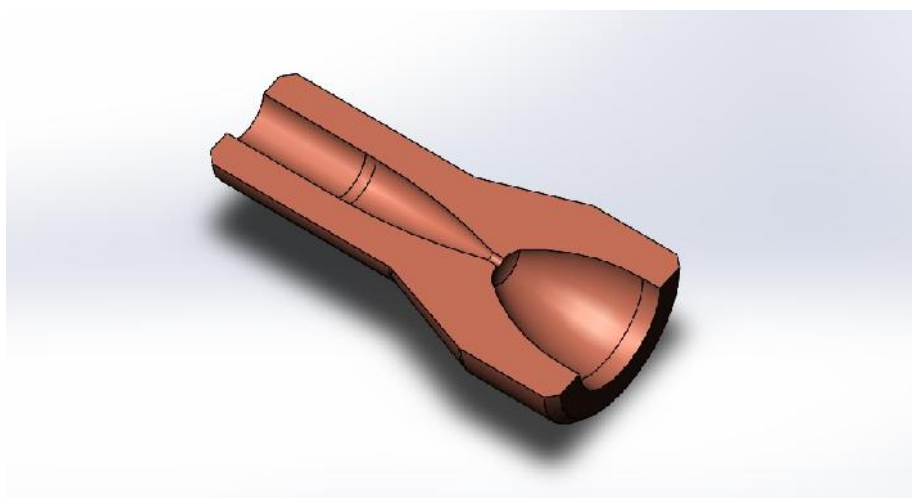


Рис. 2. Модель экспериментального сопла Лавая в разрезе

Смеситель и рукоятка были заимствованы от наиболее отработанного технологического оборудования для нанесения покрытий способом газопорошкового напыления «КЕДР». Внешний вид представлен на рисунке 3.

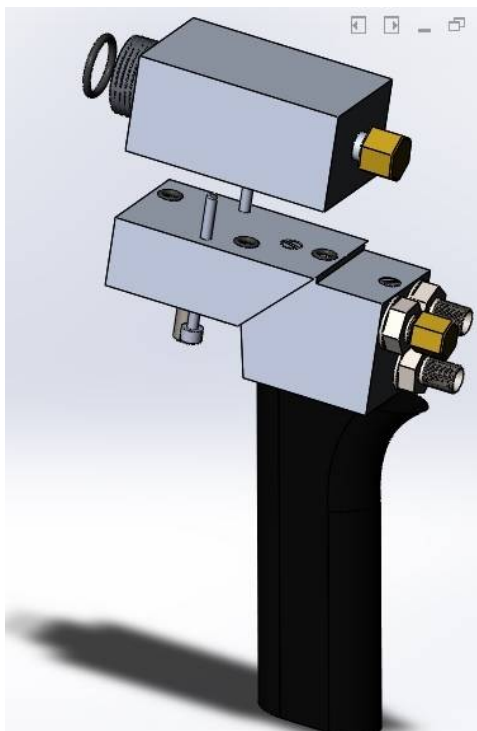


Рис. 3. Модель смесителя установки «Кедр»

Таким образом, новая горелка изготовлена из восьми составных частей, выполняющих разные функции. Для быстрой смены сопла и простоты разборки пистолета был изготовлен специализированный ключ, позволяющий выполнять им одним сборку всей конструкции (рисунок 4).

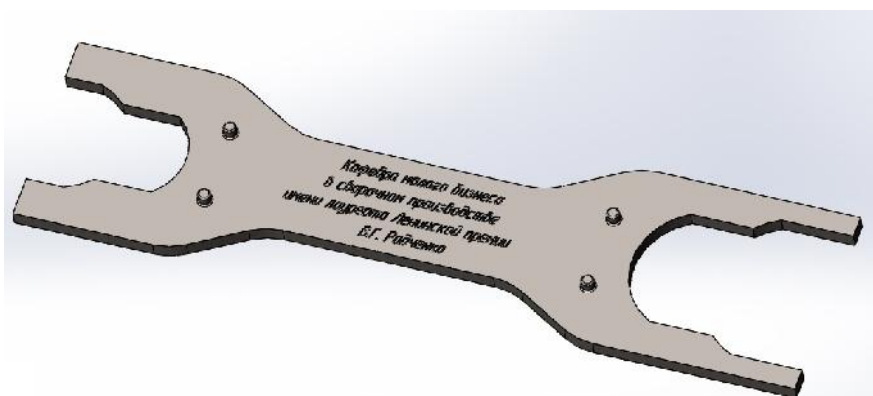


Рис. 4. Специализированный ключ для сборки сверхзвукового устройства для наплавки (с гравировкой)

Для реализации технологического процесса СГП-наплавки износостойких покрытий с использованием модернизированного устройства был разработан алгоритм подготовки и настройки оборудования, представленный на рисунке 5.

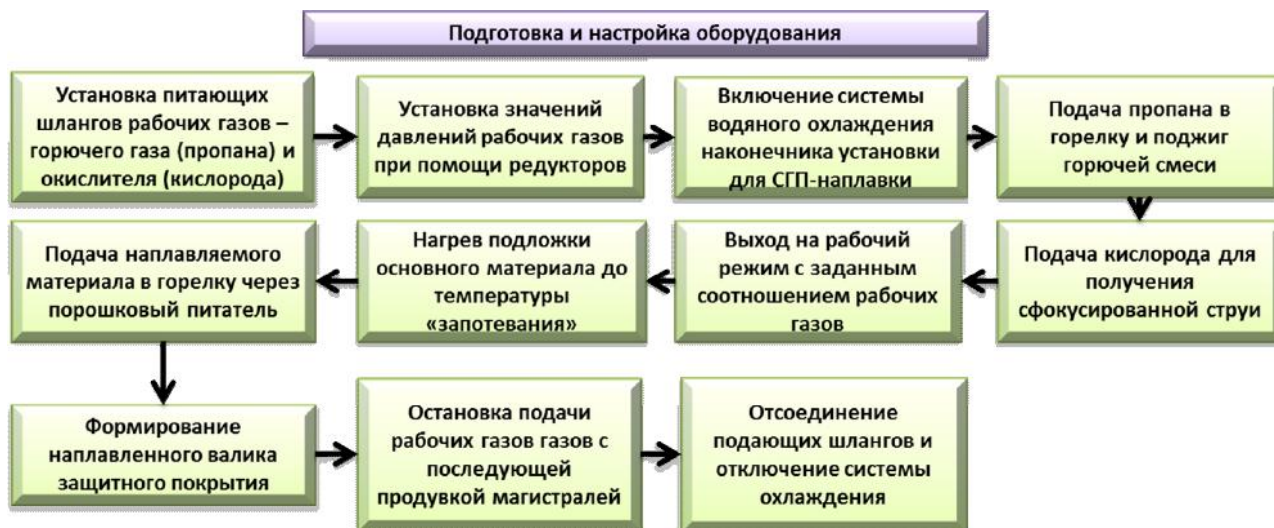


Рис. 5. Алгоритм подготовки и настройки оборудования

Выводы

Таким образом, для реализации данного проекта были проведены конструкторско-технологические исследования с помощью передовых современных средств автоматизированного проектирования. Модернизированное устройство стало обладать следующими качественными характеристиками:

- увеличенным диаметром каналов, обеспечивающих свободное прохождения охлаждающей жидкости через сопло Лавалья;
- каналами подачи порошка под максимально острым технически реализуемым углом, что должно положительно влиять на увеличение степени ламинарности газопорошкового потока;
- уменьшенной вероятностью образования конденсата в каналах, затрудняющего подачу порошкового сплава за счёт увеличенной толщиной стенки между каналом с охлаждающей жидкостью и каналом подачи порошка;
- наличием насадок на сопла различной конфигурации для обжата газопорошковой струи.

Для реализации процесса наплавки защитных покрытий с использованием модернизированного устройства был разработан алгоритм подготовки и настройки оборудования для наплавки.

Список литературы

1. Радченко М.В., Киселев В.С. Разработка технологии создания защитных покрытий для повышения надежности и безопасности промышленного производства // Проблемы техносферной безопасности – 2015: I Международная заочная научно-практическая конференция (10 февраля 2015 г.): сборник статей / под ред. А.А. Мельберт, М.Н. Вишняк. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015. – С. 163–165.
2. Praxair surface technologies – TAFA: HP/HVOF equipment solutions. – 2009.
3. Патент 60410 Российская Федерация, МПК В 22 В 19/06. Устройство для сверхзвуковой газопорошковой наплавки / М.В. Радченко, Ю.О. Шевцов, Т.Б. Радченко, Д.А. Нагорный, С.А. Маньковский. – Заявл. 04.07.2006; опубл. 27.01.2007, Бюл. № 3.

4. Патент 2346077 Российская Федерация. Способ сверхзвуковой газопорошковой наплавки / М.В. Радченко, Ю.О. Шевцов, Т.Б. Радченко, В.В. Игнатьев. – Заявл. 19.03.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4.

DESIGNING AND MANUFACTURING THE MODERNIZED SUPERSONIC GAS-POWDER CLADDING TORCH

Shchetkin A. I., Ph.D. student, e-mail: aleksandr.shetkin@inbox.ru

Kiselev V. S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: smallal@inbox.ru

Radchenko M. V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mirad_x@mail.ru

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenin Prospekt, Barnaul, Altai region, 656038,
Russian Federation

Abstract

The work carried out engineering and technological research equipment for spraying and surfacing of powder coatings. Highlight the advantages of surfacing before spraying. The results of the modernization construction of the previously patented device for supersonic gas-powder cladding coatings. The basic requirements to develop a device. Design gun SGPC accomplished by modern software SolidWorks 2016. The technology of production of the main parts of the modernized installation. Solved completely all the tasks. In addition, it presents a solution for quick change of a Laval nozzle, as well as to simplify the assembly and disassembly process in the form of a specialized key. On the basis of the data on the modern high-precision equipment manufactured device for supersonic gas-powder cladding coatings. An algorithm for training and equipment settings.

Keywords

protective coatings; supersonic gas-powder cladding; spraying; development and production of flame equipment; Laval nozzle; Mach number; critical section; precision equipment; SolidWorks 2016 software package; computer modeling; compression gas powder jet; algorithm for training and equipment settings

УДК 621.793.79

**ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОДЕТОНАЦИОННЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПОРШНЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО
СГОРАНИЯ**

А. В. СОБАЧКИН, магистрант
А. А. СИТНИКОВ, доктор техн. наук, профессор
В. И. ЯКОВЛЕВ, канд. техн. наук, доцент
А. П. СВИРИДОВ, аспирант
(АлтГТУ, Барнаул)

Собачкин А. В. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
e-mail: anicpt@rambler.ru

Исследованы износостойкие и антифрикционные свойства покрытий поршня двигателя внутреннего сгорания, полученные в результате газодетонационного напыления алюмоматричного композиционного материала. Установлено, что износостойкость и антифрикционные свойства подобных покрытий намного превосходят свойства алюминиевого поршневого сплава.

Ключевые слова: композиционный материал, газодетонационное напыление, поршень, покрытие, износостойкость, антифрикционность.

Введение

Надежность и долговечность автомобильного и других видов транспорта во многом обусловлены явлениями трения и изнашивания, происходящими в узлах машин. Изнашивание приводит к нарушению герметичности узлов, теряется точность взаимного расположения деталей и перемещений. Возникают заклинивания, удары, вибрации, приводящие к поломкам. В частности, поршень двигателя внутреннего сгорания – одна из ответственных деталей, требования к качеству которой ужесточаются ввиду необходимости форсирования ДВС. Во время работы двигателя на поршень действуют высокие механические и тепловые нагрузки, например, перезагрузка достигает значений в 1500-2000g, а рабочая температура составляет 1800-2600 °С. Поэтому, условия работы материала поршня можно определить как очень сложные [1].

В последние годы на юбку поршней стали наносить покрытие типа Grafal, которое представляет собой графит со специальным наполнителем, обеспечивающим прочное сцепление со стенкой юбки [2]. Подобное покрытие существенно влияет на износостойкость поршня, однако имеет целый ряд недостатков, таких как задиры юбки на нерасчетных режимах, например при запуске и прогреве, когда условия смазки ухудшены.

Устранить недостатки применяемых материалов позволяет использование композиционных материалов с металлической матрицей, упрочненной высокомолекулярными армирующими частицами [3, 4]. Наибольшее распространение получили алюмоматричные композиционные материалы, упрочненные частицами оксидов, карбидов, нитридов, волокнами графита, бора и т.п. [5, 6]

В данной работе исследуются возможности повышения износостойкости и управления трением за счет применения новых материалов покрытий на юбке поршня ДВС.

Цель данной работы заключается в определении некоторых триботехнических характеристик поршня дизельного двигателя с нанесенным газодетонационным методом покрытием из алюмоматричного композита.

Методика экспериментального исследования

В качестве материала для детонационного напыления были выбраны порошковые композиционные материалы, состоящие из алюминиевой матрицы и распределенными в ней наноразмерными частицами по типу углеродных наноструктур [7]. Применение подобных материалов обусловлено разработкой технологии детонационно-газового напыления антифрикционных покрытий поршня двигателя внутреннего сгорания. Напыление проводилось двумя составами:

- 1) 70% Al + 30% C + B₄C;
- 2) 70% Al + 30% УДА + B₄C.

Исследование износостойкости и антифрикционных свойств полученных покрытий проводилось в условиях трения пары диск-колодка на триботехническом комплексе. В основе комплекса лежит машина для испытания материалов на трение 2168 УМТ, оснащенная компьютером с программным обеспечением, позволяющим управлять машиной трения. Она предназначена для испытания фрикционных и смазочных материалов на трение и износ в широком диапазоне нагрузок, скоростей и схем испытаний.

Испытания производились по схеме «диск-колодка» при вращательном движении в режиме как сухого трения, так и при выбранном режиме смазки.

Для испытания колодка устанавливается в корпус, а диск на оправку.

Проводилась 2 серии эксперимента: в первом случае, на колодку из сплава АК21М2,5Н2,5 происходило напыления покрытий, а материал диска – сталь 40. Во второй серии колодки и диска менялись.

Условия испытания на задир заключались в предварительной приработке покрытия при скорости 0,9 м/с и нагрузке 1,47 МПа с последующим ступенчатым нагружением вплоть до резкого увеличения силы и момента трения. Условия испытания были следующими: скорость составляла 0,9 м/с; нагрузка 6,37...7,35 МПа; время испытания 6 часов; смазка (в некоторых экспериментах) 20 капель/с.

Результаты и обсуждение

Нагрузить диски с покрытиями до задира при выбранном режиме смазки (20 капель масла М12В в минуту), обеспечивающем граничное трение, не удалось вплоть до нагрузки 9,8 МПа, в то время как на ролике из поршневого сплава АК21М2,5Н2,5 начинают появляться следы задира при 4,41...4,9 МПа, а при 6,86 МПа наступает схватывание со шлифованной поверхностью колодки.

Зависимость коэффициента установившегося трения покрытий от нагрузки показана на рисунке. 1. Видно, что при нагрузке свыше 7,85 МПа появились локальные очаги схватывания покрытия состава № 2, однако до 9,81 МПа явления задира не наблюдалось.

Коэффициент трения покрытия состава № 2 при нагрузках 2,94...6,86 МПа не превышает 0,03, а минимальное значение коэффициента (0,02) достигается при 5,88 МПа. Для покрытия состава № 1 коэффициент трения до нагрузки 8,83 МПа не превышает 0,025, а минимальное значение – 0,015 в широком интервале нагрузок от 4,9 до 6,86 МПа.

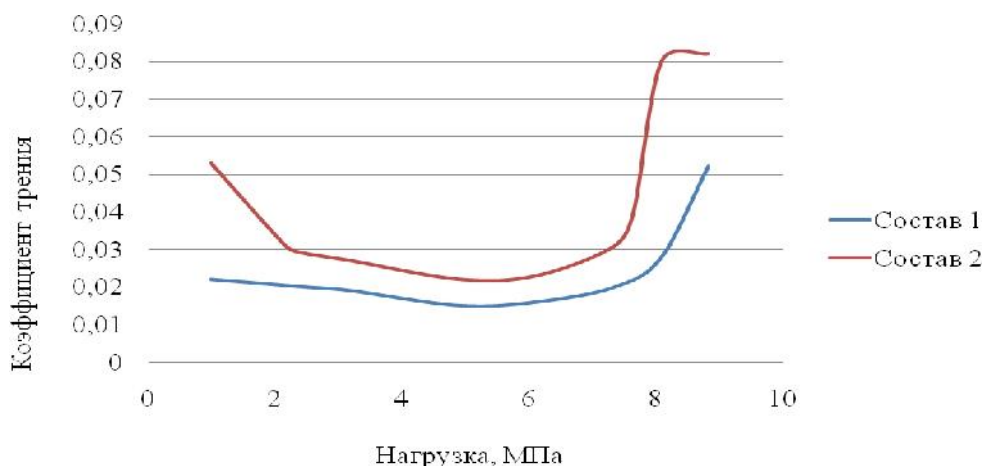


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения покрытий от нагрузки:
Состав 1 – 70% Al + 30% С + В4С; Состав 2 – 70% Al + 30% УДА + В4С.

Испытания на износ проведены в условиях, показанных в таблице. Здесь же даны для сравнения результаты испытания АК21М2,5Н2,5.

Таблица

Параметры и результаты трения и износа

Материал диска/покрытия	Условия испытания на износ				Момент трения, Н	Коэффициент трения	Нагрузка задира, МПа	Относительная износостойкость, %
	Скорость, м/с	Нагрузка, МПа	Время, ч	Смазка, капель/с				
Состав 1	0,9	7,35	6	20	0,59	0,018	>9,81	95
Состав 2		7,35			2,65	0,035	>9,81	93
АК21М2,5Н2,5		5,37			4,71	0,06	6,96	80

Износостойкость измеряли по потере массы трущихся тел: относительную износостойкость брали как отношение уменьшения массы образца после испытания к первоначальной массе этого же образца и выразили в процентах.

Из приведенных в таблице данных видно, что износостойкость и антифрикционные свойства образцов с покрытиями намного превосходят свойства стандартного алюминиевого поршневого сплава.

Таким образом, исследования газодетонационных покрытий на основе алюмоматричного композиционного материала, напыленных на алюминиевые поршневые сплавы, показали, что комплекс физико-механических свойств покрытий обеспечивает возможность их использования в качестве антифрикционных и износостойких на поршнях дизелей.

Выводы

1. Проведено исследование коэффициента трения покрытий на основе алюмоматричного композиционного материала. Установлено, что минимальное значение коэффициента трения покрытия состава № 1 (70% Al + 30% С + В4С) составляет 0,015 в

широком интервале нагрузок от 4,9 до 6,86 МПа. Коэффициент трения покрытия состава № 2 (70% Al + 30% УДА + В4С) достигает своего минимального значения, равного 0,02, при 5,88 МПа.

2. Износостойкость и антифрикционные свойства образцов с покрытиями намного превосходят свойства стандартного алюминиевого поршневого сплава.

Список литературы

1. Лобанов В.К., Чуйкова Е.В. Выбор технологии изготовления поршней ДВС // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 12. – С. 10–12.
2. Хрулев А. Современные поршни // Автомобиль и сервис. – 2007. – № 11. – С. 21–23.
3. Литые дисперсно-упрочненные алюмоматричные композиционные материалы: изготовление, свойства, применение: монография / Т.А. Чернышова и др. – Ульяновск: Изд-во УЛГТУ, 2012. – 296 с.
4. Yakovlev V.I., Sobachkin A.V., Sitnikov A.A. Application of self-propagating high-temperature synthesis and mechanoactivating treatment for producing multi-component composite alloying materials // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 173–177.
5. Effect of modification and ceramic particles on solidification behavior of aluminum-matrix composites / Sh. Wu, Ya. You, P. An, T. Kanno, H. Nakae // Journal of Materials Science. – 2002. – Vol. 37, N 9. – P. 1855–1860.
6. Combustion modes of nanoscale energetic composites / S. Son, G.M. Dutro, K.M. Zaseck, D.J. Vandewalle, R.V. Reeves // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. – 2009. – Vol. 8, N 4. – P. 309–319.
7. Особенности формирования покрытий из алюмоматричного углеродсодержащего композиционного материала при газодетонационном напылении / А.В. Собачкин, В.И. Яковлев, А.А. Ситников, М.В. Логинова, С.Г. Иванов, А.П. Свиридов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2015. – Т. 12, № 4. – С. 444–449.

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF GAS DETONATION COMPOSITE COATINGS FOR PISTONS OF COMBUSTION ENGINES

Sobachkin A. V., Master's Degree student, e-mail: anicpt@rambler.ru

Sitnikov A. A., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: anicpt@rambler.ru

Yakovlev V. I., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: anicpt@rambler.ru

Sviridov A. P., Ph.D. student, e-mail: anicpt@rambler.ru

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenin Prospekt, Barnaul, Altai region, 656038,
Russian Federation

Abstract

It is investigated the wear resistance and antifriction properties of coatings of piston internal combustion engine, obtained through gas detonation spraying alumo matrix composite. It was found that the wear resistance and antifriction properties of these coatings are far superior to the properties of standard aluminum alloy piston. It is found that the minimum value of the coefficient of friction coating composition № 1 (70% Al + 30% C + В4С) is 0.015 in a wide load range from 4.9 to 6.86 МПа. The coefficient of friction coating composition № 2 (70% Al + 30% of the UDA + В4С) reaches its minimum value equal to 0.02, at 5.88 МПа.

Keywords

composite material, detonation-gas spraying, piston, cover, wear resistance, antifriction

УДК 621.9.047

**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ РАСТВОРЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
«АЛЮМИНИЙ-ТИТАН» В ВОДНОМ РАСТВОРЕ НИТРАТА НАТРИЯ И ХЛОРИДА
НАТРИЯ***А.В. ЖУРАВЛЕВА, магистрант
А.С. ЮСУПОВ, магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Журавлева А.В.– 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: sashka093@mail.ru

Проведены поляризационные исследования анодного поведения композиционного материала «алюминий-титан». Опыты проводятся потенциодинамическим методом, потенциал изменяется от 0 до 8В. По полученным данным построены поляризационные кривые. При растворении композиционного материала Al-Ti в водном растворе 10% NaNO₃ наблюдается повышение плотности тока до 7 А/см² при увеличении потенциала до 3,5 В. Последующее повышение потенциала до 8 В сопровождается снижением плотности тока. Вероятно, установленное снижение плотности тока при повышении потенциала связано с образованием окисной пленки на поверхности анода. Показано, что при электрохимической обработке композиционного материала Al-Ti в водных растворах NaNO₃ и NaCl происходит растворение только алюминия. Титановая составляющая пассивируется в исследуемых электролитах.

Ключевые слова: трехэлектродная электрохимическая ячейка, вспомогательный электрод, электрод сравнения, электрохимическая струйная обработка, анодное растворение, композиционные материалы.

Введение

Во многих отраслях промышленности применяются композиционные материалы. Эти материалы состоят из двух или более компонентов и обладают уникальными свойствами, такими как прочность, электропроводность и другие. Соединение в одно целое компонентов осуществляется методами электронно-лучевой наплавки, пропиткой волокон расплавами металлов, сваркой взрывом и другими способами [1]. В результате совмещения этих элементов образуется комплекс свойств материала, не только отражающий исходные характеристики его компонентов, но и включающий свойства, которыми первоначальные компоненты не обладают. Такие материалы широко применяются в электроэнергетике, машиностроении и других отраслях.

Следует отметить, что при механической обработке композиционных материалов могут возникать сложности в назначении режимов резания. Выбор режимов резания может быть осуществлен для одного элемента композиции. Однако это может приводить к ухудшению качества при обработке всей композиции. Кроме того полученные указанными выше методами композиции могут обладать высокими прочностными характеристиками, что предъявляет определенные требования к выбору способов последующей обработки. В работах [2] показано, что композиционные материалы могут обрабатываться при помощи

плазменной резки. Одним из методов формообразования изделий из композиционных материалов может являться электрохимическая обработка [3-5]. Однако в процессе электрохимического растворения зачастую происходит пассивация поверхности, что замедляет процесс обработки, а соответственно, снижает производительность [6, 7]. Решение этого вопроса возможно за счет применения струйной электрохимической обработки [8]. Однако для эффективного применения указанного способа при обработке композиционных материалов требуется выявление особенностей электрохимического растворения материала в электролитах.

Методика экспериментального исследования

Изучение особенностей электрохимического растворения возможно на основе проведения поляризационных исследований. Для исследований анодного поведения композиционных материалов использовался потенциостат П-5827М.

В качестве образца для эксперимента использовался композиционный материал «алюминий-титан» (рис.1).

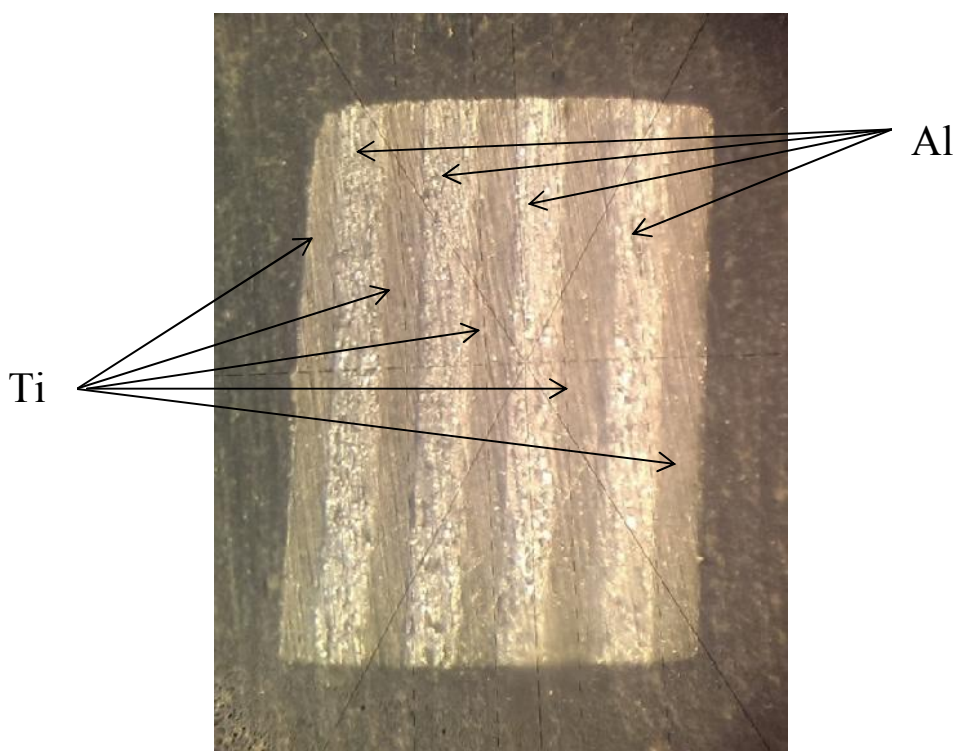


Рис. 1. Образец композиционного материала Al-Ti

Подготовка образца включала в себя заливку в оправку эпоксидным клеем. Перед каждым экспериментом производилась зачистка торцевой поверхности образца на наждачной бумаге. Образец помещался в трехэлектродную электрохимическую ячейку с электролитом. Потенциал изменялся от 0 до 8В [9]. В качестве электролитов применялись водные растворы нейтральных солей 10% NaNO_3 и 10% NaCl .

Результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментальных исследований были построены поляризационные кривые (рис.2). Из рисунка 2,а видно, что происходит повышение плотности тока до 7 A/cm^2 при увеличении потенциала до $3,5 \text{ В}$ при анодном растворении в $10\% \text{ NaNO}_3$. Последующее повышение потенциала до 8 В сопровождается снижением плотности тока. Вероятно, снижение плотности тока при повышении потенциала связано с образованием окисной пленки на поверхности анода. Характер растворения композиционного материала Al-Ti в растворе $10\% \text{ NaCl}$ отличается от рассмотренного выше. Из рисунка 2,б видно, что электрохимическое растворение композиционного материала происходит в активном состоянии во всем исследуемом диапазоне потенциалов.

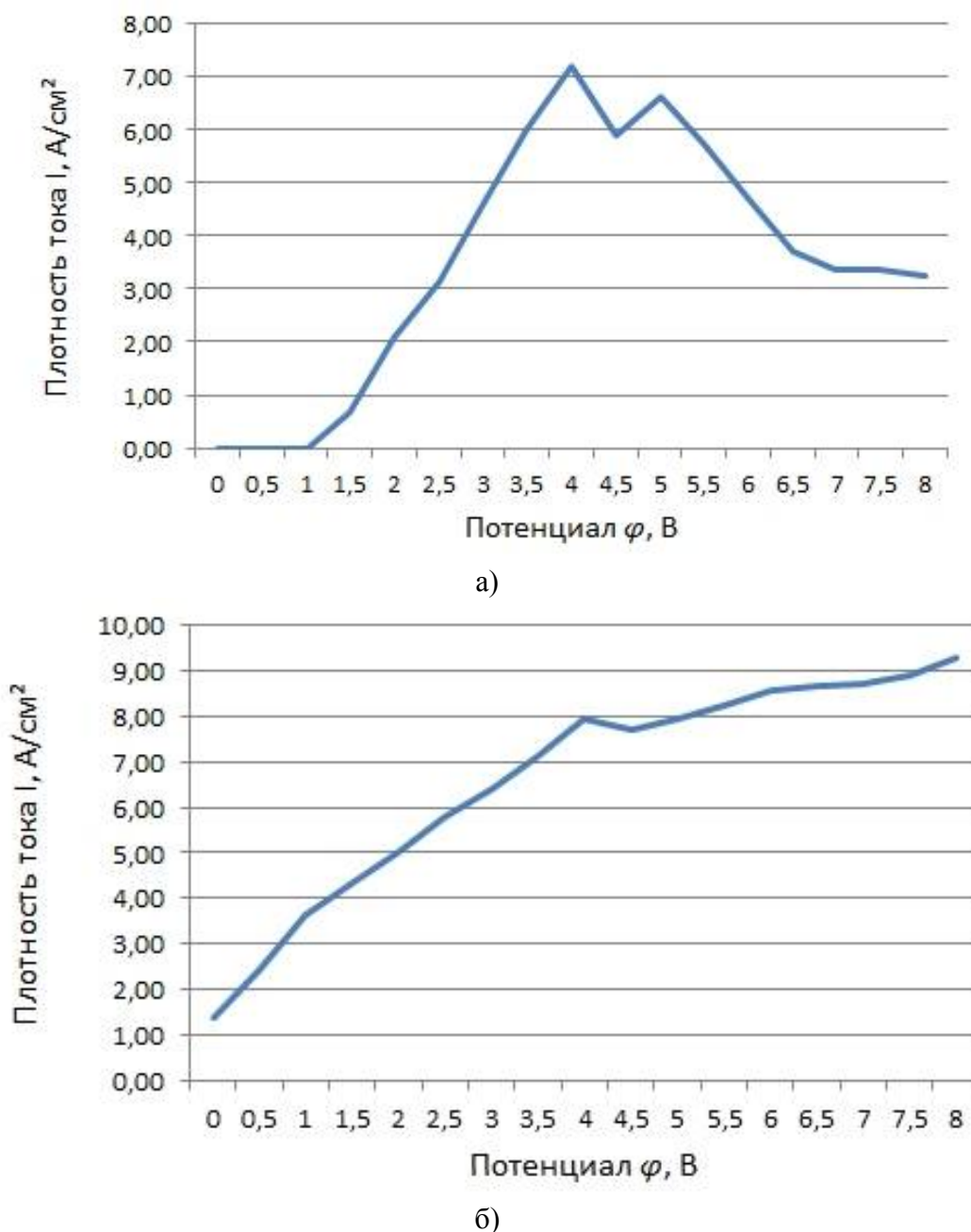


Рис. 2. Поляризационные кривые электрохимического растворения материала Al-Ti: а) в 10% водном растворе нитрата натрия; б) в 10% водном растворе хлорида натрия

Однако следует отметить тот факт, что при электрохимической обработке композиционного материала Al-Ti в водных растворах NaNO_3 и NaCl происходит растворение алюминия, при этом происходит пассивация титановой составляющей композиционного материала (рис.3).

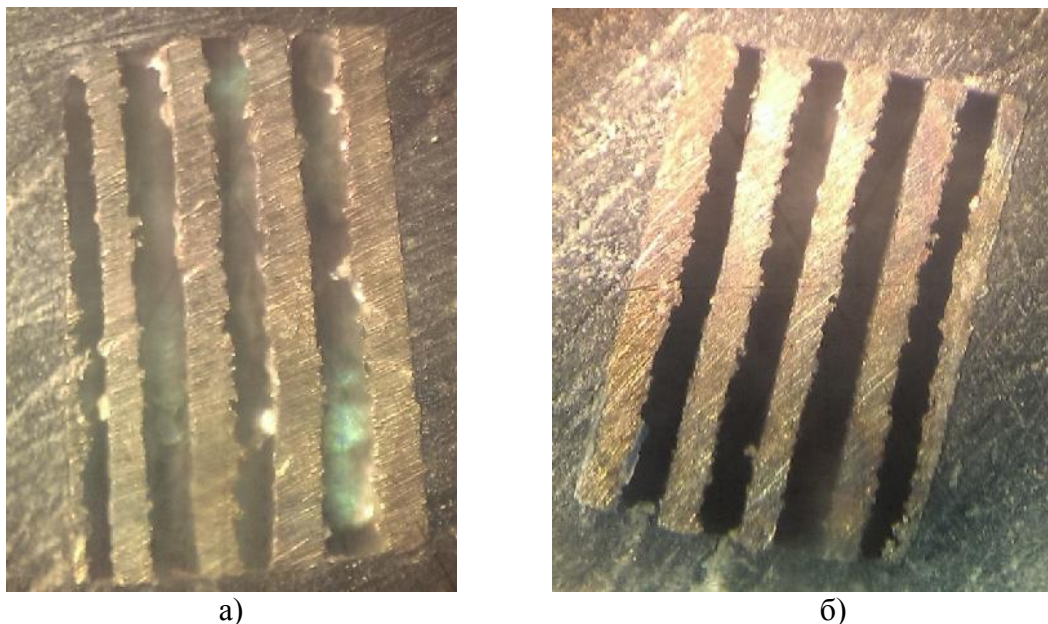


Рис.3. Образец Al-Ti после проведения опытов: а) в 10% водном растворе нитрата натрия; б) в 10% водном растворе хлорида натрия

Выводы

В результате проведенных исследований было установлено, что в электролите NaCl наблюдается активное растворение исследуемого материала, а в электролите NaNO_3 наблюдается растворение композиции Al-Ti в активном состоянии в диапазоне 0-3,5 В. Об этом свидетельствует увеличение плотности тока до 7 A/cm^2 при $\varphi=3,5 \text{ В}$. Последующее повышение потенциала до 8 В сопровождается снижением плотности тока. Установлено, что при электрохимической обработке композиционного материала Al-Ti в водных растворах NaNO_3 и NaCl происходит растворение только алюминия. Титановая составляющая пассивируется в исследуемых электролитах.

Список литературы

1. Голубев А.И. Коррозия и защита конструкционных сплавов. – М.: Наука, 1966. – 311 с.
2. Rakhimyanov Kh., Rakhimyanov A., Heifetz M. High-precision plasma cutting of the steel – aluminum "bimetallic composition" // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788: Actual Problems and Decisions in Machine Building. – P. 41–45.
3. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н. Размерная обработка деталей с покрытиями из наноконструированных порошков материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 4. – С. 22–26.
4. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н. Электроалмазная обработка напыленных износостойких покрытий // Инженерия поверхностного слоя деталей машин: труды международной научно-практической конференции / Кузбасский государственный

технический университет, Белорусский национальный технический университет; под ред. В.Ю. Блюменштейна, Ф.И. Пантелеенко. – Кемерово, 2009. – С. 365–368.

5. Электрохимическое растворение покрытий из порошковых материалов / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский, М.И. Никитенко, А.Н. Моисеенко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 2 (51). – С. 3–5.

6. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В. Анодное растворение быстрорежущей стали Р6М5 и ее составляющих в водных растворах // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2003. – № 4. – С. 141–147.

7. Рахимьянов Х.М., Рахимьянов К.Х., Гаар Н.П. Активация анодного растворения аморфных и нанокристаллических сплавов непрерывным обновлением поверхности // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 1 (46). – С. 35–38.

8. Влияние гидродинамического режима на скорость анодного растворения меди в пассивирующих электролитах / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, А.С. Захаров, С.И. Василевская // Механика XXI века. – 2015. – № 14. – С. 112–115.

9. Фрейман Л.И., Макаров В.А., Брыскин И.Е. Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите / под ред. Я.М. Колотыркина. – Л.: Химия, 1972. – 240 с.

10. Томилов А.П. Прикладная электрохимия. – М.: Химия, 1984. – 520 с.

ELECTROCHEMICAL DISSOLUTION COMPOSITE MATERIAL "ALUMINUM-TITANIUM" IN AQUEOUS SOLUTION OF SODIUM NITRATE AND SODIUM CHLORIDE

Zhuravleva A.V., Master's Degree student, e-mail: sashka093@mail.ru

Yusupov A.S., Master's Degree student, e-mail: yusupov-a@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

We conducted studies of anodic polarization behavior of composite material "aluminum-titanium". The sample was placed in a three-electrode electrochemical cell with the electrolyte. As electrolytes used 10% NaNO₃ solution and the salt NaCl. Experiments conducted potentiodynamic method, the potential ranges from 0 to 8V. According built polarization curves obtained data. It was revealed that in the electrolyte NaNO₃ first goes active before the dissolution of 3.5V, 5.5V and then after - passive dissolution. And the electrolyte NaCl - only active dissolution. In both cases there is dissolution of the aluminum and the titanium component is hardly dissolved.

Keywords

three-electrode electrochemical cell, the auxiliary electrode, a reference electrode, electroblasting, anodic dissolution, composite materials

УДК 621.9.048.7

ОСОБЕННОСТИ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Ni-Cr-Si-B

*Т.А. ЗИМОГЛЯДОВА, аспирант
Е.А. ДРОБЯЗ, канд. техн. наук, доцент
Д.О. МУЛЬ, лаборант
Д.С. КРИВЕЖЕНКО, лаборант
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Зимоглядова Т.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: zimogliadovatatiana@gmail.com

Исследовано влияние технологических параметров наплавки на показатели микротвердости покрытий, полученных при вневакуумной электронно-лучевой обработке порошковых смесей системы Ni-Cr-Si-B. Наименьший уровень микротвердости 300 HV характерен для покрытий, полученных при скорости перемещения заготовки относительно электронного пучка 10 мм/с. Данный режим обработки позволяет получить высококачественные покрытия, толщина которых достигает 2,5 мм. Однако большая глубина проплавления приводит к перемешиванию основного металла и материала покрытия, снижая тем самым концентрацию легирующих элементов в покрытии. Уменьшение времени существования жидкой фазы в процессе обработки препятствует интенсивному протеканию диффузионных процессов. Увеличение скорости обработки до 20 мм/с приводит к повышению уровня микротвердости наплавленных слоев в два раза (до ~ 650 HV).

Ключевые слова: Модифицирование поверхности, вневакуумная электронно-лучевая обработка, структура, микротвердость.

Введение

Ужесточение условий эксплуатации изделий из металлических материалов явилось причиной разработки, развития и совершенствования различных методов модификации поверхности. Наряду с традиционными способами, основанными на использовании диффузионных процессов, интенсивное развитие получили процессы, включающие оплавление тонких поверхностных слоев материала и последующую их быструю кристаллизацию. В большинстве случаев эти процессы сопровождаются введением в расплав тугоплавких соединений, значительно повышающих физико-механические характеристики формируемых покрытий [1-3].

Широкое распространение в последнее время получили методы нанесения покрытий, основанные на использовании высокоэнергетических источников нагрева. Каждый из них обладает определенным набором преимуществ, который делает их незаменимыми при разработке новых многофункциональных покрытий. Одним из наиболее эффективных источников энергии, используемых для формирования качественных высокопрочных покрытий, является электронный пучок, выведенный в воздушную атмосферу. К основным достоинствам вневакуумной электронно-лучевой наплавки следует отнести возможность введения в поверхностный слой тугоплавких легирующих компонентов, образующих при кристаллизации высокопрочные соединения, высокую скорость нагрева, значительную (до 5

мм) толщину наплавляемого слоя, отсутствие разбрызгивания наплавляемого металла, высокую производительность и коэффициент полезного действия оборудования [4-7].

В качестве материалов, пригодных для нанесения антикоррозионных износостойких покрытий, широкое распространение получили высоколегированные многокомпонентные самофлюсующиеся сплавы на никелевой основе системы Ni-Cr-Fe-Si-B. Их важнейшим преимуществом является образование при нагреве формирующегося покрытия тонкой легкоплавкой пленки борсодержащих стекол, предотвращающей негативное воздействие кислорода воздуха [6, 7].

Цель данной работы заключалась в поиске оптимальных технологических решений, обеспечивающих формирование высоколегированных поверхностных слоев при наплавке порошковой смеси системы Ni-Cr-Fe-Si-B электронным пучком, выведенным в воздушную атмосферу.

Материалы и методы исследования

В качестве основного металла использовали пластины толщиной 10 мм из низкоуглеродистой стали 10 (0,12 % C, 0,28 % Si, 0,50 % Mn, 0,04 % S, 0,035 % P). Для удаления окалины поверхность образцов подвергалась предварительному шлифованию. Наплавку порошковых смесей осуществляли на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-6 производства Института ядерной физики СО РАН. Для формирования упрочненных слоев применяли порошок ПН77Х15СЗР2. Порошковую смесь равномерно распределяли по поверхности упрочняемой пластины. Плотность насыпки составляла 0,45 г/см². Наплавку осуществляли по следующим режимам: ток пучка – 25 мА; скорость - от 10 до 20 мм/с; расстояние от выпускного окна до заготовки – 90 мм; энергия пучка электронов – 1,4 МэВ.

Металлографические исследования наплавленных покрытий были проведены на микроскопе Carl Zeiss Axio Observer A1m при увеличениях в диапазоне от x50 до x1000. Для выявления микроструктуры исследуемые покрытия подвергались химическому травлению с использованием смеси состоящей из хлорида железа (FeCl₃), азотной (HNO₃) и соляной (HCl) кислот. Для оценки фазового состава использовали рентгеновский θ - θ дифрактометр ARL X'TRA. Дифракционные картины регистрировались в режиме сканирования с шагом $2\theta = 0,05^\circ$. Время накопления импульсов составляло 5...15 с на одну точку. Твердость полученных материалов исследовали с использованием прибора Wolpert Group 402MVD. Нагрузка на алмазный индентор составляла 0,98 Н.

Результаты и их обсуждение

Наиболее эффективный подход к решению проблемы формирования высокопрочных легированных поверхностных слоев основывается на использовании таких технологических режимов наплавки, которые минимизируют тепловой вклад высококонцентрированного источника энергии. Одним из параметров обработки, позволяющим снизить время теплового воздействия, является скорость перемещения обрабатываемого материала относительно электронного пучка, выведенного в воздушную атмосферу. Высокие скорости обработки позволяют не только увеличить производительность процесса, но и снизить степень разбавления материала покрытия основным металлом.

Проведенные структурные исследования показали, что при наплавке порошковых смесей со скоростью от 10 до 20 мм/с формируются поверхностно модифицированные материалы, обладающие градиентной структурой. Толщина наплавленных слоев находится в диапазоне 1,4...2,5 мм.

Формирование покрытий сопровождается протеканием процессов кристаллизации с образованием дендритной структуры, состоящей из зерен твердого раствора и эвтектики, располагающейся по его границам (рис. 1). Методом рентгеновской дифрактометрии установлено, что зёрна дендритов представляют собой γ -твердый раствор на основе Ni, Fe. Анализ микрофотографий свидетельствует о зависимости объемной доли эвтектической составляющей от концентрации легирующих элементов входящих в состав покрытия. С увеличением скорости наплавки в структуре наблюдается уменьшение количества ячеек дендритов, которые обладают низким уровнем твердости и прочности.

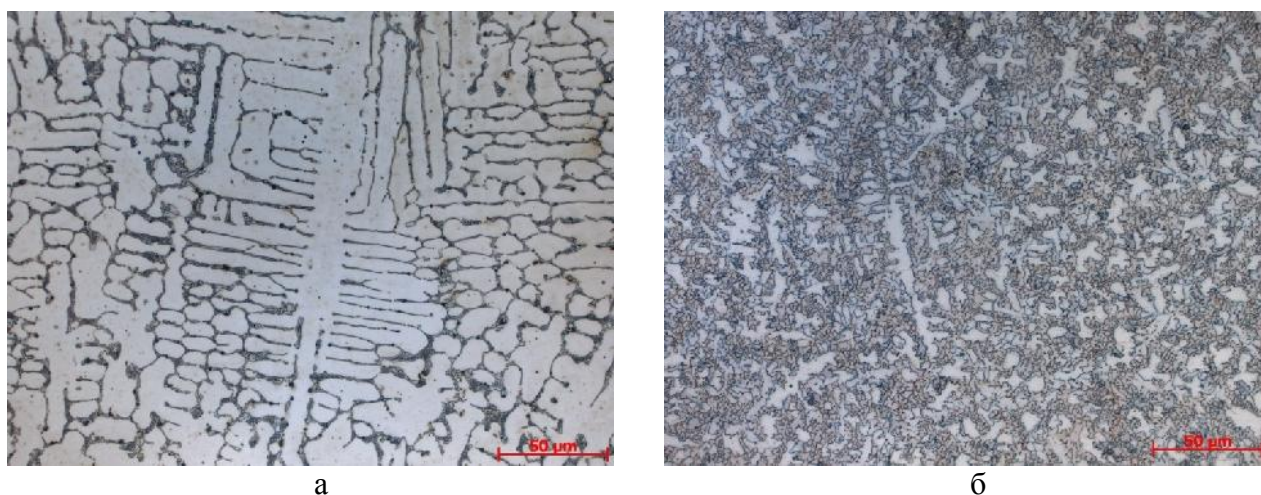


Рис. 1. Микроструктура покрытий, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки самофлюсующегося порошка ПН77Х15С3Р2 на заготовки из низкоуглеродистой стали: а – $V = 10$ мм/с, б – $V = 20$ мм/с

Структурные изменения, происходящие в покрытии при увеличении скорости электронно-лучевой наплавки, положительно сказываются на уровне микротвердости материала. Влияние скорости вневакуумной электронно-лучевой обработки на микротвердость упрочненного слоя представлено на рисунке 2. Анализ экспериментальных данных показал, что минимальным уровнем микротвердости обладают покрытия, полученные в процессе обработки со скоростью 10 мм/с. Твердость достигает 300 HV, что не значительно превышает показатели микротвердости материала основы (~ 200 HV). Такое поведение связано с интенсивным оплавлением поверхностных слоев основного металла и перераспределением легирующих элементов в ванне расплава.

Повышение скорости обработки в 1,5 раза сопровождается увеличением уровня микротвердости до 400 HV. Наибольший уровень твердости (~ 650 HV) был, достигнут в поверхностном слое, полученном в процессе наплавки смеси самофлюсующегося порошка при скорости перемещения материала относительно электронного пучка 20 мм/с. При реализации данного режима обработки время пребывания материала покрытия в жидком состоянии было недостаточным для завершения процессов диффузионного перераспределения железа.

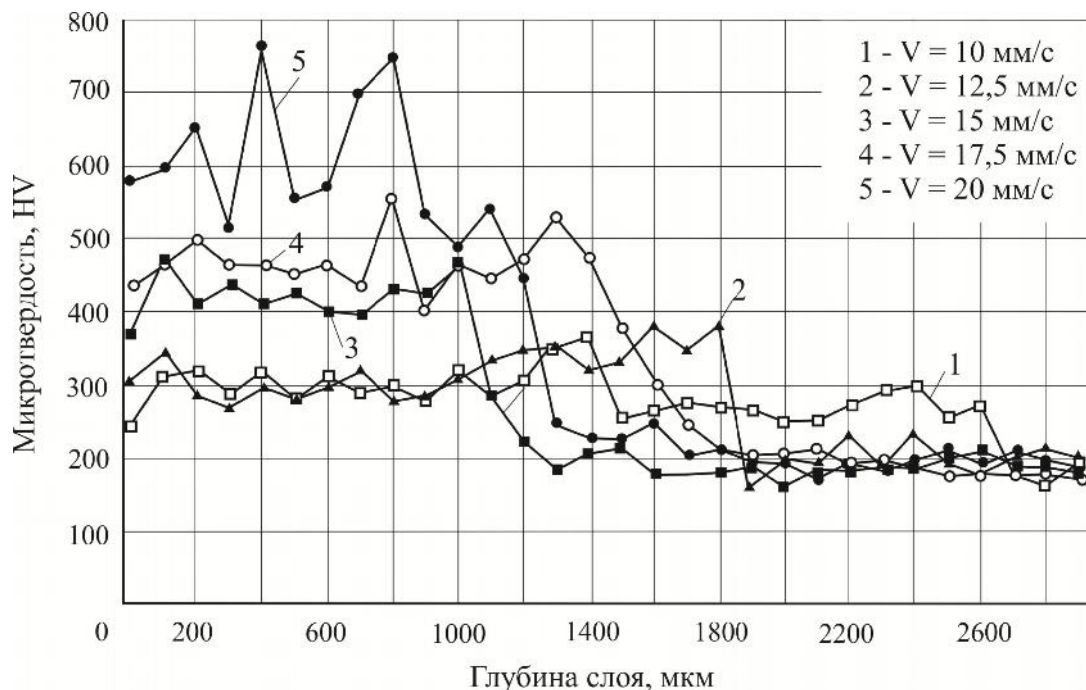


Рис. 2. Распределение микротвердости по глубине наплавленных слоев

Выводы

1. Наплавка самофлюсующейся порошковой смеси системы Ni-Cr-Si-B электронным пучком, выведенным в воздушную атмосферу, обеспечивает формирование модифицированных слоев, толщина которых достигает 2,5 мм. Высокая концентрация тепловой энергии в зоне обработки обеспечивает интенсивное разбавление наплавляемого слоя материалом основы, негативно отражаясь на уровне микротвердости покрытия. Микротвердость достигает 300 HV.

2. Использование высоких скоростей наплавки является эффективным технологическим фактором, позволяющим в значительной степени повысить уровень механических свойств модифицированных материалов. Ограниченное время существования жидкой фазы в ходе вневакуумной электронно-лучевой обработки препятствует интенсивному протеканию диффузионных процессов на границе раздела основной металл-покрытие, сохраняя в поверхностном слое высокую концентрацию легирующих элементов. Показано, что максимальным уровнем микротвердости ~650 HV обладают покрытия, полученные при наплавке со скоростью 20 мм/с.

Список литературы

1. Формирование упрочняющих покрытий методом наплавки в пучке релятивистских электронов / И.М. Полетика, М.Г. Голковский, М.Д. Борисов, Р.А. Салимов, М.В. Перовская // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 5. – С. 29–41.
2. Using the Cr-C-B systems for alloying metal by in out-of-vacuum electron beam surfacing / I.M. Poletika, S.A. Makarov, T.A. Krylova, M.G. Golkovskii // Welding International. – 2012. – Vol. 26, N 10. – С. 776–781.

3. Surface hardening of steels with carbon by non-vacuum electron-beam processing / I.A. Bataev, A.A. Bataev, A.A. Losinskaya, R.A. Dostovalov, A.I. Popelyukh, E.A. Drobyaz, M.G. Golkovskii // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 242. – С. 164–169.
4. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum / I.A. Bataev, A.A. Bataev, A.A. Ruktuev, T.V. Zhuravina, N.K. Kuksanov, R.A. Salimov, V.A. Bataev, M.G. Golkovski // *Materials Science and Engineering A*. – 2013. – Vol. 578. – P. 310–317.
5. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка углеродсодержащих порошковых смесей на заготовки из титана ВТ1-01 / О.Г. Ленивцева, И.А. Батаев, Н.С. Белоусова, Е.Д. Головин, Т.А. Зимоглядова // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2013. – № 4 (61)ю – С. 49–57.
6. Microstructure and phase formation in a rapidly solidified laser-deposited Ni-Cr-B-Si-C hardfacing alloy / I. Hemmati, V. Ocelik, K. Csach, J.Th.M. Hosson // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2014. – Vol. 45. – P. 878–892.
7. Electron-beam surfacing wear-resistant coatings, reinforced refractory metal's borides / E. Drobyaz, T. Zimoglyadova, V. Gromov // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698: *Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014*. – P. 419–423.

CLADDING SPECIALTIES OF Ni-Cr-Si-B POWDER COATINGS

Zimogliadova T. A., Ph.D. student, e-mail: zimogliadovatatiana@gmail.com

Drobyaz E. A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ekaterina.drobyaz@yandex.ru

Mul D. O., Laboratory assistant, e-mail: ddariol@yandex.ru

Krivezhenko D. S., Laboratory assistant, e-mail: dinylkaa@yandex.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The influence of the cladding rate on the microhardness parameter of coatings obtained by non-vacuum electron beam treatment of Ni-Cr-Si-B powder mixtures was investigated. It was found that the lowest microhardness level (300 HV) was characteristic of the coatings obtained when the workpiece was moving relative to an electron beam with a speed of 10 mm per second. This treatment regime allowed obtaining high-quality coatings 2.5 mm in thickness. However, a large thickness of fusion penetration led to the interfusion of the base metal with a coating material and a decrease in the concentration of alloying elements in the coating. Reducing the lifetime of the liquid phase during treatment prevented intensive diffusion processes. Increasing the treatment velocity to 20 mm per second doubled the clad layer microhardness (up to 650 HV).

Keywords

surface modification, non-vacuum electron beam cladding, structure, microhardness

УДК 621.9.01
621.791.947.55

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СХЕМЫ HiFOCUS^{PLUS}
ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ В ОБРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ
СТАЛЕЙ**

*Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор
Н.П. ГААР, канд. техн. наук, доцент
А.А. ЛОКТИОНОВ, старший преподаватель
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Локтионов А.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
E-mail: loktionov@corp.nstu.ru

Работа посвящена оценке точности реза металлических листовых материалов с использованием технологии тонкоструйной плазменной резки HiFocus^{plus}. Представлены результаты экспериментальных исследований отклонения кромок реза от перпендикулярности и его ширины для диапазона толщин раскроя конструкционной стали Ст. 3 от 4 до 20 мм. Установлено значительное отклонение левой кромки реза от перпендикулярности по сравнению с заявленной производителем оборудования величиной. Предлагается выбирать направление обхода обрабатываемого контура таким образом, чтобы формообразование детали осуществлялось правой кромкой реза. Экспериментально показано, что при раскрое конструкционной низкоуглеродистой стали в диапазоне толщин менее 14 мм и 20 мм не достигаются показатели точности реза и его ширины, заявленные производителем. Предложен возможный комплекс мероприятий для повышения точностных показателей раскроя в данных диапазонах толщин обрабатываемого материала.

Ключевые слова: тонкоструйная плазменная резка, расходные элементы плазматрона, ширина реза, скорость резки

Введение

Технология тонкоструйной плазменной резки, применяемая при раскрое листовых материалов, находит все большее применение в машиностроительной промышленности в заготовительном производстве для изготовления деталей под сварку. Ряд исследователей рассматривают эту технологию как достойную альтернативу лазерной резке [1]. В условиях производства при выборе определенной технологической схемы и назначении режимных параметров плазменного раскроя технологю приходится основываться на рекомендациях предприятия - изготовителя оборудования, которые, как правило, являются ориентировочными и не всегда гарантируют достижение требуемого качества обработки. По этой причине предварительные исследования показателей точности позволяют оценить реальные достигаемые их значения для конкретной технологии, схемы раскроя, материала и режимных параметров, а также оценить возможности по их повышению. Возможные виды износа расходных элементов, его количественная оценка и влияние на точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке представлены в работах [2–4]. Немаловажным фактором влияющим на стойкость расходных элементов плазматрона

является система охлаждения резака, что подтверждается работами [5,6]. Результаты исследований по оценке геометрической точности и качества реза, анализу погрешностей формообразования и моделированию процесса обработки криволинейных контуров отражены в работах [7–12]. Эффективность технологии тонкоструйной плазменной резки конструкционных материалов, а также биметаллических композиций подтверждается данными работ [13–17]. Помимо традиционных технологических параметров плазменного раскроя (ток дуги, напряжение, давление и расход режущего и завихряющего газов, их состав и т.д.), которые определяют процесс термической резки, исследователями доказано, что по звуковой характеристики (шум-фактор) истечения плазменной струи можно оценить протекание процесса обработки и состояние расходных элементов [18–20].

Настоящая работа посвящена исследованию одной из схем тонкоструйной плазменной резки – HiFocus^{plus}, предназначенной для раскроя конструкционных сталей в диапазоне толщин реза 4-20 мм.

Методика экспериментального исследования

Проведение экспериментальных исследований производилось на оборудовании фирмы Kjellberg Finsterwalde (Германии).

Для проведения исследований был выбран листовой прокат из конструкционной стали марки Ст 3 (ГОСТ 14637-89). Толщины образцов и соответствующие расходные элементы плазматрона, представленные в таблице 1, были выбраны исходя из технологических возможностей рассматриваемой технологии раскроя [21].

Таблица 1

Типоразмеры расходных элементов плазматрона

Технология резки	Толщина, мм	Катод	Газификатор	Сопло	Колпачок сопла	Колпачок завихряющего газа	Защитный колпачок
HiFocus ^{plus}	4	S002	Z102	S2008x	S3028	Z4020	Z501
	6					Z4022	
	10			S2012x		Z4025	
	16						
	20						

Проведение исследований осуществлялось на режимах обработки, представленных в таблицах 2 и 3, в соответствии с рекомендациями производителя оборудования.

Таблица 2

Режимные параметры раскроя

Технология резки	Толщина, мм	Ток, А	Скорость резки, м/мин	Время пробивки, сек	Высота пробивки, мм	Высота реза, мм	Напряжение, В
HiFocus ^{plus}	4	50	2,2	0,2	3	1,5	119
	6	50	1,5	0,3	3	2	125
	10	130	2,4	0,4	4	2	133
	16	130	1,8	0,4	5	2	140
	20	130	1	0,6	6,5	2,5	150

Таблица 3

Виды и параметры режущего и завихряющего газов

Технология резки	Толщина, мм	Зажигающий газ - воздух (давление/ расход)	Режущий газ – кислород (давление/ расход)	Завихряющий газ 1 – кислород (давление/ расход)	Завихряющий газ 2 – азот (давление/ расход)
HiFocus ^{plus}	4	5 бар/15 дел. шкалы	10 бар/20 дел. шкалы	-	5 бар/50 дел. шкалы
	6	5 бар/20 дел. шкалы	10 бар/20 дел. шкалы	-	5 бар/40 дел. шкалы
	10	5 бар/25 дел. шкалы	10 бар/60 дел. шкалы	-	5 бар/45 дел. шкалы
	16	5 бар/25 дел. шкалы	10 бар/60 дел. шкалы	-	5 бар/60 дел. шкалы
	20	5 бар/25 дел. шкалы	10 бар/60 дел. шкалы	-	5 бар/90 дел. шкалы

Анализ точности обработки проводился по отклонению от перпендикулярности обеих кромок реза в соответствии с методикой ISO 9013:2002. Исследование для каждой толщины производилось не менее 5 раз.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены результаты по оценке отклонения от перпендикулярности левых и правых кромок реза (по отношению к направлению движения плазмотрона) для различных толщин, а на рис. 2 – ширине реза. На рисунках приведены значения этих параметров, регламентируемые производителем оборудования.

Анализ полученных результатов исследований показал, что отклонение от перпендикулярности левой кромки реза превышает регламентируемое производителем оборудования значение во всем исследуемом диапазоне толщин. Однако, следует заметить, что деталь при использовании данного метода обработки формируется не левой, а правой кромкой реза. По этой причине интерес, с точки зрения достигаемой точности, представляет правая кромка реза.

Значения отклонения от перпендикулярности реза для правой кромки укладывается в регламентируемые значения для толщин от 10 мм до 16 мм, для остального диапазона толщин (от 4 до 6 мм, свыше 20 мм) наблюдается значительная погрешность геометрии.

Ширина реза является еще одним показателем, определяющим геометрическую точность реза, так ее значение вносится в программу раскроя с целью обеспечения точности. Неправильно заданное значение приводит к изменению получаемых линейных размеров изделия. На рисунке 2 показано соотношение заявленной производителем и полученной в исследовании ширины реза в отмеченном диапазоне толщин обрабатываемого материала.

Анализ полученных данных свидетельствует, что значение ширины реза, указанное производителем соблюдается в диапазоне толщин от 14 мм до 20 мм. В остальных диапазонах толщин (от 4 мм до 14 мм) происходит превышение регламентированного производителем значения.

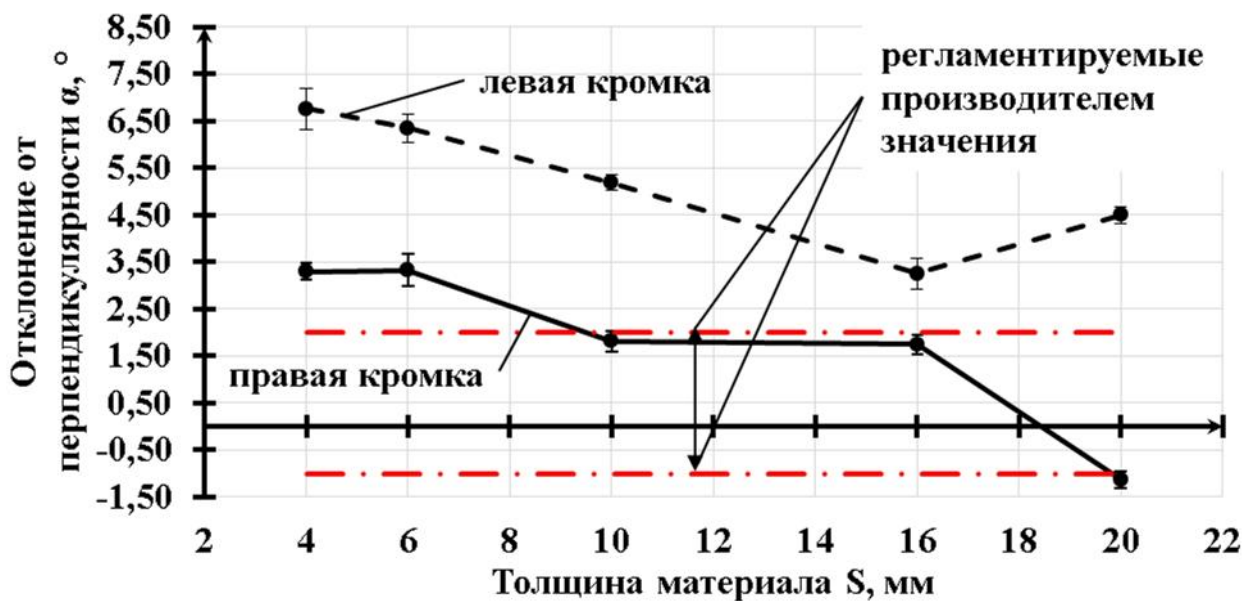


Рис. 1. Отклонение от перпендикулярности кромок реза для различных толщин обрабатываемого материала

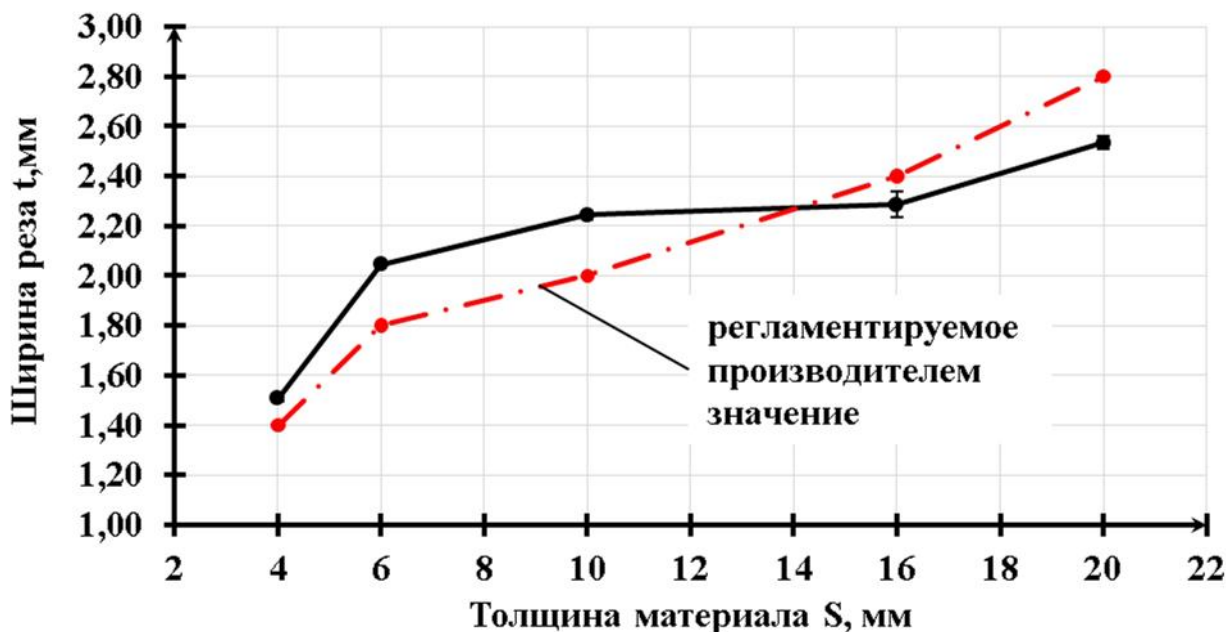


Рис. 2. Ширина реза при различной толщине обрабатываемого материала

Таким образом, предполагаемая производителем технологическая схема HiFocus^{plus} с соответствующими режимными параметрами обеспечивает достижение требуемой точности при раскрое материалов толщиной от 14 до 20 мм. При меньшей толщине материала наблюдается снижение точности как по отклонению от перпендикулярности кромок реза, так и по его ширине.

Совместный анализ полученных результатов и типоразмера расходных элементов плазматрона позволяют говорить о том, для определенного диапазона толщин возможно применение комплекса мер по повышению точности обработки.

Для толщин 4 и 6 мм, несмотря на применения сопла с малым диаметром выходного канала (0,8 мм), не достигаются заявленные производителем значения перпендикулярности кромок и ширины реза. Данное несоответствие можно было бы устранить применением сопла с меньшим диаметром. Однако, такого типоразмера сопел для данной технологии не предусмотрено. Изменение скорости резания в данном случае не обеспечивает повышения точностных показателей. Так снижение скорости реза благоприятно скажется на перпендикулярности кромок реза, но увеличит ширины реза за счет большего времени контакта теплового источника (плазменного столба) с разрезаемым материалом. Повышение скорости реза, наоборот, позволит уменьшить ширину реза, но отрицательно скажется на геометрии реза. Таким образом, повышение точности реза для данных толщин в рамках рассматриваемой технологии маловероятно.

При раскрое материала толщиной 10 мм обеспечивается точность реза по углу наклона кромок, но ширина реза превышает регламентированное производителем значение. Однако, при раскрое на данной толщине производителем рекомендовано использование сопла с диаметром выходного отверстия 1,2 мм (S2012x) и возможным решением для уменьшения величины ширины реза является замена сопла с меньшим диаметром выходного канала (S2008x).

Для толщины 20 мм вероятным решением для уменьшения отклонения от перпендикулярности может служить снижение скорости реза. Благодаря чему, значение отмеченного параметра уменьшится, а увеличение ширины реза не будет критичным, так как ширина реза для данной толщины имеет значение меньше, чем регламентировано производителем.

Выводы

Экспериментальное исследование тонкоструйной плазменной резки с использованием технологии NiFocus^{plus}, предназначенной для раскроя конструкционных сталей толщиной от 4 до 20 мм, позволило установить, что для левой кромки во всем исследуемом диапазоне толщин не достигается заявленное производителем отклонение реза от перпендикулярности. В диапазоне толщин от 4 до 14 мм и при толщине 20 мм для правой кромки также не удается достичь заявленных производителем показателей точности реза. Точность реза и отклонения от перпендикулярности регламентируемых производителем достигаются для исследуемой технологии только для толщины от 14 мм до 16 мм.

Список литературы

1. *Kirkpatrick I.* High definition plasma – an alternative to laser technology // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. – 1998. – Vol. 70, N 3. – P. 215–217.
2. *Рахмянов Х.М., Локтионов А.А.* Влияние износа расходных элементов на точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 4 (53). – С. 14–18.
3. *Рахмянов Х.М., Локтионов А.А.* Влияние технологий тонкоструйной плазменной резки на формирование шероховатости поверхности реза // Современные проблемы машиностроения: сборник научных трудов 7 международной научно-технической конференции. – Томск, 2013. – С. 349–353.
4. *Рахмянов Х.М., Локтионов А.А.* Разновидности катодов, применяемых для плазменной резки, и влияние степени износа их на точность формообразования // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе:

материалы 10-ой Всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск, 2012. – С. 68–71.

5. Numerical simulation and experimental verification of electrode life for different coolants and its flow in plasma cutting torch / M. Senthil Kumar, B. Dhanasekar, G. Ranga Janardhana, K.S. Jayakumar // *International Journal of Intelligent Information Processing*. – 2012. – Vol. 3, N 2. – P. 77–85.

6. *Ranga Janardhana G., Senthil Kumar M., Dhanasekar B.* Experimental analysis of different coolants used in plasma cutting operation for the improved electrode life // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 719–720. – P. 46–49.

7. *Локтионов А.А.* Оценка качества реза листовых материалов при тонкоструйной плазменной резке // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2013. – № 4 (61). – С. 86–91.

8. Моделирование процесса тонкоструйной плазменной резки для обеспечения точности формообразования криволинейных контуров / Х.М. Рахимьянов, А.И. Журавлев, А.А. Локтионов, А.Х. Рахимьянов // *Научный вестник НГТУ*. – 2009. – № 4. – С. 123–134.

9. *Loktionov A.A., Gaar N.P.* Influence of technological parameters of high-precision plasma cutting on the position of the anode spot on the cut edge // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 788. – P. 46–51.

10. *Narimanyan A.* Unilateral conditions modelling the cut front during plasma cutting: FEM solution // *Applied mathematical modelling*. – 2009. – Vol. 33, N 1. – P. 176–197.

11. *Dashkovskiy S., Narimanyan A.* Thermal plasma cutting. Pt. 1. Modified mathematical model // *Mathematical Modelling and Analysis*. – 2007. – Vol. 12, N 4. – P. 441–458.

12. *Локтионов А.А., Рахимьянов Х.М.* Анализ погрешностей формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов // *Современные проблемы в технологии машиностроения: сборник трудов всероссийской научно-практической конференции*. – Новосибирск, 2009. – С. 151–153.

13. *Rakhmyanov K.M., Rakhmyanov A.K., Zhuravlev A.I.* Advantages of high-precision plasma cutting for processing bimetallic compositions // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 698. – P. 294–298.

14. Optimization of process parameters in plasma arc cutting of EN 31 steel based on MRR and multiple roughness characteristics using grey relational analysis / Milan Kumar Das, Kaushik Kumar, Tapan Kr. Barman, Prasanta Sahoo // *Procedia Materials Science*. – 2014. – Vol. 5. – P. 1550–1559.

15. *Çelik Y.H.* Investigating the effects of cutting parameters on materials cut in CNC plasma // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2013. – Vol. 28, N 10. – P. 1053–1060.

16. *Salonitis K., Vatousianos S.* Experimental investigation of the plasma arc cutting process // *Procedia CIRP*. – 2012. – Vol. 3. – P. 287–292.

17. *Handbuch zum Thema Plasmaschneiden*. – Grödig: Werkstatt Ausrüstung Leitner Josef, 2002. – 66 p.

18. *Kusumoto K., Chen Q.G., Xue W.* Monitoring of plasma arc cutting process by cutting sound // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2006. – Vol. 11, N 6. – P. 701–706.

19. *Xue W., Kusumoto K., Nezu K.* Relationship between plasma arc cutting acoustic and cut quality // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2005. – Vol. 10, N 1. – P. 44–49.

20. *Xue W., Kusumoto K., Nezu K.* Measurement and analysis of plasma arc cutting acoustic signal // *Materials Science Forum*. – 2004. – Vol. 449–452. – P. 313–316.

21. Instruction manual of the plasma cutting machine HiFocus 130 + PGE-HM for the CNC-controlled cutting with Plasma Torch PerCut 160/170. – URL: <http://www.kjellberg.de>, 2007.

**THE TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF HIGH PRECISION PLASMA CUTTING
SCHEME HiFocus^{Plus} IN PROCESSING OF STRUCTURAL STEELS**

Rakhimyanov Kh.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru

Gaar N.P., Ph. D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: lianelas@mail.ru

Loktionov A.A., Senior Lecturer, e-mail: pushkin-lok@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The research dedicated for evaluating the accuracy of the metal sheet materials cutting using the technology of high-precision plasma cutting scheme HiFocusplus. The results of experimental studies of cutting edges squareness width the cutting thickness range from 4 to 20 mm for structural steel St. 3 are presented. A significant cut squareness of deviation the left edge compared to the declared value of the equipment manufacturer. It is proposed to choose the direction of plasmatron moving along contour being processed so that the shaping of parts to realize by the right edge of the cut. It is experimentally shown that when cutting of low carbon structural steel with the thickness range of less than 14 mm and more than 20 mm precision cutting parameters and its cutting width are not achieved, according to the manufacturer. A possible set of activities to improve the accuracy of cutting in these ranges of thickness of the processed material proposed.

Keywords

High-precision plasma cutting, plasmatron active elements, kerf, cutting speed.

УДК 517.977.5:621.9

**ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССОМ СВЕРЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЫПУКЛОЙ
МОДЕЛИ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА**

*Г.И. СМАГИН, канд. техн. наук, доцент
В.С. КАРМАНОВ, канд. техн. наук, доцент
И.В. ФЕДИН, магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Карманов В. С. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: karmanov@corp.nstu.ru

В статье предлагается методика расчета двухканальных автоматических систем управления для металлорежущего оборудования. Большинство исследований в этой области основывается на традиционных моделях стойкости режущего инструмента, преимущественного степенного вида. Авторами предлагается выпуклая одноэкстремальная экспоненциальная модель стойкости инструмента, и основанная на этой модели методика вычисления оптимальных режимов резания. При разработке данного подхода применялся метод характеристических линий и характеристических поверхностей. Для выбранного критерия оптимальности найдена характеристическая линия, на которой лежат оптимальные режимы. Конкретное значение режима определяется экономическими данными, входящими в критерий оптимальности.

В работе предлагается применить разработанную методику к проектированию станков с числовым программным управлением и системами автоматического регулирования. Предлагается применять управление по стабилизации крутящего момента. Приведены примеры аналитического решения задачи оптимального управления в случае простых моделей зависимости крутящего момента от режимов и времени обработки. Приведен пример синтеза регулятора для двухканального управления. Проведена оценка экономического эффекта от внедрения разработанной методики.

Предлагаемая методика исследовалась на данных стойкостных испытания процесса сверления, однако с необходимыми корректировками может применяться и для других операций обработки, например, точения или фрезерования.

Ключевые слова: оптимальные режимы сверления, станки с системой автоматического регулирования, одноканальная и двухканальная системы управления приводами для станка, стабилизация крутящего момента на инструменте, синтез регуляторов пониженного порядка, модели стойкости инструмента, нормирование режимов обработки, характеристические линии и характеристические поверхности, нормирование режимов обработки.

Введение

Целью управления процессом резания является повышение точности обработки, стойкости инструмента, снижения затрат, повышения производительности технологического процесса.

В настоящее время активно ведутся работы по проектированию систем управления процессами резания, как за рубежом [1-7], так и в нашей стране [8-21]. Большинство

подходов опирается на традиционные модели стойкости инструмента степенного вида [22-29].

В работах авторов [30-38] предлагается новый подход к оптимизации режимов обработки металлов резанием, основанный на предложенной выпуклой модели режущего инструмента и применении метода характеристических линий. Следующим шагом предполагается развитие идей в сторону автоматизации и управления процессами резания. Алгоритмы и методики управления процессом резания применяются при проектировании станков с числовым программным управлением (ЧПУ) и системами автоматического регулирования (САР).

Целью данной статьи является изложение результатов применения разрабатываемого подхода на основе предлагаемой новой модели к задаче оптимального управления процессом резания. В работе показаны результаты аналитического решения. Также приведен пример расчета системы двухканального управления.

В работе рассматривается операция сверления, но с необходимыми корректировками предлагаемый подход также может быть применен и для других операций обработки металлов резанием – точение, фрезерование и пр.

Использование новой стойкостной модели для расчета оптимальных режимов обработки

Предлагаемая новая одноэкстремальная экспоненциальная модель стойкости режущего инструмента имеет вид:

$$L = A \cdot \exp \left\{ - \frac{(n - a_n)^2}{b_n^2} - \frac{(S_0 - a_s)^2}{b_s^2} \right\}, \quad (1)$$

где стойкость инструмента характеризуется величиной L – суммарной длиной просверленных отверстий до затупления сверла, мм; независимые переменные (факторы) n – число оборотов в минуту, об/мин; S_0 – подача на оборот, мм/об; A , a_n , a_s , b_n , b_s – параметры модели, определяются условиями резания (материал инструмента, материал детали, геометрия инструмента, применяемая СОЖ и пр.).

В предлагаемой форме (1) параметры модели имеют простую и понятную для практиков геометрическую интерпретацию: параметр A задает максимальное значение стойкости инструмента на поле факторного пространства, a_n и a_s – координаты максимума стойкости по переменным n и S_0 , b_n и b_s характеризуют координаты эллипсов рассеивания стойкостей по координатам n и S_0 на уровне A/e .

Проведенные исследования [30-38] процесса сверления позволили на картине стойкости конкретного инструмента в зависимости от режимов обработки (двухфакторное поле S_0, n) выделить геометрическое место точек, где для текущих значений минутных подач на поле факторного пространства (S_0, n) находятся максимальные значения стойкостей инструмента (рис. 1).

На этой линии IIS_M (рис. 1) находятся режимы «минимума затрат», которые можно рассчитать по формуле:

$$Q = \frac{C}{S_0 \cdot n} + \frac{D}{L(n, S_0)} + E, \quad (2)$$

где C , D , E – некоторые экономические параметры.

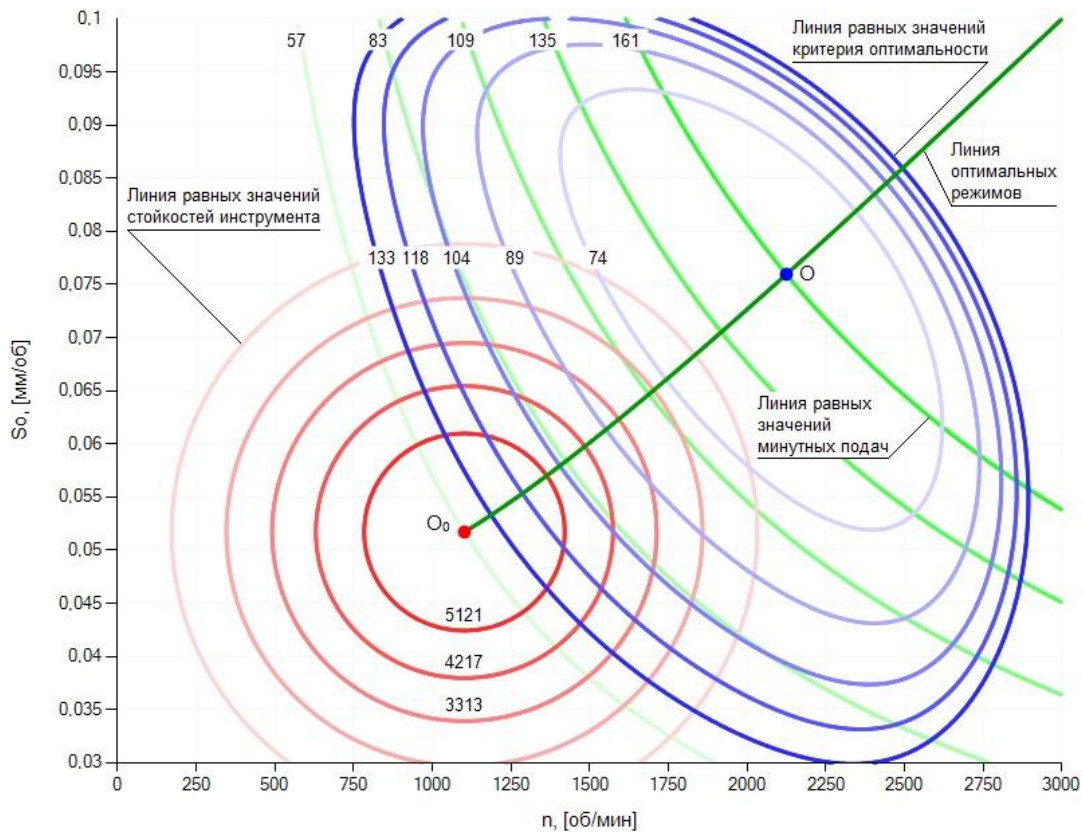


Рис. 1. Картина стойкости экспоненциальной модели $\varnothing 4,2$ мм, обрабатываемый материал – 1Х18Н9Т, вылет сверла – $2d$, O_0 – координата максимальной стойкости, O – координата оптимального режима.

Кривая локальных максимумов стойкости IIS_M , на которой находятся координаты «режимов минимума затрат», имеет выражение:

$$S_0(n) = \frac{a_s \cdot b_n + \sqrt{(a_s \cdot b_n)^2 - 4 \cdot a_n \cdot b_s \cdot n + 4 \cdot b_n \cdot n^2}}{2 \cdot b_n} \tag{3}$$

Управление процессом резания по крутящему моменту

Основными факторами, влияющими на точность обработки отверстий и стойкость инструмента при сверлении, являются колебательные возмущения крутящего момента $M_{кр}$ и осевого усилия $P_{ос}$ на сверле. С увеличением глубины сверления изменений $M_{кр}$ или $P_{ос}$, вызванные, например, пакетированием стружки в одном из каналов сверла, могут привести к его поломке или к его значительному уводу.

Начиная сверление на оптимальном режиме (точка O_1 , см. Рис. 2), регулирование $M_{кр}$ на станке с одноканальной САР будет осуществляться от точки O по вектору ΔA_1 (см. Рис. 2), не совпадающему с линией IIS_M максимальных стойкостей инструмента для текущих значений минутных подач и, соответственно, больших точностей обработки для этих же текущих подач. Следствие этого – работа станка при использовании одноканальной

САР осуществляется с пониженной эффективностью, по отношению к двухканальной системе.

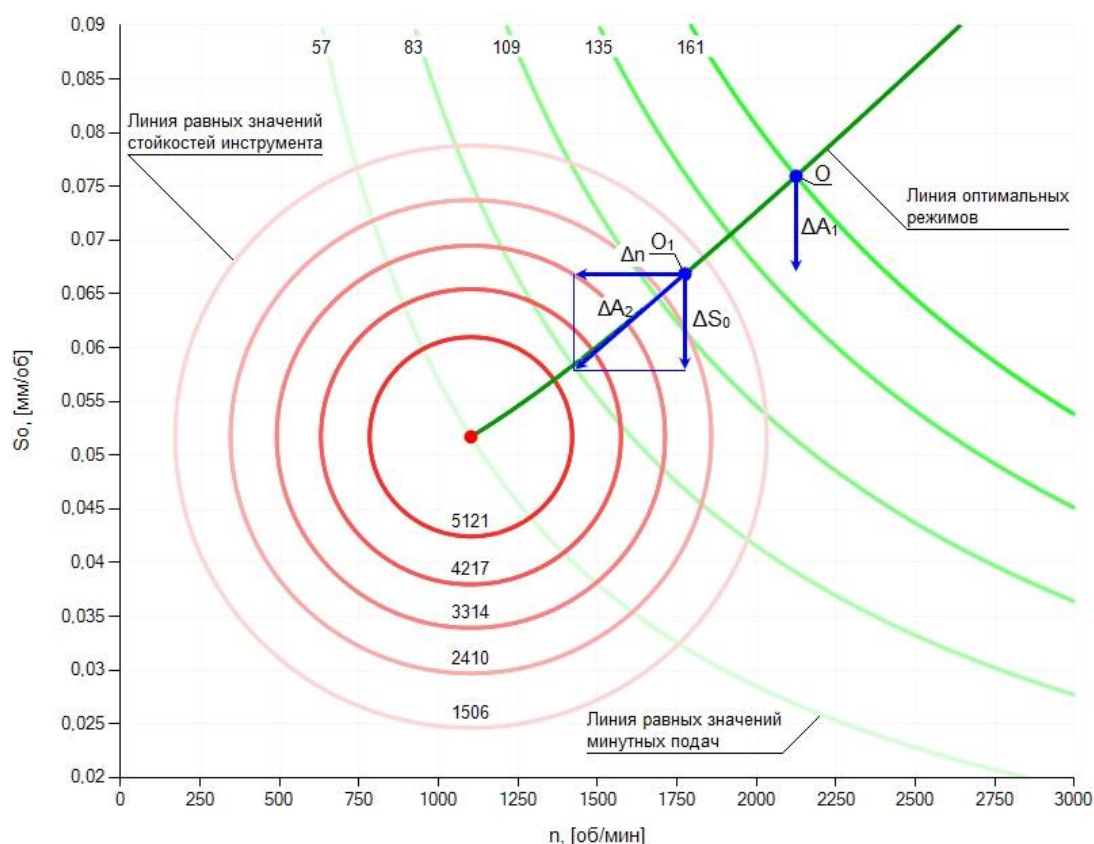


Рис. 2. Картина стойкости экспоненциальной модели $\varnothing 4,2$ мм, обрабатываемый материал – 1Х18Н9Т, вылет сверла – $2d$, ΔA_1 – вектор перемещения режима резания для одноканальной системы управления, $M_{кр} = const$, ΔA_2 – результирующий вектор перемещения режима резания вдоль линии IIS_M для двухканальной системы управления $M_{кр} = const$.

Таким образом, если для стабилизации крутящего момента применить двухканальное регулирование по параметрам S_0 и n , организовав его таким образом, чтобы при подавлении возмущения по $M_{кр}$ на инструменте рабочая точка (S_0 и n) на двухпараметрическом поле перемещалась по линии IIS_M (вектор ΔA_2 , см. Рис. 2), то тем самым будет обеспечиваться изменение регулируемых параметров по оптимальному варианту.

В этих же координатах измеряется значение крутящего момента ($M_{кр}$), соответствующего режимам для конкретного обрабатываемого материала, геометрии инструмента, применяемой смазывающе-охлаждающей жидкости.

При этом зависимость $M_{кр}$ от режимов сверления так же экспериментально должна быть установлена и входить в базовый информационный блок САР. Для упрощения выкладок была рассмотрена линейная модель

$$M_{кр} = a_0 + a_1 n + a_2 S_0, \quad (4)$$

где n – число оборотов в минуту; S_0 – подача на оборот. Например, для диаметра сверла $d = 4,2$ мм, параметры модели равны $a_0 = 186,032$, $a_1 = -0,0029$, $a_2 = 612,5$.

Тогда, если имеют место возмущения и $M_{кр}$ возрастает на инструменте до величины $M_{кр} + \Delta M_{кр}$, то автоматически системой САР обрабатывается смещение $\Delta M_{кр} = \begin{cases} n - \Delta n \\ S_0 - \Delta S_0 \end{cases}$, где Δn и ΔS_0 вычисляются из уравнения (3) и их значения автоматически вводятся в память САР.

Аналитическое решение задачи оптимального управления

Задача оптимального управления имеет аналитическое решение в случае применения простых моделей, например, линейных, квадратичных или степенных. Рассмотрим примеры.

Можно заметить, что зависимость подачи S_0 по линии оптимальных режимов IIS_M от частоты вращения n с достаточной для практического применения точностью может быть линеаризована (рис. 2):

$$S_0 = b_0 + b_1 \cdot n. \quad (5)$$

В результате расчета для обработки стали 1Х18Н9Т (коэффициент обрабатываемости $k = 1,0$) быстрорежущим сверлом Р6М5 диаметром $d = 4,2$ мм получим параметры линейной модели линии IIS_M :

$$S_0(n) = 0,025 + (2,364 \times 10^{-5}) \cdot n. \quad (6)$$

Тогда принимая во внимание (5), можем привести модель (4) зависимости крутящего момента $M_{кр}$ от режимов сверления вдоль линии IIS_M вида

$$M_{кр}(n) = c_0 + c_1 n, \quad (7)$$

где n – число оборотов в минуту; S_0 – подача на оборот; $c_i, i = \overline{1,2}$ – параметры модели.

Модель (7) адекватна только для расчета крутящего момента для нового или не используемого с момента переточки сверла. В процессе сверления крутящий момент возрастает. Отсюда возникает необходимость рассмотрения модели $M_{кр}$, зависящей от времени. Пусть зависимость от времени также линейна (предположение справедливо для рабочего режима обработки, исключая приработочный и катастрофический износы в начале и в конце обработки соответственно)

$$M_{кр}(n, t) = c_0 + c_1 n + c_2 t. \quad (8)$$

Известны данные, что изменения $M_{кр}$ до момента отказа могут возрастает до 30 % [39] относительно его значения на начало обработки новым (вновь заточенным) сверлом. Рассмотрим малое изменение крутящего момента (на 3%)

$$M_{кр}(n_{онт}, T) = 1,03 \cdot M_{кр}(n_{онт}, 0), \quad (9)$$

где T – время работы до износа (замены или переточки) сверла, которое вычисляется по модели стойкости:

$$T = \frac{L_{onm}}{S_M(n_{onm})} = \frac{L(n_{onm})}{n_{onm} \cdot S_0(n_{onm})}. \quad (10)$$

Для обработки стали 1X18H9T быстрорежущим сверлом $\varnothing 4.2$ из P6M5 получим:

$$\begin{aligned} n_{onm} &= 1675 \text{ об/мин}; \\ S_0(n_{onm}) &= 0,065 \text{ мм/об}; \\ M_{кр}(n_{onm}, 0) &= 220,74 \text{ Н/м}; \\ M_{кр}(n_{onm}, T) &= 227,362 \text{ Н/м}; \\ T(n_{onm}) &= 24,052 \text{ мин}. \end{aligned} \quad (11)$$

Полученные данные позволят определить параметры модели (6).

Построим целевую функцию для минимизации отклонения текущего крутящего момента от заданного $M_{кр}(n_{onm}, 0)$:

$$f(n, t) = \left(M_{кр}(n, t) - M_{кр}(n_{onm}, 0) \right)^2 = (d_0 + d_1 n + d_2 t)^2, \quad (12)$$

где $a_0 = c_0 - M_{кр}(n_{onm}, 0)$, $d_1 = c_1$, $d_2 = c_2$.

Решая (12), получим явный вид закона регулирования по двум каналам

$$n(t) = -\frac{d_0 + d_2 t}{d_1} = 1675,0 - 23,777t; \quad (13)$$

$$S_0(t) = 0,0645 - 0,562 \times 10^{-3} t.$$

Проводя аналогичные вычисления для квадратичной зависимости $M_{кр}$ от времени

$$M_{кр}(n, t) = c_0 + c_1 n + c_2 t^2, \quad (14)$$

в результате получим

$$\begin{aligned} n(t) &= 1,675 \times 10^3 + (2,639 \times 10^{-8}) \cdot t - 0,989 \cdot t^2; \\ S_0(t) &= 0,0645 + (6,460 \times 10^{-2}) \cdot t - (2,337 \times 10^{-5}) \cdot t^2. \end{aligned} \quad (15)$$

Методика расчета двухканальной системы управления или синтез двухканального регулятора

Для синтеза двухканального регулятора применялся модальный метод синтеза регуляторов понижения порядка [40-43], который основан на последовательном сдвиге к заданной области корней полинома, являющегося произвольной характеристического полинома замкнутой системы. Для достижения поставленной задачи синтеза и упрощения закона регулирования выбирался интегральный закон управления.

Найденные из расчета режима «минимума затрат» оптимальные значения S_{onm} и n_{onm} устанавливаются на задатчиках и регуляторах исполнительных проводов.

Следуя данной схеме, оба привода станка (главного движения и движения подачи) отслеживают оптимальные параметры режима обработки при отработке возмущений в

системе вдоль линии IIS_M (см. рис. 2), т.е. линия вводится в программатор, а затем в расчетный контур регулятора, становится главным исходным управляющим звеном системы.

На основании предложенного подхода разработана структурная схема (рис.3) объекта двухканального управления модернизированным сверлильным станком НС-25 (рис. 4) для обработки отверстий $\varnothing 4,2$ в стали 1Х18Н9Т. В качестве приводов главного движения и подачи были выбраны двигатели постоянного тока независимого возбуждения, в качестве датчика числа оборотов и крутящего момента использовался тахогенератор СЛ-121. Отметим, что в расчёте и моделировании он не был учтён, что не принципиально и не влияет на свойства системы.

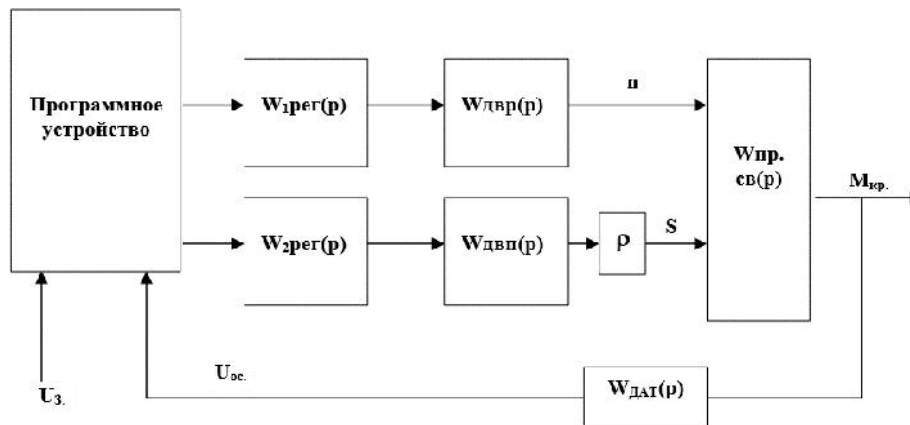


Рис. 3. Структурная схема двухканальной САУ.

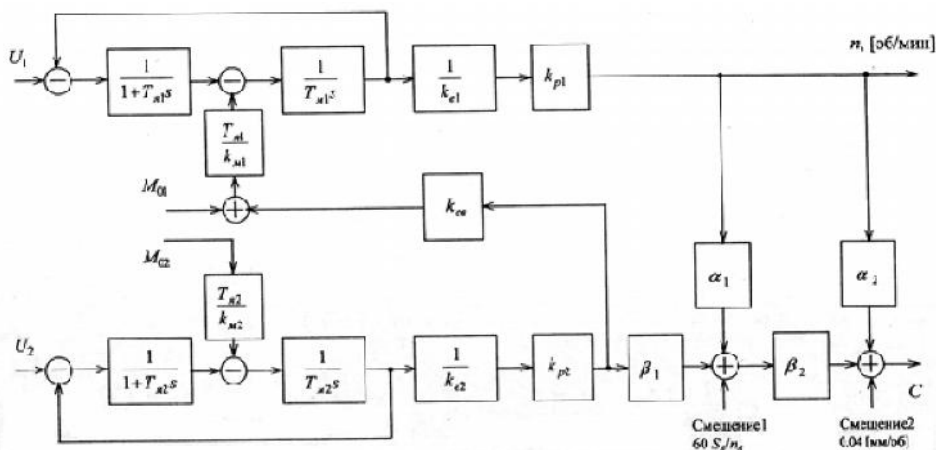


Рис. 4. Структурная схема модели сверлильного станка.

После упрощений и перехода к масштабированным величинам, передаточная функция имеет вид:

$$P(s) = \begin{bmatrix} \frac{21,82}{0,13s + 1} & \frac{-5,2(0,012s + 1)}{0,015s^2 + 0,23s + 1} \\ \frac{-60}{0,13s + 1} & \frac{0,27s + 1,5}{0,015s^2 + 0,23s + 1} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Решалась задача синтеза регулятора исходя из следующей постановки: а) система должна быть астатической; б) реальные части полюсов замкнутой системы лежат внутри интервала $[-10; -3.5]$; в) для уменьшения перерегулирования минимизируется функционал

$J = \max_{i,j} \left\{ \left\| h_{ij}(s) \right\|_{\infty} - h_{ij}(0) \right\}$, где $h_{ij}(s)$ – элементы передаточной функции замкнутой системы. Для достижения поставленной задачи синтеза и упрощения закона регулирования выбираем интегральный закон управления.

В результате действия процедуры оптимизации получено: $J=0.124$; полюса замкнутой системы: -9.14 ; $-3.46 \pm j1.59$; $-3.48 \pm j0.98$ и собственно передаточная функция регулятора, который располагается в прямой цепи замкнутой системы,

$$C(s) = \begin{bmatrix} \frac{0,002}{s} & \frac{0,047}{s} \\ \frac{0,271}{s} & \frac{0,233}{s} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Переходные процессы замкнутой системы по входному воздействию показаны на рис. 5 (графики характеризуют как прямые каналы, так и перекрёстные связи). Здесь смещения α_0 и γ_0 не учитываются. Видим, что длительность переходных процессов по первому каналу составляет 0,5 секунды, по второму каналу – 0,25 секунды, что не является окончательным вариантом – имеются резервы уменьшения переходного процесса. Подбором параметров регулятора или выбором его новой структуры возможно уменьшение длительности переходных процессов без ухудшения качества регулирования, кроме того, желательно, чтобы переходные процессы по обоим параметрам были бы одинаковыми по постоянной времени (уменьшаются колебательные процессы в системе при отработке возмущений по $M_{кр}$).

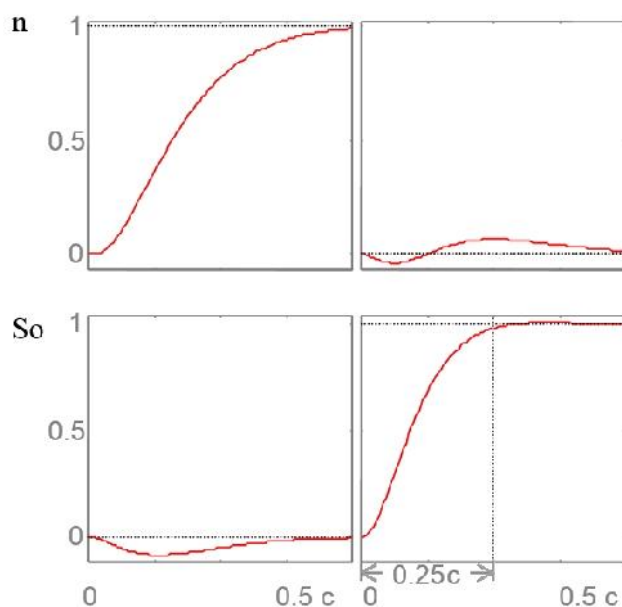


Рис. 5. Переходные процессы системы, реализующей оптимальный режим сверления по критерию “минимума затрат” для $\varnothing 4,2$ при обработке 1X18Н9Т.

Новые подходы к нормированию режимов обработки позволили скорректировать методику их назначения для специальных сверлильных станков с САР, как одноканальных, так и двухканальных.

Экономический расчет оптимальных режимов обработки детали типа решетка из 1X18Н9Т на 8-ми позиционном сверлильном станке с ЧПУ при сверлении 838 отверстий

диаметром 5,5 мм сверлами из Р6М5 показал, что при изготовлении партии деталей в 1000 шт. экономится порядка 55000 руб. (в ценах 2010 г.) по сравнению с режимом, назначенным по [27-29], при этом стойкость сверл на оптимальном режиме была выше в 1,33 раза, производительность – в 1,62 раза, а удельные затраты при этом уменьшились в 1,48 раза.

Выводы

1. Координаты точек оптимальных режимов резания по “минимуму затрат” лежат на сечении IIS_M , представляющем собой геометрическое место точек максимальных стойкостей для текущих значений минутных подач. Это необходимо учитывать в случае корректировки режимов сверления при изменении экономических факторов и констант.

2. При назначении оптимальных режимов резания для специальных станков с регулированием $M_{кр}$ рекомендуется использовать характеристическую линию IIS_M , где в области расчётной оптимальной точки режима “минимуму затрат” измеряется крутящий момент, который и устанавливается затем на задатчике $M_{кр}$ станка (число оборотов определяется также данной расчётной точкой на IIS_M).

3. Путём применения двухканального регулятора ($M_{кр} = f(S_0, n)$) вместо одноканального ($M_{кр} = f(S_0)$) вышеописанным способом достигается учёт зависимостей точности обработки и стойкости инструмента от режимов сверления в более эффективном виде, при этом режимы автоматически регулируются вдоль линии IIS_M . Оценка эффекта показывает, что данный подход позволит ориентировочно на 30 – 50% (относительно одноканального случая) повысить как стойкость инструмента, так и точность обработки отверстий.

4. Используемый метод синтеза регуляторов пониженного порядка показал свою работоспособность для конструирования регуляторов промышленных систем.

Список литературы

1. Kovalev V.D., Vasilchenko Y.D., Dašić P. Adaptive optimal control of a heavy lathe operation // Journal of Mechanics Engineering and Automation. – 2014. – N 4. – P. 269–275.
2. Shreehah T.A.A. Extending the technological capability of turning operation // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2009. – Vol. 2, N. 1. – P. 192–201.
3. Rubio L., De la Sen M. An expert mill cutter and cutting parameters se-lection system incorporating a control strategy // Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control. – Seoul, Korea, 2008. – P. 8362–8367.
4. Model-based expert sys-tem to automatically adapt milling forces in Pareto optimal multi-objective working points / L. Rubio, M. De la Sen, A.P. Longstaff, S. Fletcher // Expert Systems with Applications. – 2013. – N 40. – P. 2312–2322.
5. Hierarchical optimal control of a turning process linearization approach / A. Dasgupta, B. Pandurangan, R.G. Landers, S.N. Balakrishnan // Proceedings of the American Control Conference. – Denver, Colorado, 2003. – P. 2608–2613.
6. Adaptive self-learning controller design for feedrate maximisation of machining process / F. Cus, U. Zuperl, E. Kiker, M. Milfelner // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2008. – Vol. 31, iss. 2. – P. 469–476.

7. Lan T.-S., Lan C.-H., Yeh L.-J. Dynamic machining project control model under order quantity and deadline constraints // Journal of the Operations Research Society of Japan. – 2002. – Vol. 45, N 1. – P. 83–92.
8. Гусев В.Г., Наумов Г.М. Перспективные направления повышения уровня технологической подготовки производства высокоточных изделий на станках с ЧПУ // Вестник машиностроения. – 2015. – № 10. – С. 20–24.
9. Бушуев В.В., Молодцов В.В. Методика моделирования механизмов приводов подачи станков с ЧПУ // Вестник машиностроения. – 2015. – № 8. – С. 8–13.
10. Пини Б.Е., Курец А.М. Обработка глубоких отверстий на станках с ЧПУ // Вестник машиностроения. – 2014. – № 6. – С. 71–74.
11. Пасько Н.И., Картавцев И.С. Моделирование процесса текущего контроля и подналадки станка с ЧПУ с применением контрольных карт // Вестник машиностроения. – 2013. – № 8. – С. 55–60.
12. Терешин М.В. Влияние переменных режимов резания на износ быстро-режущих сверл // Вестник МГТУ Станкин. – 2013. – № 2 (25). – С. 47–49.
13. Терешин М.В., Кулагин О.А. Оперативное регулирование процесса резания в технологических системах металлообработки // Вестник МГТУ Станкин. – 2013. – № 2 (25). – С. 25–30.
14. Бушуев В.В., Дорожко А.О., Рывкин Б.М. Метод проектирования станков нового поколения на базе унифицированных мехатронных модулей // Вестник МГТУ Станкин. – 2012. – № 1 (18). – С. 15–21.
15. Григорьев А.С. Инструментарий системы ЧПУ для диагностики и прогнозирования износа режущего инструмента в реальном времени при токарной обработке // Вестник МГТУ Станкин. – 2012. – № 1 (18). – С. 39–43.
16. Козочкин М.П., Маслов А.Р., Порватов А.Н. Управление процессом резания посредством интеграции подсистемы диагностирования в систему ЧПУ металлообрабатывающего станка // Вестник МГТУ Станкин. – 2011. – № 3 (15). – С. 110–111.
17. Аверьянов О.И., Аверьянова И.О., Юденков Н.П. Тенденции мирового развития многоцелевых станков с ЧПУ // Машиностроение и инженерное образование. – 2013. – № 2. – С. 28–38.
18. Аверьянова И.О. Определение состава парка металлорежущих станков с ЧПУ для обработки массива деталей // Машиностроение и инженерное образование. – 2011. – № 4. – С. 19–23.
19. Рагрин Н.А. Разработка статистической стойкостной модели спиральных сверл при различных типах производства // Технологии машиностроения. – 2015. – № 11. – С. 56–59.
20. Рагрин Н.А. Математическая модель стойкостной зависимости при сверлении // Технологии машиностроения. – 2014. – № 1. – С. 49–55.
21. Рагрин Н.А. Влияние условий обработки на физическую модель износостойкости инструмента при сверлении // Технологии машиностроения. – 2013. – № 12. – С. 15–25.
22. Адаптивное управления станками / под ред. Б.С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1973. – 633 с.
23. Самонастраивающиеся станки / под ред. Б.С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1986. – 68 с.
24. Адаптивные системы управления металлорежущими станками / под ред. А.Е. Кобринского. – М.: НИИМАШ, 1971. – 207 с.
25. Оптимизация режимов резания при сверлении отверстий на многоцелевых станках / Н.Н. Бокучава, К. Василенко, Р.И. Церетели, В.Ш. Джангава // СТИН. – 1991. – № 6. – С. 30–32.
26. Развитие науки о резании металлов / под ред. Н.Н. Зорева, Г.И. Грановского, М.Н. Ларина, И.П. Третьякова. – М.: Машиностроение, 1967. – 414 с.

27. *Островский В.И.* Теория резания металлов. Расчет оптимальных режимов резания: учебное пособие. – Л.: СЗПИ, 1986. – 68 с.
28. Общемашиностроительные нормативы режимов резания. Т. 1 / под ред. А.Д. Локтева, И.Ф. Гущина, В.А. Батуева. – М.: Машиностроение, 1991. – 640 с.
29. *Гуревич Я.Л.* Режимы резания труднообрабатываемых материалов. – М.: Машиностроение, 1976. – 176 с.
30. *Смагин Г.И., Карманов В.С.* Методика нормирования оптимальных режимов резания труднообрабатываемых материалов по стойкости и производительности // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2004. – № 4. – С. 34–36.
31. *Смагин Г.И., Карманов В.С.* Характеристики и критерии стойкости инструмента при черновой и чистовой обработке точением // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2005. – № 4. – С. 24–25.
32. *Карманов В.С., Смагин Г.И.* Коррекция экстраполяционной области характеристической стойкостной модели при нормировании режимов резания труднообрабатываемых материалов (на примере сверления) // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2006. – № 2. – С. 34–35.
33. *Карманов В.С.* Исследование математических моделей стойкости режущего инструмента // *Научный вестник НГТУ*. – 2006. – № 2. – С. 55–64.
34. *Смагин Г.И., Карманов В.С.* Применение метода характеристических линий и характеристических поверхностей при нормировании режимов резания // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2009. – № 1. – С. 16–19.
35. *Смагин Г.И., Карманов В.С.* Алгоритм нормирования режимов резания труднообрабатываемых материалов по методу характеристических линий и поверхностей при использовании специальных планов эксперимента // *Научный вестник НГТУ*. – 2011. – № 3. – С. 149–158.
36. The construction of accelerated life model for reliability of a cutting tool / E. Chimitova, M. Semenova, V. Karmanov, G. Smagin // *Applied Methods of Statistical Analysis. Nonparametric Approach Proceedings of the International Workshop*. – 2015. – P. 220–226.
37. Учет энергопотребления при выборе оптимальных режимов сверления = Consideration of power consumption in choosing optimal modes of drilling / Г.И. Смагин, В.С. Карманов, Н.Д. Яковлев, И.В. Федин // *Актуальные проблемы в машиностроении = Actual problems in machine building*. – 2015. – № 2. – С. 27–33.
38. *Смагин Г.И., Карманов В.С., Федин И.В.* Использование базовой модели процесса сверления для нормирования режимов резания = Use of basic model of process of drilling for rationing of the modes of cutting of the hardly processed materials // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2015. – № 4 (69). – С. 6–17.
39. *Древаль А.Е., Щелкова П.Ю.* Энергопотребление при обработке отверстий быстрорежущими сверлами // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2013. – № 12 (645). – С. 19–23.
40. *Воевода А.А., Мелешкин А.И.* Синтез регуляторов пониженного порядка // *Научный вестник НГТУ*. – 1997. – № 3. – С. 41–58.
41. Возможности повышения точности и стойкости инструмента путем использования двухканальной САУ для управления процессов сверления / В.А. Аксенов, А.А. Воевода, Д.В. Ермакович, Г.И. Смагин // *Сборник научных трудов НГТУ*. – 1996. – № 2 (4). – С. 47–52.
42. *Воевода А.А., Веретельникова Е.Л., Смагин Г.И.* Синтез систем управления для реализации оптимальных режимов сверления по критерию минимума затрат при наличии помехи управления // *Актуальные проблемы электронного приборостроения: АПЭП–2000: труды V международной конференции, Новосибирск, 26–29 сентября 2000*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – Т. 3. – 3 с.

43. Воевода А.А., Веретьникова Е.Л., Смагин Г.И. Проектирование двухканальных систем управления для специальных станков с учетом информации о стойкости инструмента и помехи измерения // Информационные системы и технологии, ИСТ–2000: международная научно-техническая конференция, 8–11 ноября 2000. – Новосибирск, 2000. – Т. 2. – С. 383–389.

THE APPROACH TO THE CONTROL OF THE DRILLING PROCESS BASED ON THE CONVEX TOOL LIFE MODEL

Smagin G. I., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: g.smagin@ngs.ru

Karmanov V. S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: karmanov@corp.nstu.ru

Fedin I. V., Master's Degree student, e-mail: ivan_fedin@outlook.com

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

A method of calculating of the two-channel automatic control systems for metal-cutting equipment are proposed in this paper. Most research in this area are based on the traditional model of resistance of the cutting tool, the pre-emptive power form. The authors propose a convex exponential tool life model with one extremum, and based on this model, the method of calculating the optimum cutting conditions. The method of characteristic lines and characteristic surfaces are used in developing this approach. For the selected optimality criterion the characteristic line, on which are the optimal cutting parameters, is found. The specific value of the mode is determined by economic data belonging to the optimality criterion.

In this paper it is proposed to apply the developed methodology to the design of machine tools with numerical control and automatic control systems. It is proposed to apply the control for torque stabilization. Examples of analytical problem solution of the optimal control in the case of simple models of depending of the torque from the modes and processing time. An example of the synthesis of controller for dual channel control is provided. The evaluation of the economic effect from the introduction of the developed technique is spent.

The proposed method was investigated on life tests of the drilling process data, but can be used for other processing operations, such as whetting or milling, with the necessary adjustments.

Keywords

optimal drilling parameters, machines with system of automatic regulation, single-channel and two-channel control systems of drives for the machine, stabilization of a torsion torque on the tool, synthesis of regulators of the lowered order, models of firmness of the tool, rationing of the modes of processing, characteristic lines and characteristic surfaces, rationing of the modes of processing

УДК 621.921.1:621.923.74

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАЦИИ ПРИТИРКИ ПУТЕМ
ПРИМЕНЕНИЯ ЗЕРЕН С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ФОРМОЙ**

*А.Н. КОРОТКОВ, доктор техн. наук, профессор
Д.В. ВИДИН, ст. преподаватель
(КузГТУ, г. Кемерово)*

Видин Д.В. – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28,
Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
e-mail: dionis.vidin@gmail.com

Притирка является эффективным способом окончательной обработки деталей. Вместе с тем анализ показывает, что этот вид обработки обладает существенным недостатком, связанным с отсутствием контроля формы используемых абразивных или алмазных зерен. Неупорядоченность формы зерен приводит к тому, что каждое зерно по-разному срезает металл и во многих случаях по этой причине либо просто не работает, либо делает минимальный вклад в совокупный процесс обработки.

Предложены новые составы абразивно-притирочных паст, отличающихся от известных тем, что в них используются зерна с контролируемой и одинаковой формой. Такие зерна можно получать, например, за счет использования технологии вибрационной сепарации абразивных масс. Количественный контроль формы фракций сепарируемых зерен осуществляли путем использования понятия коэффициента формы, равного отношению проекций описанных и вписанных окружностей в контуры сепарируемых зерен, на основе специально разработанных программ для ЭВМ, способных обрабатывать большие массивы экспериментальных данных (не менее 100 штук отдельных зерен). Описаны результаты испытаний новых составов паст при различных схемах притирки. Полученные результаты свидетельствуют о том, что реализуя принцип дифференцированного подхода к выбору формы зерен, можно добиться значительного улучшения режущей способности абразивно-притирочных паст и качества обработки поверхности деталей.

Ключевые слова: абразивно-притирочные пасты, форма шлифовальных зерен, коэффициент формы, схемы притирки деталей, режущая способность, шероховатость обработки.

Введение

Притирка – это снятие тончайших слоев металла в среде смазки посредством мелкозернистых абразивных порошков или алмазных паст, нанесенных на поверхность инструмента (притира). В качестве инструмента используется притиры, изготовленные из серого чугуна перлитной структуры или другого мягкого металла. Притирка представляет собой один из самых точных способов окончательной доводки поверхностей, в процессе которого с поверхности обрабатываемой детали удаляются все неровности, а также неровности, появившиеся в результате предыдущей обработки.

Абразивно-притирочные пасты представляют собой смесь абразивных зёрен и связующего материала, в состав которого могут входить в определенных пропорциях полиизобутилен, олеиновая кислота, стеарин, парафин, керосин, минеральное масло, мыло и масло индустриальное [1, 2, 3]. Главными режущими элементами паст являются зерна, от эксплуатационных возможностей которых в основном и зависит эффективность процесса притирки.

Между тем, анализ показывает, что у всех известных составов есть один общий и существенный недостаток – они состоят из абразивных (или алмазных) зерен с произвольной формой. Такая форма зерен, как следствие, формирует у них хаотичную и неупорядоченную геометрию, что не позволяет обеспечить максимальную эффективность изготавливаемых из них паст, из-за значительной дифференциации в работоспособности каждого отдельного зерна. Многие зерна, из-за неблагоприятной геометрии, либо вовсе не участвуют в совокупном процессе микрорезания, либо участвуют в нем минимально. В итоге, у паст с неупорядоченной формой и геометрией зерен не достигается максимальная интенсивность съема металла, а также занижаются коэффициент шлифования и качество обрабатываемых поверхностей.

Методика испытаний и результаты экспериментов

В лаборатории материаловедения КузГТУ разработан новый состав абразивно-притирочных паст, на который получен патент РФ и который устраняет отмеченный недостаток за счет применения зерен с контролируемой и одинаковой формой [4]. Идентичность и упорядоченность зерен достигается за счет разделения исходной массы стандартного абразива на ряд фракций по признаку формы. Аналогичный результат может быть также получен путем изготовления зерен с заданной формой по технологиям, подобным производству сферо- и формокорундов.

В данной работе представлены результаты применения абразивно-притирочных паст с контролируемой формой зерен для схем притирки деталей с постоянным расстоянием между притиром и обрабатываемой деталью.

На первом этапе изучалась классическая схема притирки (см. рис. 1), когда в качестве притира использовался металлический диск 1 из стали 3 (118-120 НВ) диаметром 130 мм, а обрабатываемая деталь 2 представляла собой диск диаметром 240 мм (сталь 3). Притиру и детали сообщалось вращение с окружной скоростью $V_{\text{окр}}=13,8$ м/с. Между деталью и притиром помещалась притирочная паста, содержащая классифицированные по форме шлифовальные зерна. Для проведения исследований было приготовлено три разновидности притирочных паст на базе шлифовальных зерен марки 13A40 с разной формой зерен. Одинаковая для исследуемой фракции форма зерен, формировалась путем разделения исходной массы абразива на вибрационном сепараторе по признаку формы [5]. Форма зерен количественно оценивалась с помощью коэффициента формы, равного отношению описанного вокруг контура зерна окружности к вписанной окружности: $K_{\phi}=D_{\text{оп}}/D_{\text{вп}}$. Определение коэффициента формы осуществлялось с помощью микроскопа, сканера и специально разработанной программы для ЭВМ [6]. Усредненный коэффициент формы для той или иной фракции зерен определялся на основании обмеров и вычислений не менее, чем для 100 отдельных зерен из рассматриваемых фракций.

Испытанию были подвергнуты притирочные пасты со следующими коэффициентами формы зерен: $K_{\phi}=1,3$; $K_{\phi}=2,1$; $K_{\phi}=4,1$ (следует отметить, что чем

ближе коэффициент формы к единице, тем более округлую, изометрическую форму имеют зерна; и наоборот – чем значительнее величина коэффициента формы, тем более вытянутую, пластинчатую и иглообразную конфигурацию эти зерна имеют).

Усилие прижатия притира к детали составляло 15 Н, а время притирки насчитывало 5 мин.

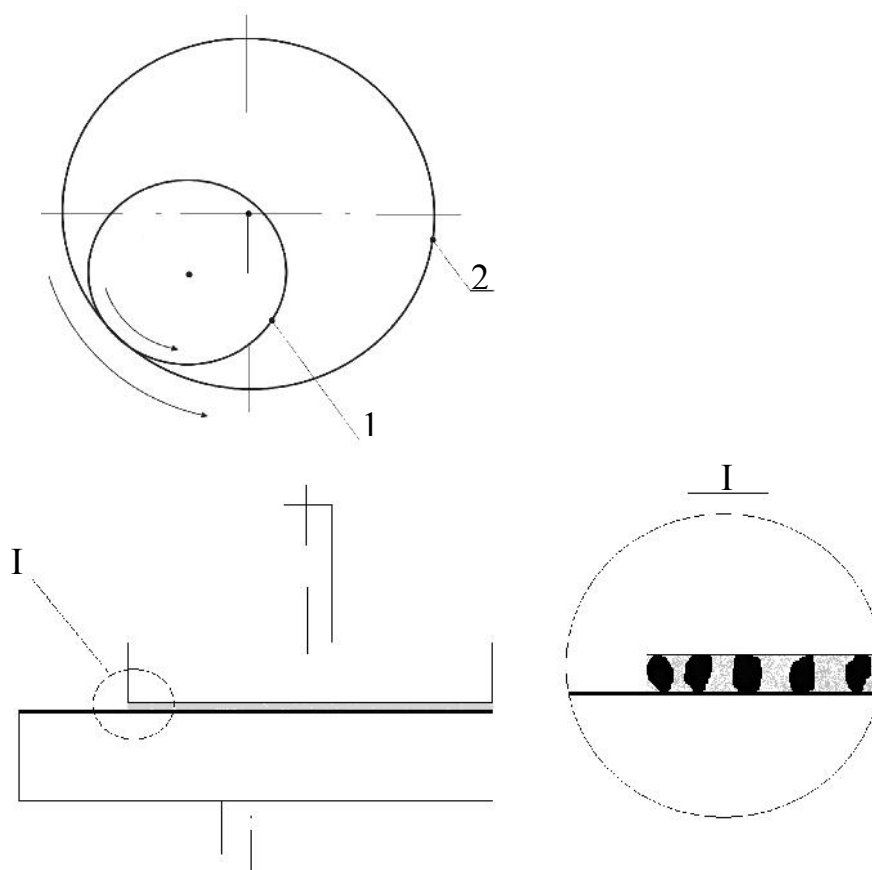


Рис. 1. Схема притирки

Притирочная паста состояла из 75% наполнителя и 25% абразивных зерен марки 13A40. В качестве наполнителя использовалась смесь стеарина и машинного масла 5W30 в соотношении три к двум.

В ходе испытаний оценивалась режущая способность притирочной пасты (количество снятого металла за определенный период времени) и шероховатость обрабатываемой поверхности.

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний представлены в виде диаграмм на рис. 2 и рис. 3.

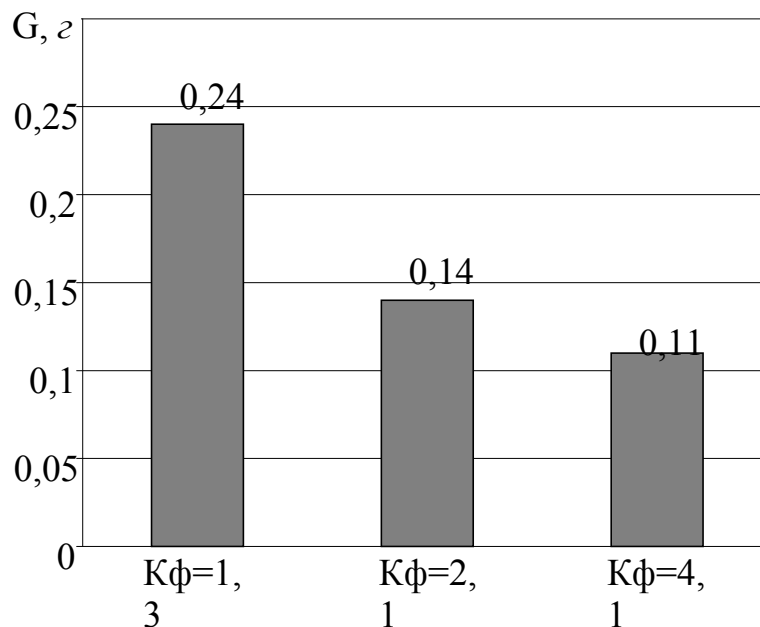


Рис. 2. Режущая способность притирочных паст с разной формой зерен (за 5 минут работы)

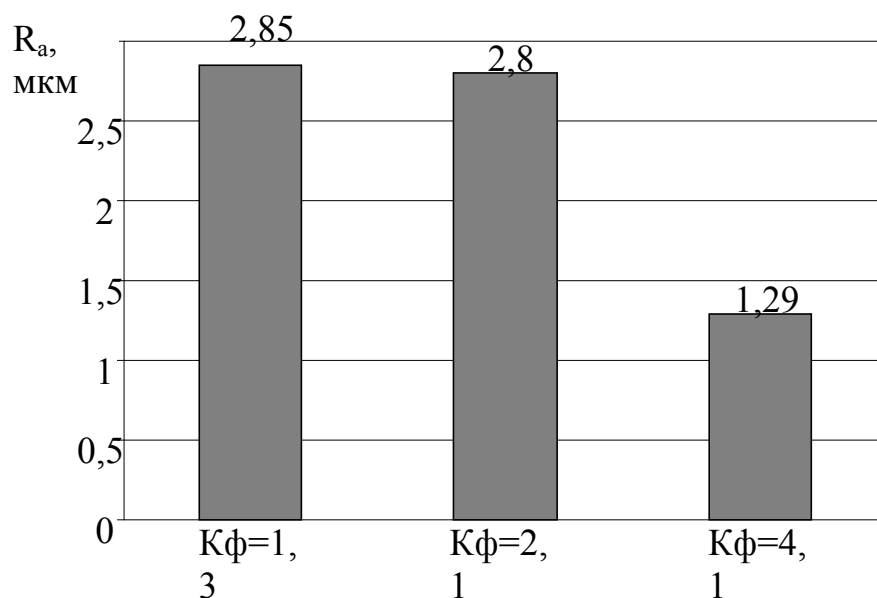


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности R_a от формы зерен в притирочных пастах

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что форма абразивных частиц, используемых в притирочной пасте, значительно влияет на производительность притирки и шероховатость обрабатываемых поверхностей.

На следующем этапе проводился подбор состава абразивно-притирочных паст с контролируемой формой зерен, а также оценивалась работоспособность при вибрационной схеме обработки (см. рис. 4).

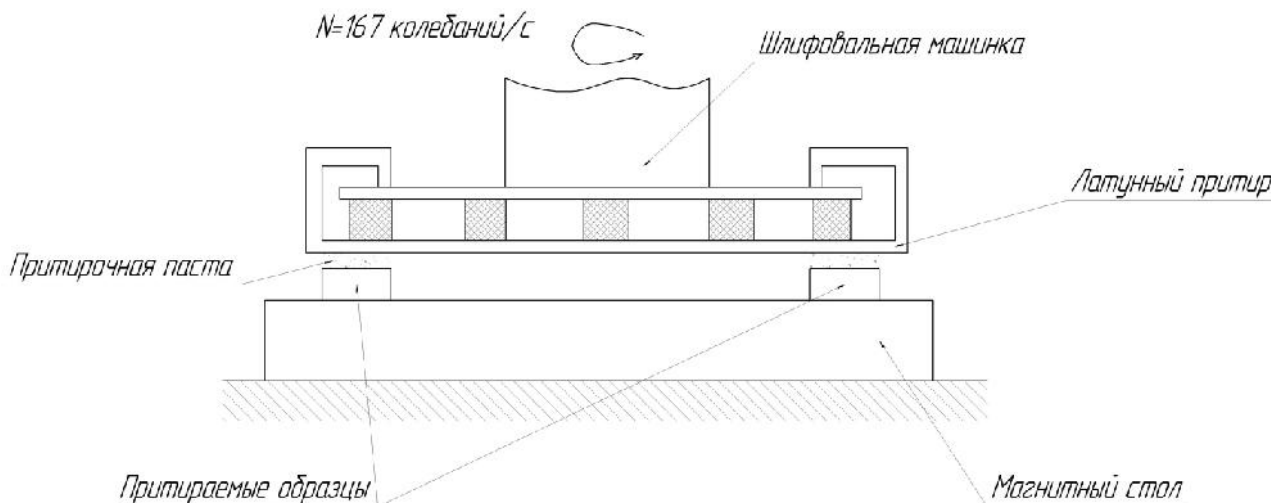


Рис. 4. Вибрационная схема притирки

В качестве притира использовался лист из латуни (Л90), закрепленный на подошве виброшлифовальной машинки. Обрабатываемые детали изготавливались из двух материалов – стали 45 после улучшения (304 НВ) и стали ШХ4 после упрочнения (HRC 60). Притиру сообщалось круговое колебательное движение с частотой 167 колебаний в секунду. Детали находились в статичном положении, а их закрепление осуществлялось с помощью магнитного стола плоско-шлифовального станка.

В качестве абразивных зерен использовались шлифовальные зерна двух разных зернистостей: 24A10 и 24A16, предварительно классифицированных по форме.

Между обрабатываемыми образцами и притиром помещалась притирочная паста, содержащая классифицированные по форме шлифовальные зерна. Усилие прижатия притира к детали было постоянным и составляло 12,6 Н, время абразивной обработки каждого образца составляло по 40 минут, при этом через каждые 5 минут производилось обновление притирочной пасты, поскольку она прекращала осуществлять процесс обработки из-за наличия образующейся стружки.

В ходе испытаний оценивалась режущая способность абразива и шероховатость обрабатываемой поверхности. Результаты испытаний при реализации вибрационной схемы обработки деталей представлены на рис. 5 – рис. 8.

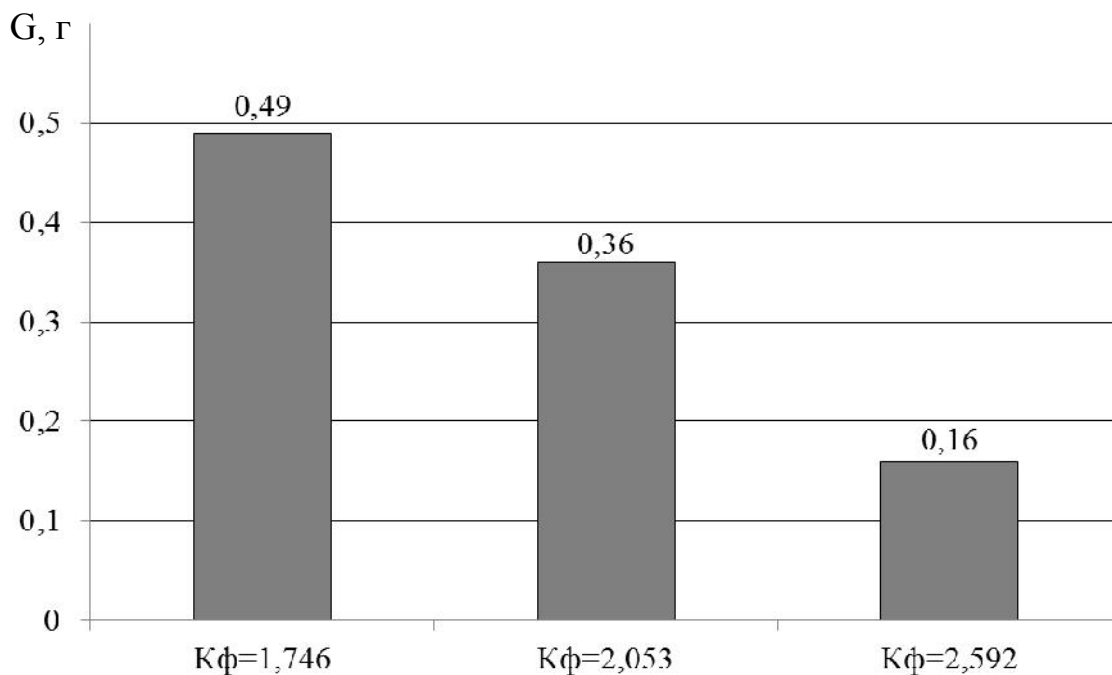


Рис. 5. Режущая способность притирочных паст из абразива 24А16 с разной формой зерен на стали 45 (за 40 минут работы)

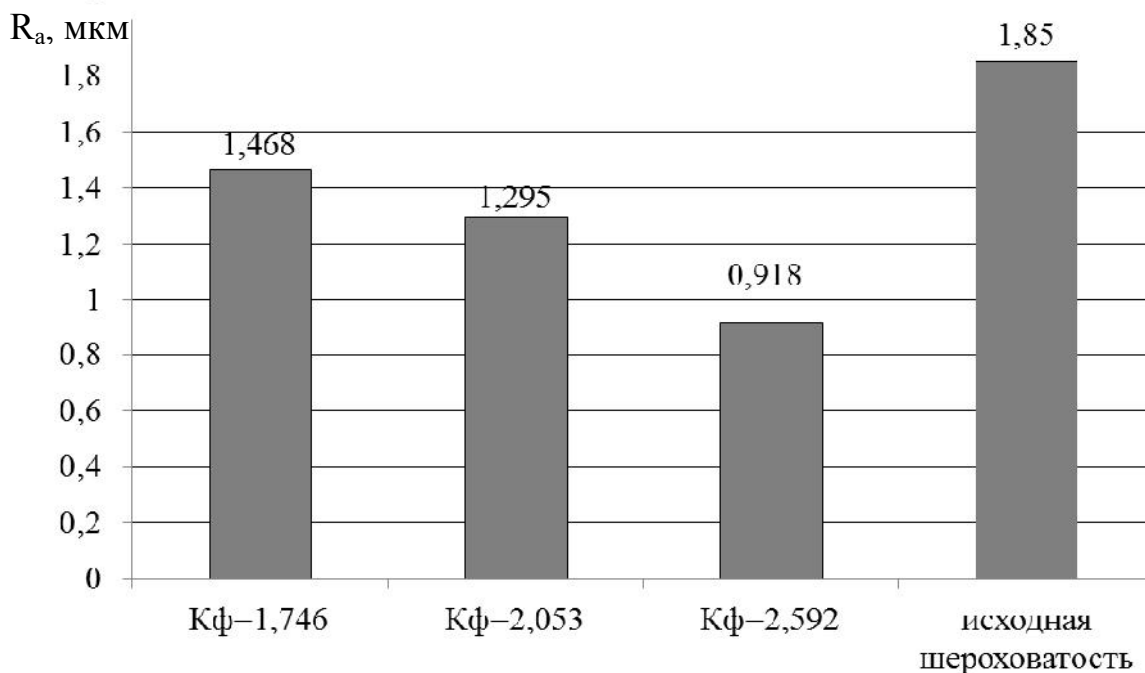


Рис. 6. Зависимость шероховатости поверхности R_a от формы зерен в притирочных пастах (сталь 45, абразив 24А16)

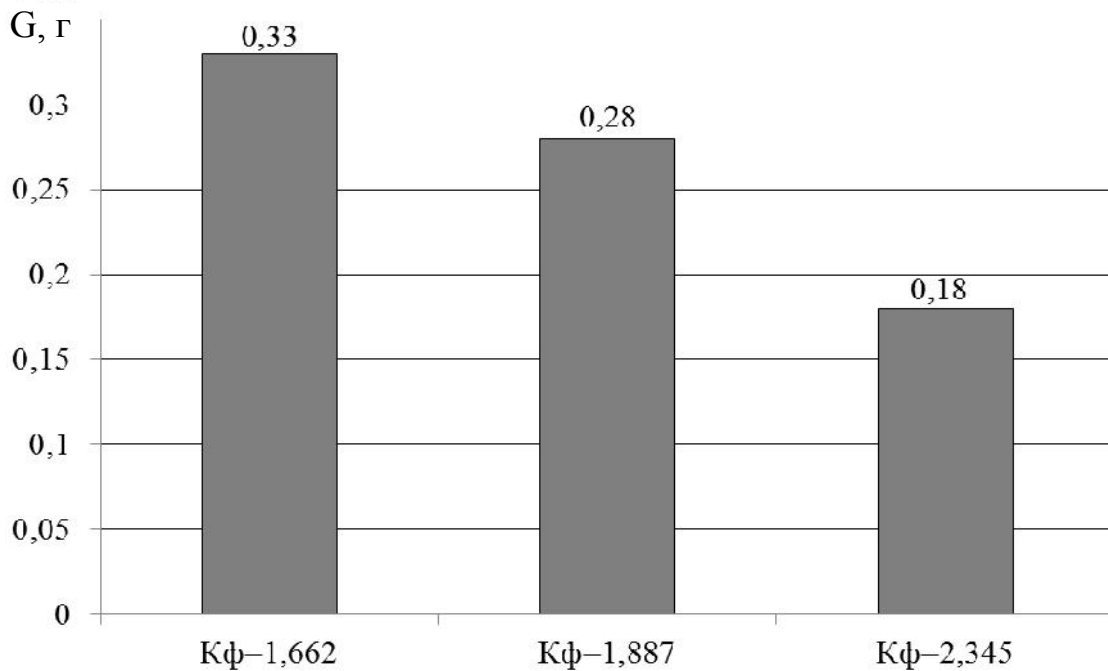


Рис. 7. Режущая способность притирочных паст из абразива 24А10 с разной формой зерен на стали ШХ4 (за 40 минут работы)

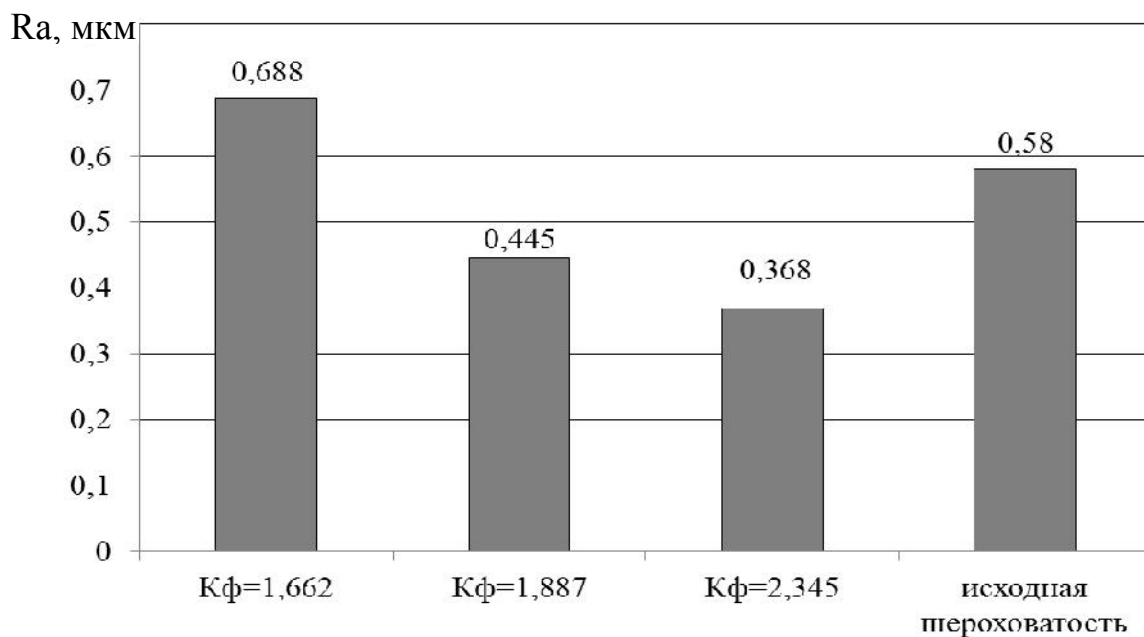


Рис. 8. Зависимость шероховатости поверхности R_a от формы зерен в притирочных пастах (сталь ШХ4, абразив 24А10)

Выводы

Таким образом, для классической схемы притирки, используя зерна изометрической формы, можно в 2,2 раза повысить производительность притирки, а применяя зерна игольчатой формы – более чем в 2 раза снизить шероховатость поверхности, не меняя марку и зернистость используемого абразива.

Для вибрационной схемы притирки установлено, что у абразивно-притирочных паст с изометрической формой зерен интенсивность съема металла в среднем выше на 63%, а у паст с игольчатой формой зерен шероховатость обработанной поверхности ниже на 11-18%, чем у стандартных абразивно-притирочных паст, состоящих из зерен с произвольной формой.

В целом это означает, что за счет подбора формы зерен можно заставить обычный абразив работать более эффективно, не используя более дорогой и дефицитный шлифовальный материал и не усложняя схему обработки.

Список литературы

1. Патент 2034005 Российская Федерация, МПК⁶ С 09 С 1/02. Абразивно-притирочный состав / Ю.П. Холмогорцев, Е.С. Устимов, Л.П. Кирдяшкина. – № 5018458/05; заявл. 20.12.1991; опубл. 30.04.1995.
2. Патент 2058360 Российская Федерация, МПК⁶ С 09 G 1/02. Абразивная паста / Г.М. Александрова. – № 93044932/04; заявл. 14.09.1993; опубл. 20.04.1996.
3. Патент 2167902 Российская Федерация, МПК⁷ С 09 G 1/02. Доводочно-притирочная паста / П.П. Дудко, В.Н. Кузьмин. – № 2000118717/04; заявл. 05.07.2000; опубл. 27.05.2001.
4. Патент 2467047 Российская Федерация, МПК С 09 G 1/02. Абразивно-притирочная паста / А.Н. Коротков, Д.В. Видин. – № 2011117908/05; заявл. 04.05.2011; опубл. 20.11.2012, Бюл. № 32.
5. Патент 2248851 Российская Федерация, МПК⁷ В 07 В 1/40, 13/00. Вибрационный сепаратор / А.Н. Коротков, Г.М. Дубов, В.Г. Баштанов. – № 2003129945/03; заявл. 08.10.2003; опубл. 27.03.2005, Бюл. № 9.
6. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006610153. Форма шлифовальных зерен / А.Н. Коротков, Г.М. Рылов. – № 2005612738; заявл. 25.10.2005; опубл. 10.01.2006.
7. *Лудченко А.А., Сова И.П.* Техническое обслуживание и ремонт автомобилей: учебник для вузов. – Киев: Вища школа, 1983.
8. *Шандричев В.А.* Основы технологии автостроения и ремонт автомобилей. – Л.: Машиностроение, 1976.
9. *Суханов Б.Н., Борзых И.О., Бедарев Ю.Ф.* Техническое обслуживание и ремонт автомобилей: пособие по дипломному проектированию. – М.: Транспорт, 1991.
10. *Абдиров Р.А.* Исследование и разработка нового метода для определения механической прочности алмазно-абразивного зерна: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1968. – 21 с.
11. Абразивная и алмазная обработка материалов / А.Н. Резников, Г.М. Гаврилов и др.; под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 384 с.
12. *Барадай В.Н., Кононенко С.Н.* О фрикционной сепарации сыпучих материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – (Труды ВНИИЗ).
13. *Богомолов Н.И.* Механизм износа абразивных материалов // Повышение износостойкости и срока службы машин: тезисы докладов. – Киев, 1970. – Вып. 1. – С. 30–34.

14. *Ваксер Д.Б.* Пути повышения производительности при шлифовании. – М.; Л.: Машиностроение, 1964. – 122 с.
15. *Ефимов В.В.* О влиянии технологической среды на условия перехода от внешнего трения к микрорезанию // Трение и износ. – 1988. – Т. 9, № 1. – С. 150–154.
16. *Коротков А.Н.* Эксплуатационные свойства абразивных материалов: монография. – Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1992. – 122 с.

IMPROVING OF ABRASIVE THE EFFICIENCY OF LAPPING OPERATIONS THROUGH THE APPLICATION OF GRAINS WITH THE CONTROLLABLE FORM

Korotkov A. N., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: korotkov.a.n@mail.ru
Vidin D. V., Senior Lecturer, e-mail: dionis.vidin@gmail.com

Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 28 Vesennaya st., Kemerovo, 650000, Russian Federation

Abstract

Lapping is used for finishing of details. But this type of treatment has a significant drawback. Which is that for abrasive pastes diamond and abrasive grains with disordered and arbitrary shape are used. As a result, grains do not work or make a minimum contribution to the overall treatment process.

We propose new compositions abrasive lapping pastes. They are differ from the conventional ones in using of grains with a controlled form. These grains are prepared through the use of abrasive masses vibration division technology. Quantitative control of grain form in fractions after the separation was carried out through the use of the concept of form factor. It is the ratio of the projections described and inscribed circles in the contours of grains. To determine the shape factor specially designed computer programs are used. They are able to handle large amounts of experimental data (at least 100 pieces of individual grains). We describe the results of tests of new compositions of pastes with different schemes of lapping. The results show that purposeful choice of the form of grains can achieve a significant improvement in the cutting ability of abrasive lapping pastes and surface quality of processing parts.

Keywords

abrasive valve lapping, grinding grains, form factor, circuit lapping, cutting ability, surface roughness treatment

УДК 620.178.4

ПРУЖИНЫ РЕССОРНОГО КОМПЛЕКТА ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

*А. М. МАРКОВ*¹, доктор тех. наук, профессор
*А. В. ГАБЕЦ*², канд. техн. наук, директор по развитию
*Д. А. ГАБЕЦ*¹, аспирант
*Д. В. ГАВРИКОВ*³, зам. главного конструктора
(¹АлтГТУ, г. Барнаул, ²ООО «АСЛЗ», г. Барнаул,
³ОАО «Алтайвагон», г. Новоалтайск)

Габец Д. А. - 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: gabets22@mail.ru

Рассмотрен вариант модернизации тележки грузового вагона с применением стали марки 60С2ХФА для пружин рессорного комплекта. Представлены причины и факторы изломов типовых пружин узла гашения колебания. Проведена оценка напряженно-деформированного состояния пружин на соответствие требованиям норм расчета и проектирования вагонов железных дорог РФ.

Ключевые слова: пружина, тележка грузового вагона, подклиновое пружина, пружина рессорного комплекта, узел гашения колебаний, прочность, долговечность, работоспособность, фрикционный клин.

Введение

Рессорное подвешивание является одним из важнейших элементов ходовых частей, от которого зависит плавность хода при движении вагона, в особенности при прохождении стыковых соединений и продольных неровностей рельсов. В этих условиях происходит колебание подвижного состава, и возникают динамические силы, действующие на элементы конструкции вагона и перевозимый груз. В целях обеспечения плавности хода, повышения безопасности движения поездов, сохранности грузов при перевозках применяют специальное устройство в ходовых частях вагонов — рессорное подвешивание, представленное на рисунке 1. Рессорное подвешивание состоит из упругих элементов, гасителя колебаний, возвращающих и стабилизирующих устройств [1-2]. Комплекс этих элементов обеспечивает снижение ускорений колебательного движения и уменьшение воздействия динамических сил на конструкцию вагона, создавая плавный ход подвижного состава в процессе эксплуатации. При этом параметры рессорного подвешивания должны соответствовать нормативным значениям и не должны существенно изменяться с течением времени [3].

Упругие элементы, являясь основной составной частью рессорного подвешивания, смягчают толчки и удары, действующие на движущийся вагон со стороны рельсового пути. У неподвижного вагона упругие элементы испытывают лишь воздействие статической нагрузки, прогибаясь на величину, называемую статическим прогибом. В качестве упругих элементов рессорного подвешивания применяют витые стальные пружины.



Рис. 1. Рессорное подвешивание тележки модели 18-100 (1 – Клин фрикционный, 2 - комплект двухрядных подклиновых пружин, 3- комплект двухрядных пружин, 4 – планка контактная)

Материалы исследования

В настоящее время ситуацию с повреждаемостью деталей тележек грузовых вагонов, в частности пружин рессорно-пружинного комплекта, нельзя считать удовлетворительной. По данным Главного вычислительного центра ОАО «РЖД» по причине излома пружин за период постройки вагонов с начала 2013 г. по апрель 2015 г. в текущий отцепочный ремонт поступило 7660 вагонов. Из них 2640 вагонов постройки ОАО «НПК Уралвагонзавод», 1128 вагонов постройки ЗАО «Промтрактор-Вагон», 938 вагонов постройки ОАО «Алтайвагон» и 2894 вагонов постройки остальных производителей. На основании данной статистики следует, что срок эксплуатации пружин рессорного подвешивания у тележек аналогичных модели 18-100 не достигает даже до первого деповского ремонта, который должен производиться на 3-ий год с момента постройки вагона. Причем, согласно ГОСТ 1452-2011, циклическая долговечность пружин рессорного подвешивания должна обеспечивать срок их службы в эксплуатации не менее 16-ти лет.

На рисунке 2 приведен пример излома внутренней подклиновой пружины. Вагон постройки 13.01.2012 г., пробег вагона на момент отказа составил 109008 км, излом пружины произошел в конце апреля 2014 г.

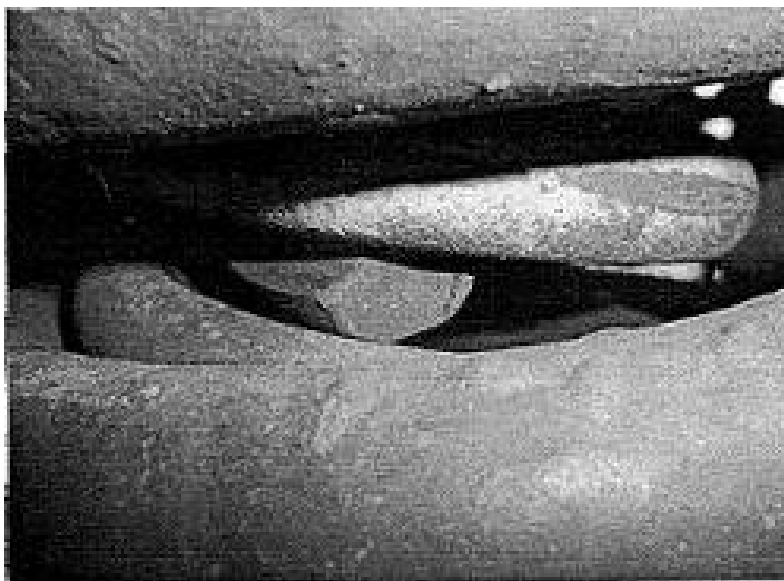


Рис. 2. Излом внутренней подклиновой пружины

В большинстве случаев излома пружин чаще всего ломаются именно подклиновые пружины. Из представленных фотографий можно сделать вывод о том, что характер излома пружины не усталостный, а возник в результате мгновенного разрушения вследствие высоких напряжений в первом рабочем витке пружины в непосредственной близости от опорного витка. Излом пружин, в первую очередь, приводит к нарушению стабильной работы friction узла гасителя колебаний и передаче повышенных динамических нагрузок на боковые рамы тележки, что может приводить к появлению усталостных трещин и разрушению боковых рам. Низкая эксплуатационная стойкость пружин рессорного подвешивания обусловлена, прежде всего, низким уровнем их физико-механических свойств и качества изготовления.

Причиной изломов пружин являются следующие факторы: качество изготовления пружин (наличие поверхностных дефектов); применяемые материалы; режимы нагружения, в частности - работа клиновых пружин в рессорном подвешивании.

Результаты и обсуждения

Типовые пружины, устанавливаемые на тележках модели 18-100 и её аналогах, изготавливаются из стали 55С2 ГОСТ 14959-79, по чертежам 100.30.002-0, и 100.30.004-0. Для анализа причин излома пружин необходимо провести оценку напряженно-деформированного состояния пружин на соответствие требованиям Норм [5].

При первом режиме нагружения напряжение среза для пружины наружной из стали 55С2 ГОСТ 14959-79 составило 702,61 МПа, для внутренней пружины - 726,87 МПа. При допуске напряжении среза $[\tau]=750$ МПа коэффициент запаса прочности составил 1,07 и 1,03 для наружной и внутренней пружины соответственно.

При третьем режиме нагружения напряжение среза для пружины наружной из стали 55С2 ГОСТ 14959-79 составило 594,97 МПа, для внутренней пружины - 621,22 МПа. При допуске напряжении среза $[\tau]=650$ МПа коэффициент запаса прочности составил 1,09 и 1,05 для наружной и внутренней пружины соответственно.

Выводы

На основании проведенных расчетов следует, что выпускаемые производителями пружины из стали 55С2 ГОСТ 14959-79 для тележки модели 18-100 и ее аналогов заведомо обладают низким запасом по прочности. Так как на качество пружин влияет материал и качество изготовления пружины, то применение стали 55С2 в пружинах рессорного подвешивания является нецелесообразным как для заводов изготовителей, так и для потребителей, эксплуатирующих вагоны. При этом ГОСТ 1452-2011 разрешает применение пружинных сталей не только по ГОСТ 14959-79, но и других сталей, обладающих свойствами не хуже чем у стали 55С2.

Исходя из этого, для изготовления пружин рессорного комплекта можно рекомендовать применение стали марки 60С2ХФА по ГОСТ 14959-79, обладающей допусковым напряжением среза $[\tau]=1050$ МПа при первом режиме и $[\tau]=800$ МПа при третьем режиме нагружения [6].

Применение стали 60С2ХФА позволит повысить запас прочности пружин на первом режиме нагружения на 39% и на 23% на третьем для обоих типов пружин рессорного комплекта грузовых тележек.

Список литературы

1. Оценка износа фрикционного клина узла гашения колебаний тележки грузового вагона / А.В. Габец, И.В. Левкин, М.В. Сапетов, А.В. Семенов // Ползуновский вестник. – 2015. – № 4, т. 1. – С. 16–18.
2. Методика регулируемой термообработки литых деталей / Е.О. Чертовских, Д.А. Габец, А.М. Марков, А.В. Габец // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 3, № 4. – С. 48–52.
3. Вагоны: учебник для вузов железно-дорожного транспорта / Л.А. Шадур, И.И. Челногов, Л.Н. Никольский, Е.Н. Никольский, В.Н. Котуранов, П.Г. Проскурнев, Г.А. Казанский, А.Л. Спиваковский, В.Ф. Девятков; под ред. Л.А. Шадура. – М.: Транспорт, 1980.
4. Габец А.В., Гавриков Д.В. Совершенствование конструкции подклиновой пружины узла гашения колебаний тележки грузового вагона средствами 3D-моделирования [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 4. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3450 (дата обращения: 21.03.2016).
5. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ–ВНИИЖТ, 1996.
6. Патент на полезную модель № 152365. Наружная подклиновая пружина тележки грузового вагона / А.В. Габец, Д.В. Гавриков. – Оpubл. 26.09.2014.

COIL SPRING GROUP FOR FREIGHT-CAR TRUCK

Markov A. M.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: andmarkov@inbox.ru

Gabets A.V.², Ph.D. (Engineering), Development director, e-mail: gabets22@gmail.com

Gabets D. A.¹, Ph.D. student, e-mail: gabets22@mail.ru

Gavrikov D. V.², Deputy Chief Designer, e-mail: fastdvg@gmail.com

¹ I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

² Ltd «Altai steel casting factory» (ASCF), 116/52 Kalinina avenue, Barnaul, 656037, Russian Federation

³ JSC «Altaivagon», 16 22nd Partsezda str., Novoaltaysk, 658087, Russian Federation

Abstract

We present a modernization of freight-car truck with 60C2XFA steel for coil spring group. Reasons and spring issues of node oscillation damping. We evaluated the condition of the spring according to calculation code requirements and designing railway car Russian Federation.

Keywords

spring, freight-car truck, spring wedge, coil spring group, node of oscillation damping, strength, duality, working efficiency, friction-wedge

УДК 621.9.06

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКОВ*В.Г. АТАПИН, доктор техн. наук, профессор
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Атапин В.Г. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: teormech@ngs.ru

Рассматривается технология расчетного проектирования базовых деталей, использующая принцип декомпозиции и интегрированную работу метода конечных элементов с методами оптимизации. Вследствие большой размерности расчетной модели несущей системы станка, предлагается на этапе проектирования использовать подконструкции, выделенные из базовых деталей. На примере проектирования стойки тяжелого многоцелевого станка показано, что применение подконструкции существенно снижает размерность модели и время проектирования реальной компоновки базовой детали. Так, угол поворота оптимальной стойки с реальным поперечным сечением меньше, чем стойки в составе несущей системы с упрощенными по геометрии базовыми деталями – 0,0778 рад и 0,1495 рад соответственно, т.е. крутильная жесткость оптимальной стойки выше.

Ключевые слова: многоцелевой станок, проектирование, базовые детали, метод конечных элементов, методы оптимизации.

Введение

Современный металлорежущий станок, как объект проектирования, является относительно большой и сложной системой с развитой иерархической структурой. Работоспособность такой системы обеспечивают несколько подсистем, таких как главный привод, привод подачи и позиционирования и др. Несущая система состоит из последовательного набора соединенных между собой базовых деталей (несущих конструкций), которые могут рассматриваться как подсистемы несущей системы станка и т.д. При классическом методе проектирования станок разбивают на отдельные узлы (например, базовые детали) по конструктивной зависимости. Однако разбиение станка на отдельные узлы дает возможность лишь распределить работу между разработчиками узлов станка, при этом внутренние взаимосвязи (силовые, деформационные) на границах контакта узлов остаются неизвестными. В результате разработка отдельных узлов идет методом бесконечного приближения взаимных требований. При проектировании новых узлов станков, особенно тяжелых и уникальных, доминирует эмпирический подход, основанный на интуиции и опыте конструктора, а также широкое применение заимствованных унифицированных и стандартных решений. Сложность современных металлорежущих станков и требование высокого уровня их потребительских свойств (точности, производительности, надёжности и др.) обуславливают необходимость применения принципа декомпозиции в сочетании с интегрированной работой метода конечных элементов и методов оптимизации.

Теория

Сформулируем следующую задачу проектирования. Пусть заданы компоновка многоцелевого станка (МС), ограничения внешних размеров несущей системы станка, внешняя нагрузка и условия опирания. Требуется найти распределение материала по базовым деталям, удовлетворяющее условиям прочностной надёжности и минимально возможной массе, а несущая система, состоящая из этих конструкций, должна обеспечить заданные нормы точности и производительности механической обработки.

Поставленная задача решается в рамках технологии проектирования базовых деталей, рассмотренной нами в работе [1] на примере МС для обработки корпусных деталей массой до 200 т (рис. 1) и дополненная в настоящее время [2]. Технология включает в себя четыре этапа (рис. 2).

Этап I (рис. 2, блок 1). Определяются внешние нагрузки на основе детерминированных или вероятностных моделей внешнего нагружения.

Этап II (рис. 2, блоки 2-4). Расчет несущей системы с упрощенными по геометрии базовыми деталями. Решается задача о предварительном распределении материала по базовым деталям как задача математического программирования [3, 4]:

$$\text{минимизировать } f(X) = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\text{на прочность (черновая обработка)} \quad g_1(X) = 1 - \sigma_{\text{экв}} / [\sigma] \geq 0, \quad (2)$$

$$\text{на жёсткость (чистовая обработка)} \quad g_2(X) = 1 - \Delta / [\Delta] \geq 0, \quad (3)$$

$$\text{переменные проектирования} \quad g_3(X) = V_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где ρ – плотность материала; V – объем материала конструкции; $\sigma_{\text{экв}}$, $[\sigma]$ – эквивалентное и допускаемое напряжения; Δ , $[\Delta]$ – расчетные и допускаемые перемещения инструмента в зоне резания (нормы точности на механическую обработку).

Расчет проводится с учетом контактных и собственных деформаций в несущей системе. Задача (1)–(4) решается методом штрафных функций в форме

$$\varphi(X, r) = f(X) + r \sum_{j=1}^J [1 / g_j(X)]$$

с использованием метода Давидона–Флетчера–Пауэлла для решения задачи безусловной оптимизации [5, 6]. В результате решения задачи устанавливается полный набор граничных условий (силовых, кинематических) для отдельной базовой детали. Это позволяет в отличие от классического метода проектирования далее рассматривать базовые детали независимо друг от друга.



Рис. 1. Тяжелый многоцелевой станок сверлильно-фрезерно-расточной группы с поворотным-подвижным столом для обработки корпусных деталей массой до 200 т.

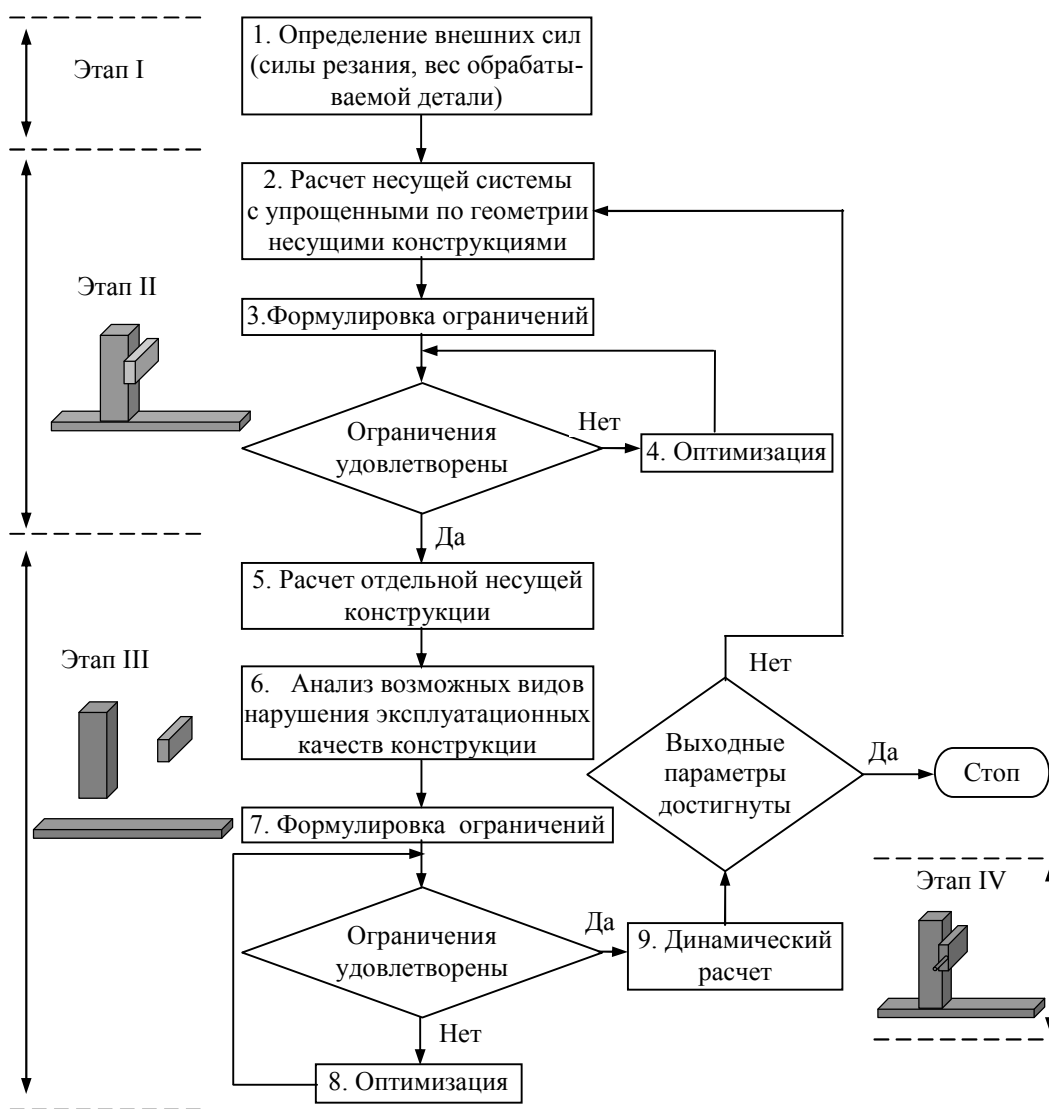


Рис. 2. Блок-схема проектирования несущих конструкций МС

Этап III (рис. 2, блоки 5-8). Проводится расчет для каждой базовой детали. Решается задача об окончательном распределении материала по отдельным базовым деталям при удовлетворении граничных условий, полученных на предыдущем этапе. На этом этапе используется принцип декомпозиции, согласно которому несущая система станка разбивается на конструктивно независимые подконструкции, между которыми взаимодействие локализовано и легко определимо (рис. 3).

- нулевому уровню (0) подконструкции соответствует элементарный конечный элемент, из которого собираются типовые структуры уровня I (макроэлементы);

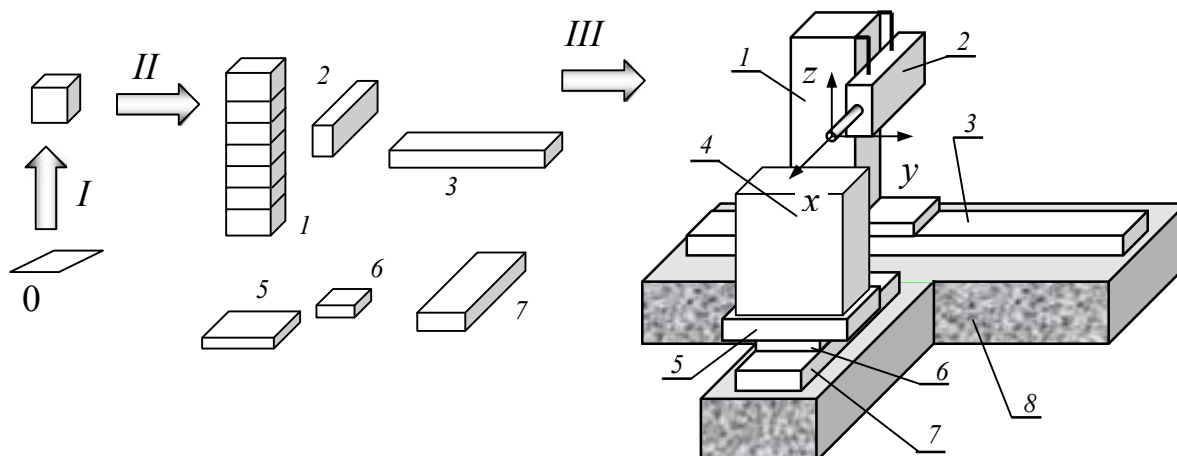


Рис. 3. Компоновка тяжелого многоцелевого станка и уровни декомпозиции: 1 – стойка; 2 – шпиндельная бабка; 3 – станина; 4 – обрабатываемая деталь; 5 – паллета; 6 – сани стола; 7 – станина стола; 8 – фундамент

- из макроэлементов формируются укрупненные подконструкции (1–6) уровня II, имеющие законченные конструктивные формы (базовые детали – стойка, шпиндельная бабка и т.д.);
- из подконструкций уровня II формируется уровень III сборки, представляющий собой несущую систему станка.

В результате решения задачи на этапе III формируется конструкция с реальной геометрией поперечного сечения и минимально возможной массой при удовлетворении требуемых норм производительности и точности механической обработки для несущей системы (этап II).

Этап IV (рис. 2, блок 9). Проводится динамический анализ несущей системы с оптимальными базовыми деталями.

Таким образом, используя набор уровней проектирования, мы на каждом уровне имеем дело с задачей гораздо меньшей размерности. При расчете сложной конструкции увеличение числа уровней декомпозиции, как известно, в целом более экономично, чем непосредственное решение сложных алгебраических систем.

Результаты и обсуждение

Здесь приводятся основные результаты расчета стойки МС на основе подконструкции (рис. 4). Подконструкция стойки в несущей системе выделена на уровне шпиндельной бабки и состоит из двух поясов серийной стойки общей высотой 1 м. При расчете несущей системы на этапе I для стойки получены расчетные усилия в местах контакта шпиндельной бабки со стойкой и поле перемещений (здесь не приводятся).

Расчетная схема подконструкции включает 189 пластинчатых конечных элементов (КЭ), 159 узлов, ребра жесткости моделируются пластинчатым КЭ. Дополнительно в узлах 1–12 вводятся упругие связи, жесткость которых определяется как отношение сила/перемещение для конкретного узла. Значение жесткости упругой связи автоматически вводится в матрицу жесткости конструкции. Задача оптимального проектирования подконструкции заключается в нахождении переменных проектирования (здесь – толщина стенки,

ребра) при удовлетворении поля перемещений, полученного для стойки при расчете в составе несущей системы. Результаты расчета подконструкции стойки для различных условий приведены в таблице, где n – принятый коэффициент запаса по жесткости. Угол поворота передней стенки оптимальной стойки меньше, чем у стойки в составе несущей системы с упрощенными по геометрии базовыми деталями – 0,0778 рад и 0,1495 рад соответственно, т.е. крутильная жесткость новой стойки выше.

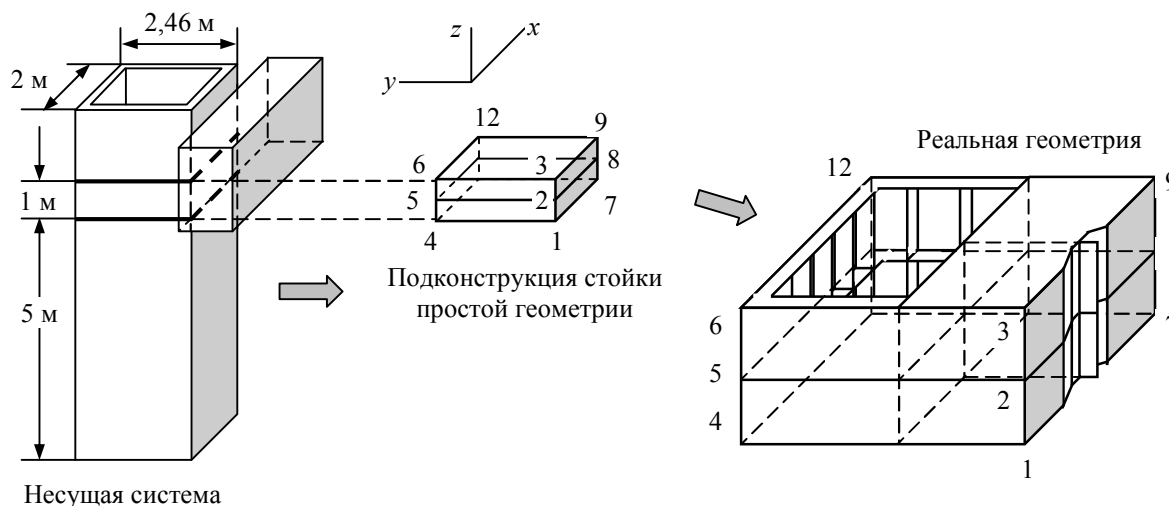


Рис. 4. Выделение подконструкции и ее реальная геометрия

Параметр	Условия эксплуатации			
	Предельные		Типовые	
	$n = 1,5$	$n = 1,0$	$n = 1,5$	$n = 1,0$
Толщина, м:				
плоскость xz, yz	0,0797	0,0527	0,0463	0,0284
плоскость xy	0,0923	0,0830	0,0565	0,0415
Масса, т	15,30	11,62	9,04	6,08

Выводы

На примере стойки рассмотрен алгоритм параметрического синтеза крупногабаритной конструкции на основе подконструкции, позволяющий получить конструкцию с реальной геометрией поперечного сечения, минимально возможной массой при удовлетворении заданных норм производительности и точности механической обработки;

Список литературы

1. Атапин В.Г. Проектирование несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков с учетом точности, производительности, массы // Вестник машиностроения. – 2001. – № 2. – С. 3–6.
2. Атапин В.Г. Расчетное проектирование несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 3 (52). – С. 27–34.

3. *Ravindran A., Ragsdell K.M., Reklaitis G.V.* Engineering optimization: methods and applications. – 2nd ed. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. – 688 p. – ISBN-10: 0-471-55814-1. – ISBN-13: 978-0-471-55814-9.
4. *Bunday B.D.* Basic optimisation methods. – London: Edward Arnold, 1984. – 136 p. – ISBN-13: 978-0-713-13506-0. – ISBN: 0-713-13506-9.
5. *Rao S.S., Grandhi R.V.* Optimum design of radial drilling machine structure to satisfy static rigidity and natural frequency requirements // *Journal of Mechanical Design*. – 1983. – Vol. 105, iss. 2. – P. 236–241. – doi: 10.1115/1.3258515.
6. *Yoshimura M., Takeuchi Y., Hitomi K.* Design optimization of machine-tool structures considering manufacturing cost, accuracy and productivity // *Journal of Mechanical Design*. – 1984. – Vol. 106, iss. 4. – P. 531–537. – doi: 10.1115/1.3258606.

SOME QUESTIONS AT DESIGN OF MULTI-PURPOSE MACHINE TOOL

Atapin V.G., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: teormechn@ngs.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The main purpose at design of supporting constructions of heavy multi-purpose machine tool is the reduction of mass at the given precision and productivity of working. To achieve this objective, the technology of rational design of supporting constructions offered by us uses the decomposition method and the finite elements method in the combination with optimization methods. The technology has four stages: 1) calculation (computation) of external all forces and loads, 2) as a result of the boundary conditions (force, kinematics) for individual supporting constructions are formed, 3) the problem about final optimal distribution of a material by the individual supporting constructions with the real cross-section is solved; 4) dynamic analysis. On an example at design of the column it is shown, that the turn angle of an optimum column with actual cross-section design is less, than the angle of turn of column of carrying system with the supporting constructions simplified geometry – 0,0778 and 0,1495 radian, respectively, i.e. torsion rigidity of the optimum column above.

Keywords

Heavy multi-purpose machine tool; Design; Decomposition method; Supporting constructions; Finite elements method; Optimization methods

УДК 621.9.06:518.4

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЗОК НА РАБОЧИЙ ОРГАН ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
УСТАНОВКИ СМЕСИТЕЛЯ ОТ ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

*Ю.И. ПОДГОРНЫЙ, доктор техн. наук, профессор
Т.Г. МАРТЫНОВА, канд. техн. наук, доцент
Г.М. НАЛИВАЙЧЕНКО, студент
С.Н. ТВЕРДОХЛЕБОВ, студент
А.А. ТРОЦЕНКО, студент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Мартынова Т.Г. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: martynova@corp.nstu.ru

В работе обоснована необходимость проведения экспериментальных исследований нагрузок на рабочие органы смесителя. Приведена кинематическая схема экспериментальной установки, ее описание и описание деталей-датчиков в приводах вращательного и возвратно-поступательного движений рабочего вала. Изложена методика проведения эксперимента. В результате проведенных исследований получены графики регистрации сигнал с деталей-датчиков. Затем данные обрабатывались в программе Table Curve. Выявлены закономерности изменения нагрузки на рабочий орган смесителя от внешних механических воздействий при вращательном и возвратно-поступательном движении рабочего вала.

Ключевые слова: смеситель, нагрузки от внешних механических воздействий, методика эксперимента, экспериментальные исследования, возвратно-поступательное движение рабочего вала.

Введение

Машины для перемешивания сыпучих материалов (смесители) широко применяются во многих отраслях промышленности, строительства, сельского хозяйства. Они могут отличаться по структуре рабочего цикла, конструктивным особенностям, принципу действия, динамическим и кинематическим параметрам и т.д.

На крупных предприятиях применяются чаще всего лопастные смесители непрерывного действия с горизонтально расположенной рабочей камерой. Именно такие смесители применяются в автоматических линиях по производству макарон для замеса макаронного теста [1 - 4]. Повысить производительность таких смесителей можно, увеличив габаритные размеры рабочей камеры, а также увеличив скоростные характеристики рабочих органов. Кроме того, рабочие органы некоторых смесителей могут совершать не только вращательное, но и возвратно поступательное движение.

Применяемые методики проектирования позволяют учитывать некоторые конструктивные и технологические параметры смесителей, а также некоторые свойства смесей [5, 6]. Но для проведения более точных расчетов необходимо учитывать скоростные характеристики рабочих органов, коэффициент заполнения рабочей камеры, углы установки лопаток, а также возвратно-поступательное движение рабочих органов. Такие данные можно получить только эмпирическим путем [7 - 12].

Цель данной работы: экспериментально выявить функциональные зависимости нагрузок на рабочий орган смесителя от кинематических, геометрических и технологических параметров.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработка экспериментальной установки смесителя и деталей-датчиков.
2. Проведение экспериментальных исследований.
3. Обработка результатов экспериментальных исследований.

Методика экспериментального исследования

В условиях предприятий проводить экспериментальные исследования зачастую невозможно в связи с непрерывностью технологических процессов, следовательно, возникла необходимость создания экспериментальной установки (рис. 1). Для привода вращательного движения была выбрана клиноременная передача, а для привода возвратно-поступательного движения – эксцентриково-рычажный механизм [13].

Смеситель представляет собой рабочую камеру, в которой установлен рабочий вал с одной месильной лопаткой. Вращательное движение ему передается от электродвигателя 1 через ременную передачу, а возвратно-поступательное – от электродвигателя 2 через червячную, зубчатую передачи и эксцентриково-рычажный механизм.

В приводе вращательного движения установлена деталь-датчик, которая выполнена в виде шкива, состоящего из ступицы, жестко закрепленной на рабочем валу, и внешнего обода, соединенных между собой упругими элементами, на которые наклеены тензорезисторы. Второй деталью-датчиком является рычаг, сообщающий валу возвратно-поступательное движение, на упругий элемент которого также наклеены тензорезисторы.

Экспериментальные исследования проводились в два этапа [12].

На первом этапе проводились замеры нагрузки на рабочий орган при вращательном движении рабочего органа, а на втором этапе – при возвратно-поступательном движении при различных сочетаниях параметров. Задаваемые параметры изменялись в следующем диапазоне: угол установки лопатки от 0° до 90° , с шагом $22,5^\circ$; объем смеси, приходящийся на одну лопатку от 4 до 6 л с шагом 0,5 л; частота вращения рабочего вала от 40 мин^{-1} до 160 мин^{-1} , с шагом 40 мин^{-1} ; частота возвратно-поступательного движения 1, 2, 4, 6 дв.ходов/мин.

Экспериментальные данные были получены с помощью программного продукта *LabVIEW* в виде графических изображений. Типовые графические изображения сигналов с деталей датчиков для вращательного и возвратно-поступательного движения приведены на рисунках 2 и 3 соответственно.

Затем сигналы обрабатывались в программе *Table Curve* [14-18], типовые графики представлены на рисунке 4.

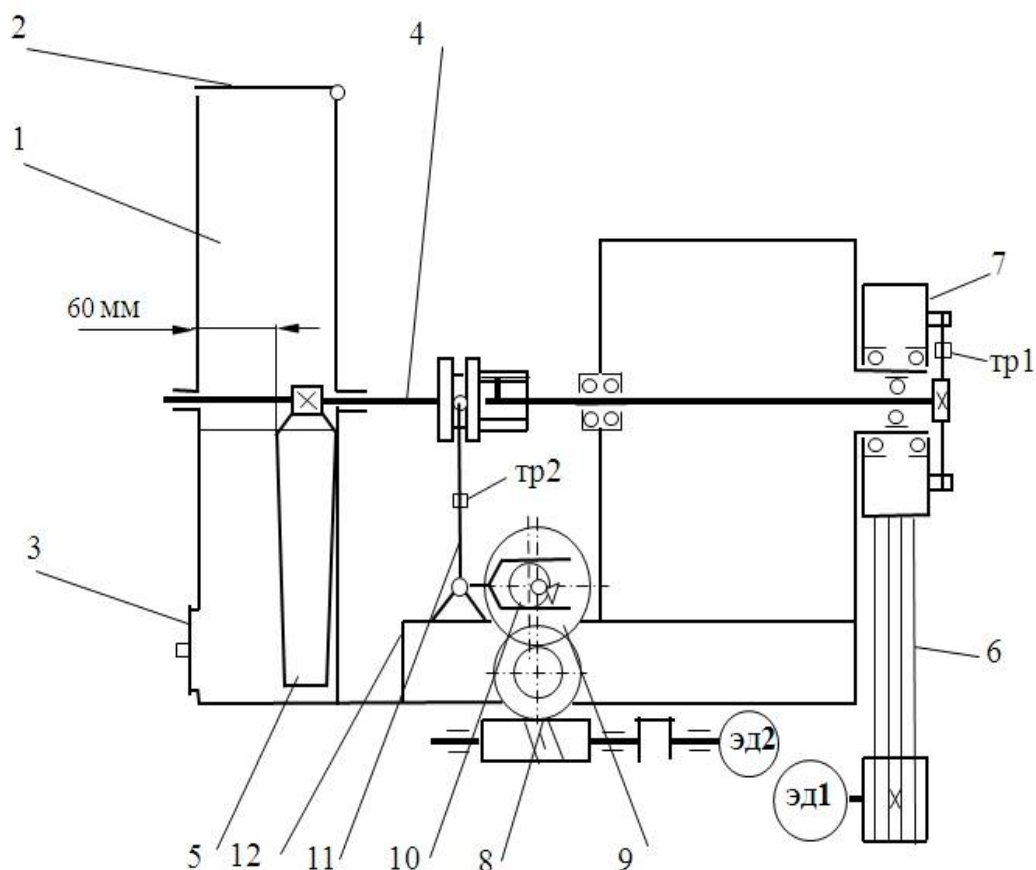


Рис. 1. Кинематическая схема экспериментальной установки

1 - рабочая камера, 2 - загрузочное отверстие, 3 - разгрузочное отверстие, 4 - рабочий вал, 5 - месильная лопатка, 6 - клиноременная передача, 7 - ведомый шкив (деталь-датчик), 8 - червячная передача, 9 - зубчатая передача, 10 - эксцентриковый механизм, 11 - рычаг эксцентрикового механизма (деталь-датчик), 12 - сварной каркас.

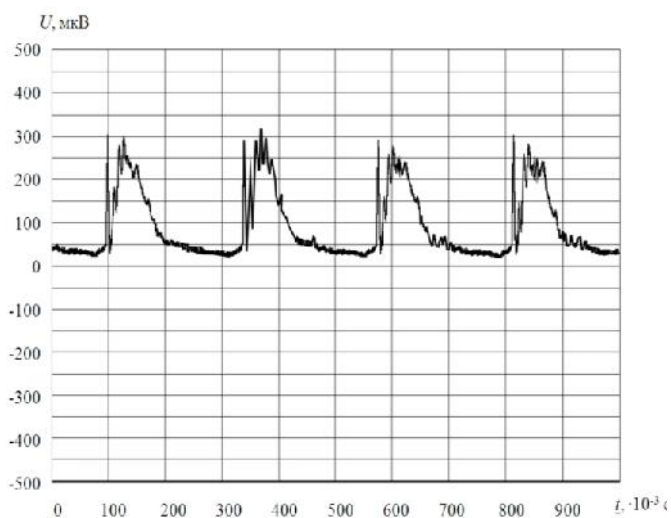


Рис. 2. Пример графика регистрации сигнал с детали-датчика в приводе вращательного движения

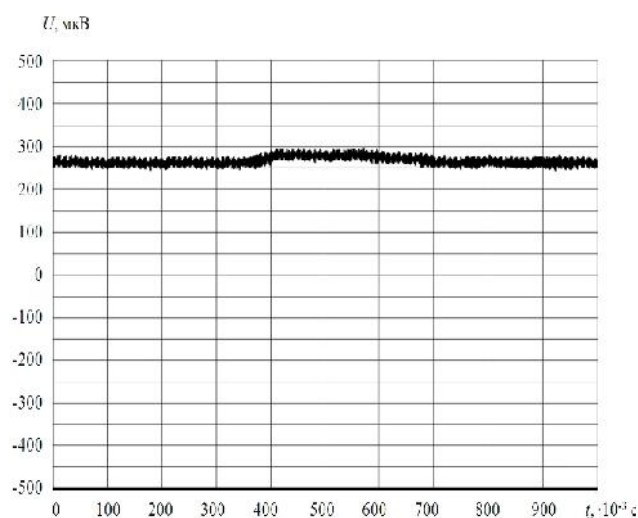


Рис. 3. Пример графика регистрации сигнал с детали-датчика в приводе возвратно-поступательного движения

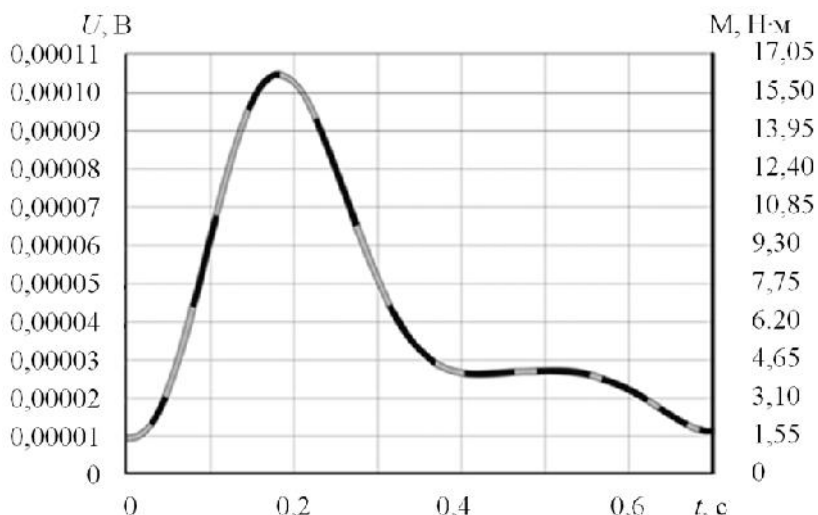


Рис. 4. Типовой график, полученный в результате обработки сигнала в программе Table Curve

Результаты и обсуждение

По результатам обработки данных получены функциональные зависимости нагрузок от угла установки лопаток, частоты вращения рабочего органа и объема смеси, приходящейся на лопатку. Некоторые зависимости, полученные при исследовании вращательного движения, представлены на рисунке 5.

Также были получены зависимости нагрузки от угла установки лопатки и объема смеси при возвратно-поступательном движении (рис. 6).

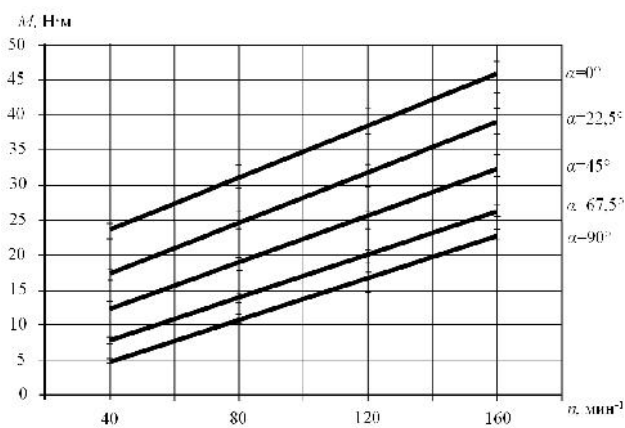


Рис. 5. Зависимость нагрузки на месильную лопатку от угла ее установки и частоты вращения рабочего органа.

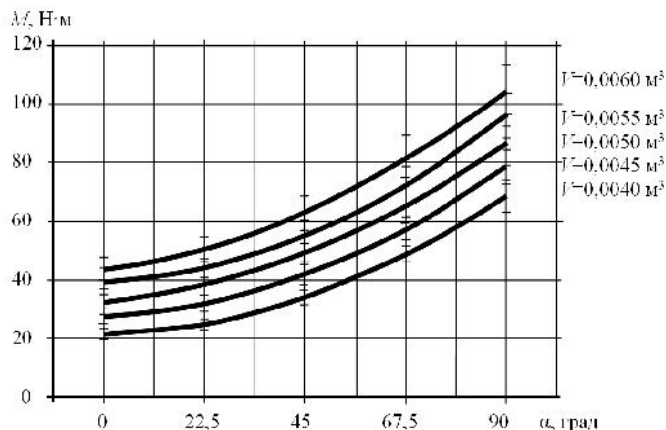


Рис. 6. Зависимость нагрузки на месильную лопатку от угла ее установки и объема смеси.

Кроме того, получены трехмерные функциональные зависимости нагрузок от угла установки лопатки и объема смеси для вращательного движения при частотах вращения рабочего органа 40, 80, 120, 160 мин⁻¹ (рис.7), а также были получены трехмерные зависимости нагрузки от угла установки лопатки и объема смеси и при возвратно-поступательном движении (рис. 8).

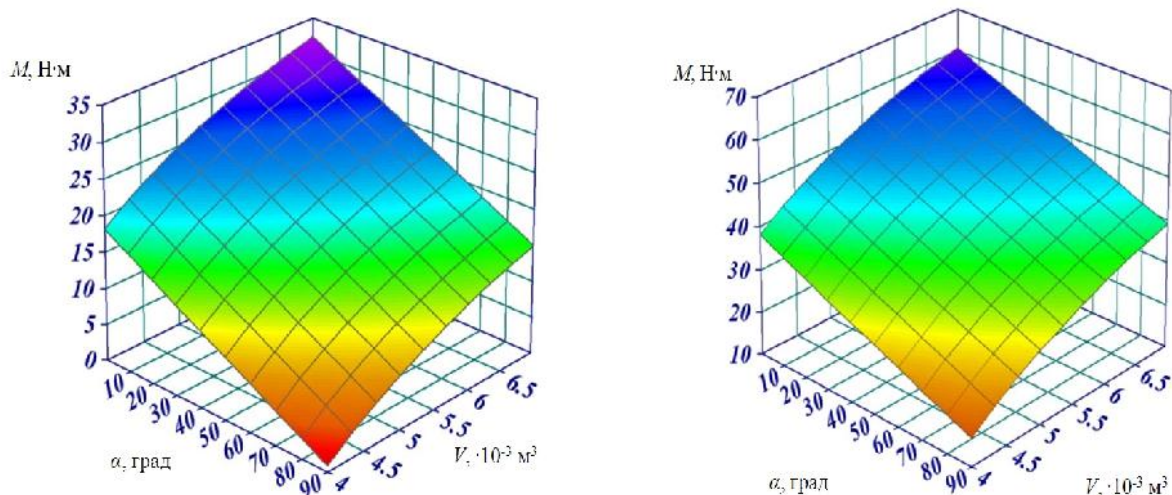


Рис. 7. Зависимость нагрузки на месильную лопатку от угла ее установки и объема смеси при частоте вращения рабочего вала 40 мин^{-1} и 160 мин^{-1}

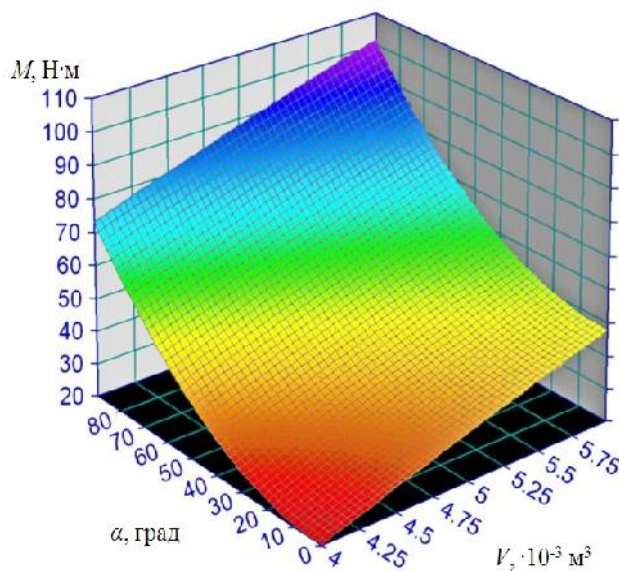


Рис. 8. Зависимость нагрузки на месильную лопатку от угла ее установки и объема смеси при возвратно-поступательном движении.

Выводы

1. Создана экспериментальная установка смесителя для исследования нагрузочных характеристик. Разработаны детали-датчики, позволяющие определять нагрузку на месильную лопатку от внешних механических воздействий при вращательном и возвратно-поступательном движениях рабочего вала.

2. В результате экспериментальных исследований выявлены закономерности изменения нагрузки на рабочий орган смесителя при вращательном движении в зависимости от объема смеси, приходящейся на месильную лопатку, угла разворота лопатки, а также от частоты вращения рабочего органа. При возвратно-поступательном движении нагрузка зависит от объема смеси, угла разворота лопатки и не зависит от скорости движения рабочего вала при ее изменении в пределах от 1 до 6 дв. ход. / мин.

3. Нагрузка на рабочий орган экспериментальной установки при вращательном движении составила: максимальная – 82 Н·м (угол разворота лопатки – 0°, частота вращения рабочего органа 120 мин⁻¹, объем смеси 0,008 м³), минимальная – 3,5 Н·м (угол разворота лопатки – 90°, частота вращения рабочего органа 40 мин⁻¹, объем смеси 0,004 м³). При возвратно-поступательном движении: максимальная – 100 Н·м (угол разворота лопатки – 90°, объем смеси – 0,006 м³), минимальная – 22 Н·м (угол разворота лопатки – 90°, объем смеси – 0,004 м³).

Список литературы

1. Подгорный Ю.И., Птицын С.В., Мартынова Т.Г. Исследование состояния автоматической линии по выборке макаронных изделий BRAIBANTI на ОАО «Новосибирская макаронная фабрика» // Сборник научных трудов НГТУ. – 2004. – № 1 (35). – С. 15–18.
2. Афанасьев Ю.А., Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г. Кинематическая схема автоматической линии BRAIBANTI // Сборник научных трудов НГТУ. – 2006. – № 2 (44). – С. 3–8.
3. Skeeba V.Yu. Actual problems and decisions in machine building. – Pfaffikon: Trans Tech Publ. – 2015. – 344 p. – (Applied mechanics and materials; vol. 788). – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788. – ISBN 978-3-03835-551-9.
4. Скиба В.Ю. Актуальные проблемы в машиностроении: сборник материалов первой международной научно-практической конференции // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. – 2014. – № 11 (66). – С. 83.
5. Скиба В.Ю. Актуальные проблемы в машиностроении. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 588 с. – ISBN 978-5-7782-2410-0.
6. Мартынова Т.Г., Подгорный Ю.И. Исследование уравновешенности рабочего вала мешалки непрерывного действия // Сборник научных трудов НГТУ. – 2008. – № 2 (52). – С. 41–46.
7. Определение основных параметров технологического оборудования / Ю.И. Подгорный, Т.Г. Мартынова, В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, Н.В. Вахрушев, Д.Ю. Корнев, Е.К. Зайцев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 3 (60). – С. 68–73.
8. Моделирование несущих систем технологических машин / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 2 (63). – С. 91–99.
9. Совершенствование технологических процессов машиностроительных производств / А.С. Янюшкин, С.О. Сафонов, Д.В. Лобанов и др. – Братск: Изд-во БрГУ, 2006. – 302 с.
10. Особенности обеспечения качества оборудования машиностроительных предприятий / С.В. Птицын, В.Ю. Скиба, Е.В. Мережко, Д.Э. Коробкин // Инновации в машиностроении: труды 4 международной научно-практической конференции, Новосибирск, 2–4 октября 2013 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – С. 364–367.
11. Надежность прогноза качества технологического оборудования / С.В. Птицын, В.Ю. Скиба, Ю.С. Чёсов, Е.В. Мережко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 2. – С. 33–38.
12. Мартынова Т.Г., Подгорный Ю.И., Птицын С.В. Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик смесителя // Научный вестник НГТУ. – 2011. – № 2 (43). – С. 183–188.
13. Гебель Е.С. Оптимизационный кинематический синтез плоских рычажных механизмов IV класса с приближенным выстоем выходного звена. – Омск, 2009. – 223 с.
14. Экспериментальные исследования силовых характеристик рабочего органа лопастного смесителя / Т.Г. Мартынова, Ю.И. Подгорный, С.В. Птицын, В.Ю. Скиба // Современные технологии в машиностроении: сборник статей XV международной научно-практической конференции. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2011. – С. 170–172.

15. Исследование возможности повышения производительности лопастных смесителей для сыпучих смесей / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, Т.Г. Мартынова, А.Е. Афолина, Н.А. Бердникова // Сборник научных трудов Всероссийского научно-исследовательского института овцеводства и козоводства. – 2014. – Т. 2, № 7. – С. 606–610.

16. Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г., Войнова Е.В. Уравновешивание рабочего вала смесителя непрерывного действия // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 8 Всероссийской научно-практической конференции, 24 марта 2010 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – С. 127–129.

17. Уравновешивание роторов технологических машин / Ю.И. Подгорный, Т.Г. Мартынова, А.Н. Бредихина, А.С. Косилов, Н.С. Печоркина // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 256–262.

18. Методика проектирования смесителей для получения макаронного теста / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, Т.Г. Мартынова, А.С. Кузнецов, А.Н. Бредихина, Н.С. Древещкий // Инновации в машиностроении: труды 4-й Международной научно-практической конференции, 2–4 октября 2013 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – С. 120–125.

THE RESEARCH OF THE EXTERNAL MECHANICAL INFLUENCE LOAD ON THE WORKING BODY OF THE EXPERIMENTAL MIXER DEVICE

Podgornyj Yu.I., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: pjui@mail.ru

Martynova T.G., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: martynova@corp.nstu.ru

Nalyvaychenko G.M., Student, e-mail: genanalivai@mail.ru

Tverdohlebov S.N., Student, e-mail: s.tverd@ictemir.kz

Trotsenko A.A., Student, e-mail: trocenko_leon@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The paper substantiates the need to conduct experimental research of the mixer working body load. The article presents the cinematic scheme of the experimental device with detailed description of the sensor parts in the rotary and reciprocal drives of the shaft as well as the experimental methodology. The results of the research are shown in the sensor part signal registration diagrams. The data was processed in the Table Curve program in order to single out the patterns in the mixer working body load change during rotary and reciprocal shaft movements.

Keywords

mixer, external mechanical influence load, experimental procedure and experimental studies, the working shaft reciprocal movement

УДК 621.8

**ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ШПИНДЕЛЯ
ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА**

В.Р. ГЛЕЙМ, магистрант
А.Ю. ЛЕВЧУК, магистрант
К.П. ПЛОТНИКОВ, магистрант
Г.О. ЧА, магистрант
В.Ю. СКИБА, канд. техн. наук, доцент
(НГТУ, г. Новосибирск)

Глейм В.Р. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: v_gleim@mail.ru

В работе рассматривается методика выбора рациональной конструкции шпинделя вертикально-фрезерного станка при проектировании специального технологического оборудования, используя средства систем автоматизированного проектирования (САПР). Предоставляется обоснованный выбор оптимального варианта изготовления шпинделя.

Ключевые слова: оптимизация, рационализация, оборудование, станок, шпиндель.

Введение

В станкостроении на сегодняшний день одной из важнейших задач является повышение эффективности металлорежущего оборудования. В большинстве случаев эту проблему решают посредством рационального конструирования привода главного движения [1 - 8].

Анализ существующих методик проектирования шпиндельных узлов металлорежущего оборудования [9 - 12] позволил выявить, что основными критериями при проектировании шпиндельных узлов являются точность, жесткость, виброустойчивость. Принимая во внимание такие важные критерии оптимизации как стоимость, производительность изготовления и коэффициент запаса прочности, в данной работе была предпринята попытка учесть все перечисленные критерии в процессе разработки главного исполнительного органа фрезерного станка.

Целью работы является разработка дополнительных рекомендаций к методике выбора рациональной конструкции шпинделя.

Теория и методика проведения расчетов

Используя методику прогнозирования технических характеристик металлорежущих станков [13-15], были установлены предельные геометрические параметры привода главного движения. Вследствие этого, в расчете были приняты следующие стандартные размеры конуса шпинделя фрезерного станка – номера 45, 50 и 55. Воспользовавшись рекомендациями, представленными [16 - 20], для изготовления исполнительного органа осуществлен выбор следующих марок сталей: 55, 40ХН и 38ХНЗМА [21], - с соответствующим комплексом фи-

зико-механических характеристик: модуль упругости первого рода E ; коэффициент Пуассона μ ; предел текучести на растяжение (сжатие) σ_T , предел прочности на растяжение (сжатие) σ_B .

Средствами компьютерного моделирования CAD комплекса *Solid Works* осуществлено построение 3D-модели шпинделя и определены его массо-центровочные характеристики. Расчет припусков позволил в окончательном виде определиться с габаритами заготовки, её объемом, а также объемом снимаемого материала. С учетом режимных параметров на каждом из переходов (черновой, получистовой и чистовой обработки) и коэффициента обрабатываемости материала, было определено основное время и, следовательно, производительность изготовления шпинделя. Основное время определяли по формуле:

$$\tau_{осн} = \frac{V_{стружки}}{K_{обр} \cdot [0,6(v_{чер} t_{чер} s_{чер}) + 0,25(v_{н.чист} t_{н.чист} s_{н.чист}) + 0,15(v_{чист} t_{чист} s_{чист})]}, \quad (1)$$

где $K_{обр}$ – коэффициент обрабатываемости материала.

Выбор режимов резания был осуществлен согласно рекомендациям, представленным в [22]:

- Черновое точение: $v_{чер} = 180$ м/мин; $t_{чер} = 4$ мм; $s_{чер} = 0,5$ мм/об;
- Получистовое точение: $v_{н.чист} = 260$ м/мин; $t_{н.чист} = 1,5$ мм; $s_{н.чист} = 0,25$ мм/об;
- Чистовое точение: $v_{чист} = 340$ м/мин; $t_{чист} = 0,2$ мм; $s_{чист} = 0,1$ мм/об.

При этом производительность изготовления равна:

$$\Pi = \frac{1}{\tau_{осн}} \quad (2)$$

Расчет на прочность произведен методом конечных элементов в программном комплексе *Ansys* [23]. Результаты расчета для шпинделя из стали 40ХН и конусом 45 представлены на рис. 1.

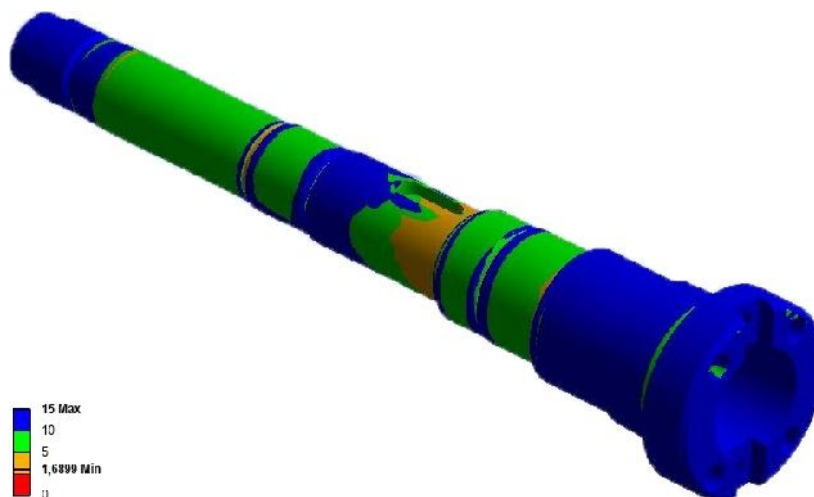


Рис. 1. Расчет коэффициента запаса прочности для шпинделя из стали 40ХН и конусом 45

Результаты и обсуждение

На примере конкретного поставщика металлопроката [24] был осуществлен расчет стоимости заготовок для исполнительного органа, результаты которого представлены в таблице 1.

Обработка данных математического моделирование и последующее получение функ-

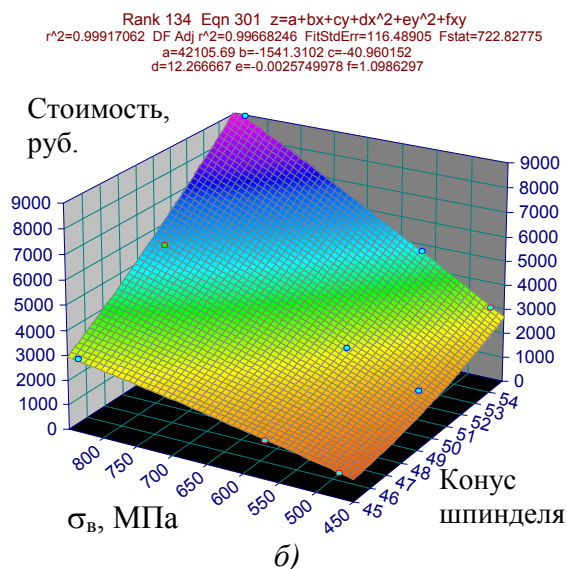
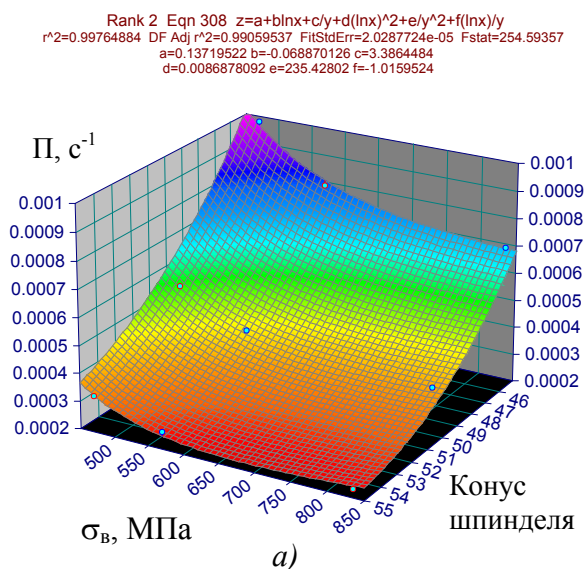
циональных зависимостей: 1) производительности P от габаритов шпинделя (номера конуса шпинделя) и физико-механических характеристик (например, предела прочности материала σ_B) (рис. 2а); 2) стоимости заготовки от габаритов шпинделя и предела прочности материала σ_B (рис. 2б); коэффициента запаса прочности (КЗП) от номера конуса шпинделя и σ_B (рис. 2в), производилось при помощи программного продукта *Table Curve 3D*.

Таблица 1

Исходные данные

Конус шпинделя	Материал	Предел прочности, МПа	Коэффициент запаса прочности	Производительность, c^{-1}	Стоимость, руб
45	40ХН	570	1,6899	0,000784477	1545
45	55	570	1,6899	0,000980597	971
45	38ХНЗМА	835	3,6748	0,000686418	2940
50	40ХН	570	3,3598	0,000427241	2865
50	55	570	3,3598	0,000534051	1800
50	38ХНЗМА	835	7,3062	0,000373836	5451
55	40ХН	570	4,9977	0,000263597	4705
55	55	570	4,9978	0,000329497	2956
55	38ХНЗМА	835	10,868	0,000230648	8955

Из множества уравнений, подобранных программой, выбраны уравнения с наибольшим коэффициентом корреляции. Графические отображения полученных функциональных зависимостей представлены на рис. 2.



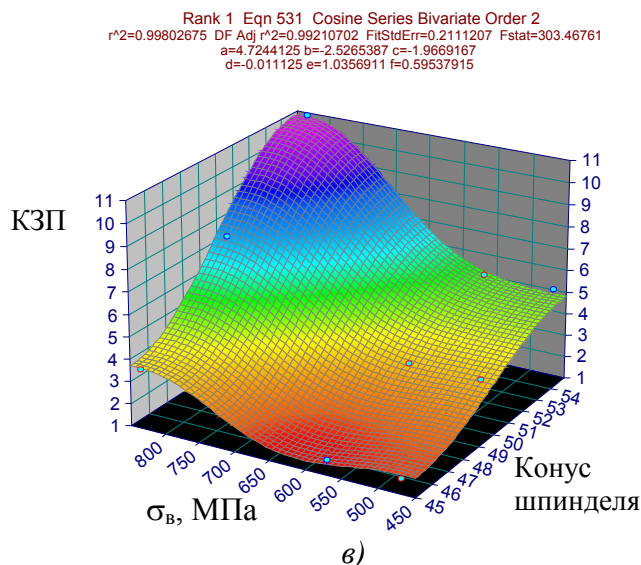


Рис. 2. Функциональные зависимости:

- а) производительности изготовления от конуса шпинделя и предела прочности материала;
- б) стоимости заготовки от конуса шпинделя и предела прочности материала;
- в) коэффициента запаса прочности от конуса шпинделя и предела прочности материала

На основе полученных функций построен график зависимости производительности изготовления, стоимости заготовки, коэффициента запаса прочности от размеров конуса шпинделя и предела прочности материала. График представлен на рис. 3.

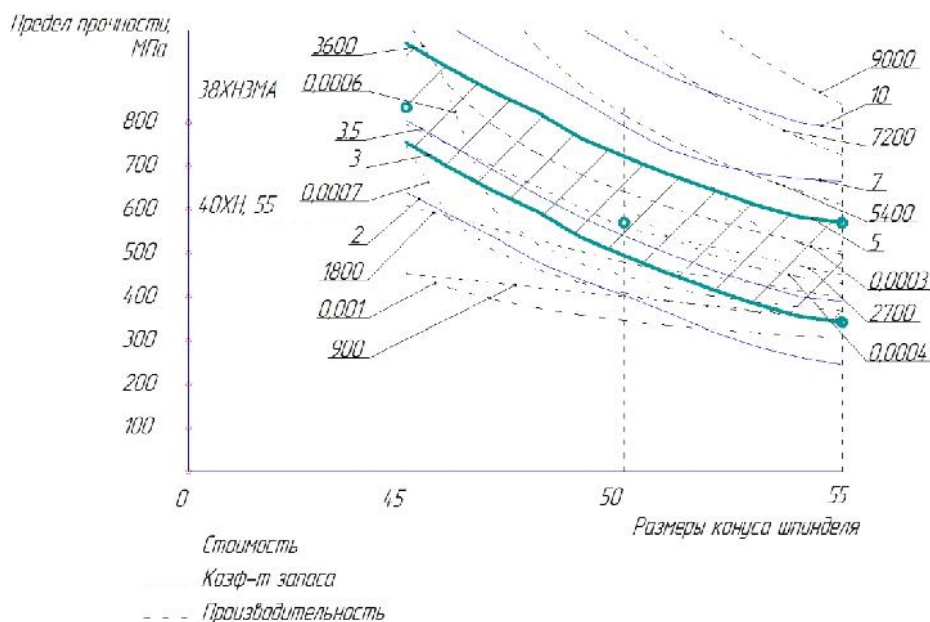


Рис. 3. Графические зависимости производительности изготовления, стоимости заготовки, коэффициента запаса прочности от размеров конуса шпинделя и предела прочности материала

Согласно требованию заказчика значение коэффициента запаса прочности шпинделя должно варьироваться в диапазоне от 3 до 5. Однако стоит отметить, что в результате математического моделирования, стало возможным расширить диапазон варьирования значениями физико-механических характеристик материалов, поскольку в область оптимизации по-

падают и другие марки сталей, рекомендуемые в качестве конструктивных материалов для изготовления шпинделей.

В таблице 2 представлены все сравниваемые варианты изготовления.

Таблица 2

Варианты изготовления исполнительного органа

Конус шпинделя	Материал	Предел прочности, МПа	Коэффициент запаса прочности	Производительность, c^{-1}	Стоимость, руб
45	38ХНЗМА	835	3,6748	0,000686418	2940
50	40ХН	570	3,3598	0,000427241	2865
50	55	570	3,3598	0,000534051	1800
55	40ХН	570	4,9977	0,000263597	4705
55	55	570	4,9978	0,000329497	2956
55	20Х	390	3,0938	0,000694266	3086

Как видно из полученных результатов, рациональным решением является шпиндель с конусом №50 из стали 55 (табл. 2).

Выводы

1. Предложена методика выбора рациональной конструкции шпинделя.
2. Представлен обоснованный выбор конструкции шпинделя вертикально-фрезерного станка по критериям производительности изготовления шпинделя, стоимости заготовки, и коэффициенту запаса прочности. Выбран вариант изготовления шпинделя с конусом №50 из стали 55. Данная конструкция обладает наименьшей стоимостью заготовки, производительностью изготовления достигает значения $0,000534 c^{-1}$, при этом коэффициент запаса прочности доходит до уровня 3.36.

Список литературы

1. *Архипов П.В., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С.* Совершенствование оборудования под процессы комбинированной обработки // Вестник Таджикского технического университета. – 2013. – Т. 2, № 2. – С. 32–37.
2. *Skeeba V.Yu.* Actual problems and decisions in machine building. – Pfaffikon: Trans Tech Publ., 2015. – 344 p. – (Applied mechanics and materials; vol. 788). – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788. – ISBN 978-3-03835-551-9.
3. Эффективные технологии механической обработки деталей из неметаллических материалов / П.В. Архипов, А.В. Балыков, А.А. Дьяконов, О.Ю. Еренков, В.П. Иванов, Е.Г. Калита, А.Б. Липатова, Д.В. Лобанов, О.И. Медведева, А.В. Морозова, И.В. Шмидт, А.С. Янюшкин; под ред. А.В. Киричека. – М.: Спектр, 2014. – 225 с.
4. Станочное оборудование, основанное на комплексировании нескольких технологических операций / В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев, В.Ю. Скиба // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 245–255.

5. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeebe, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2015. – Vol. 30, iss. 12. – P. 1408–1411. – doi: 10.1080/10426914.2014.973595.
6. Моделирование несущих систем технологических машин / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2014. – № 2 (63). – С. 91–99.
7. Совершенствование технологических процессов машиностроительных производств / А.С. Янюшкин, С.О. Сафонов, Д.В. Лобанов и др. – Братск: Изд-во БрГУ, 2006. – 302 с.
8. Технологические особенности формирования параметров качества поверхностного слоя при алмазном выглаживании в условиях интегрированной обработки / В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, Д.Ю. Корнев, К.А. Парц // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2015. – № 3 (68). – С. 31–41. – doi: 10.17212/1994-6309-2015-3-31-41.
9. *Пуш В.Э.* Металлорежущие станки: учебник для машиностроительных вузов. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
10. *Бушуев В.В.* Основы конструирования станков. М.: Станкин, 1992. – 520 с.
11. *Кочергин А.И.* Конструирование и расчет станков и станочных комплексов: учебное пособие. – Минск: Высшая школа, 1991.
12. Автоматизированный расчет станочных приводов: учебное пособие / под ред. Ю.С. Чёсова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1996.
13. Надежность прогноза качества технологического оборудования / С.В. Птицын, В.Ю. Скиба, Ю.С. Чёсов, Е.В. Мережко // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2013. – № 2. – С. 33–38.
14. Прогнозирование технических характеристик интегрального технологического оборудования / В.Н. Пушнин, Д.Ю. Корнев, Н.В. Вахрушев, В.Ю. Скиба, К.А. Парц // *Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки*. – 2014. – Т. 2. – С. 97–101.
15. Quality improvement of wear-resistant coatings in plasma spraying integrated with high-energy heating by high frequency currents / E. Zverev, P. Tregubchak, N. Vakhrushev, S. Ptitsyn // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 788. – P. 318–324.
16. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: справочник-учебник. В 3 т. Т. 2, ч. 1. Расчет и конструирование узлов и элементов станков / А.С. Проников, Е.И. Борисов, В.В. Бушуев и др.; под общ. ред. А.С. Проникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, 1995. – 371 с.
17. Optimal organization of tools for machining composites / D.V. Lobanov, A.S. Yanyushkin, D.A. Rychkov, N.P. Petrov // *Russian Engineering Research*. – 2011. – Т. 31, № 2. – С. 156–157. – doi: 10.3103/S1068798X11020146.
18. Исследования работоспособности алмазных кругов при обработке композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, В.А. Батаев и др. // *Системы. Методы. Технологии*. – 2010. – № 7. – С. 87–91.
19. Contact processes in grinding / A. Yanyushkin, D. Lobanov, P. Arkhipov, V. Ivancivsky // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Т. 788. – С. 17–21. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17.
20. The effect of diamond tool performance capability on the quality of processed surface / P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov, S.I. Petrushin // *Applied mechanics and materials*. – 2013. – Vol. 379. – P. 124–130. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.124.
21. *Стали и сплавы. Марочник: справочное издание / под ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гервасьева*. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
22. Рекомендуемые режимы резания при точении [Электронный ресурс] // *Лаборатория новых технологий*. – URL: http://www.instr.labnt.su/files/135/rezjim_turning_ext.pdf (дата обращения: 21.03.2016).

23. Выбор конструктивных параметров несущих систем машин с учетом технологической нагрузки / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, О.В. Максимчук, Д.В. Лобанов, В.Р. Глейм, А.К. Жигулев, О.В. Саха // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2015. – № 4 (69). – С. 51–60. – doi: 10.17212/1994-6309-2015-4-51-60.

24. Продажа металлопроката. Круг. Лист. Шестигранник. Проволока. Полоса. Дробь: наличие, цены [Электронный ресурс] // ГП Стальмаш: web-сайт. – URL: <http://www.yaruse.ru/> (дата обращения: 21.03.2016).

THE CHOICE OF SPINDLE VERTICAL MILLING MACHINE RATIONAL DESIGN

Gleym V.R., Master's Degree student, e-mail: v_gleim@mail.ru

Levchuk A.Yu., Master's Degree student, e-mail: ge.911@mail.ru

Plotnikov K.P., Master's Degree student, e-mail: k.plotnikow@gmail.com

Cha G.O., Master's Degree student, e-mail: Grigoriy_olegovich@mail.ru

Skeeba V.Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The article describes the technique of spindle vertical milling machine rational design choice in designing of special technological equipment using computer-aided design (CAD). The optimal variant of spindle manufacturing informed choice is grounded.

Keywords

optimization, rationalization, equipment, machine tool, spindle

УДК 621.913.816: 621.888-52-82

**КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ
С ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ СВЯЗЯМИ В ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ЦЕПЯХ**

*В.А. ВАНИН, доктор техн. наук, профессор
А.Н. КОЛОДИН, ассистент
А.А. РОДИНА, старший преподаватель
(ТГТУ, г. Тамбов)*

Ванин В.А. – 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106,
Тамбовский государственный технический университет,
e-mail: dekorkan@yandex.ru

В данной статье рассматривается возможность применения гидравлических связей с гидравлическими шаговыми двигателями в приводах исполнительных органов станков, движения которых строго согласованы между собой в определенной кинематической зависимости и построения таких связей по модульному принципу на основе шагового гидропривода.

Кинематические цепи, составленные из механических звеньев, проектируются и изготавливаются индивидуально под каждую компоновку станка. Кроме того, механические кинематические цепи имеют существенные недостатки: значительную протяженность, малую и непостоянную жесткость, что приводит к снижению точности.

Ключевые слова: Внутренние связи, гидравлические связи, гидравлический шаговый привод, гидравлический шаговый двигатель, генератор гидравлических импульсов, формообразующие связи.

Введение

Проектирование и построение рациональной структуры внутренних (формообразующих) цепей, обеспечивающих жесткую кинематическую связь между заготовкой и инструментом в металлорежущих станках различного технологического назначения со сложными движениями формообразования для получения высокой точности функционально связанных перемещений представляет собой сложную задачу при создании новой конструкции станка или модернизации существующей модели, оптимальной по точности, металлоемкости и другим показателям.

Для получения способом резания поверхностей заданной геометрической формы и размеров требуется создать точные формообразующие движения инструмента и заготовки, траектории и скорости которых связаны между собой кинематической зависимостью и не могут быть произвольными.

Для выполнения в станке требуемого исполнительного движения необходимо создать кинематическую связь между исполнительными органами станка (узел заготовки и инструмента) и кинематическую связь конечных звеньев цепи с источником движения, которое в большинстве случаев осуществляется с помощью механических звеньев (зубчатые и иные передачи, червяки, ходовые винты, кулачки и т.п.).

Структура кинематических цепей в значительной степени определяет конструктивную сложность станка, методы его настройки, оказывает существенное влияние на жесткость, точность (геометрическую и кинематическую) и виброустойчивость станка [1-5].

Особенности механических внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков

Главным преимуществом кинематических цепей, составленных из механических звеньев, является то, что они обеспечивают точные значения передаточных отношений выходных звеньев кинематической цепи и не требуют дополнительной поднастройки в процессе работы.

На кинематическую точность внутренних цепей, составленных из механических звеньев, оказывают влияние следующие погрешности элементов цепей:

- а) погрешности изготовления (погрешности формы и взаимного расположения рабочих поверхностей зубчатых и резьбовых венцов, кулачков, обкатных и делительных дисков);
- б) Монтажные погрешности звеньев на валах и подшипниках;
- в) силовые погрешности, вызванные деформациями звеньев и валов под нагрузкой;
- г) температурные погрешности.

Существенное влияние на точность цепи оказывает крутильная жесткость, которая определяется взаимным углом поворота валов конечных звеньев кинематических цепей. Особенно большое значение приобретает влияние крутильной жесткости в цепях значительной протяженности, при этом цепи не всегда обеспечивают необходимую кинематическую точность, так как повышенное трение, изнашивание звеньев приводят к ее постоянному снижению.

При сложном пространственном расположении рабочих органов станка (узла заготовки и инструмента) и большом числе промежуточных подвижных звеньев кинематические цепи, становятся многозвенными, протяженными и громоздкими, что приводит к усложнению конструкции цепей и станков в целом, а так же к снижению точности функционально связанных перемещений исполнительных органов, увеличению металлоемкости.

Использование механических связей для построения внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков не удовлетворяет возрастающим требованиям повышения точности, жесткости, снижению металлоемкости. Все известные традиционные методы построения внутренних цепей на основе механических связей достигли определенного уровня влияния на точность станков и практически не имеют резервов ее повышения. Дальнейшие работы в этом направлении приводят к существенному увеличению стоимости станка.

Одним из возможных практически реализуемых способов повышения точности и снижению металлоемкости цепей может быть применение вместо механических связей гидравлические на основе гидравлического шагового привода [6-7].

Характеристика гидравлических связей на основе шагового гидропривода для построения внутренних (формообразующих) цепей станков

Построение внутренних (формообразующих) кинематических цепей металлорежущих станков различного технологического назначения со сложными движениями формообразования в виде гидравлических связей на основе шагового гидропривода позволяет значительно упростить их кинематическую структуру путем сокращения протяженности механических цепей. Применяя гидравлические связи для построения формообразующих цепей станков различного технологического назначения, устраняется неоправданное многообразие конструктивного и компоновочного исполнения внутренних кинематических цепей, и приведение их к возможному конструктивному единообразию.

Гидравлические связи для построения внутренних (формообразующих) цепей выполняются на основе шагового гидравлического привода, осуществляются по разомкнутой схеме без применения датчиков обратной связи.

Гидравлический шаговый привод составляет новый класс объемных гидроприводов, функциональные особенности которых состоят в том, что они способны устойчиво обрабатывать релейные и импульсные сигналы с высокой точностью и большим усилием при значительной нагрузке [8-9].

Структурно шаговый гидропривод представляет собой гидромеханическую систему, состоящую из трех функционально и конструктивно завершенных агрегатов (модулей): источника рабочей жидкости (насосная установка), управляющего (коммутирующего) устройства – генератора гидравлических импульсов - и исполнительного силового шагового гидродвигателя.

Передача «гидравлический вал» выполнена в виде отдельных функционально и конструктивно завершенных агрегатов (модулей): источника рабочей жидкости, управляющего (коммутирующего) устройства, которое формирует управляющие импульсы и распределяет их по рабочим камерам исполнительного силового шагового гидродвигателя [10].

Конструктивно шаговый гидропривод состоит из трех частей: управляющего устройства (пневматический коммутатор) – 1; блока пневмогидравлических дискретных преобразователей – усилителей – 2 и силового исполнительного шагового гидродвигателя – 3 (рис. 1).

В качестве исполнительных силовых органов в гидравлических связях используются гидравлические шаговые двигатели, преобразующие последовательность гидравлических импульсов управления в дискретные угловые или линейные перемещения, при этом скорость вращения и суммарный угол поворота выходного вала шагового гидродвигателя пропорциональны соответственно частоте и количеству поданных управляющих импульсов; при отсутствии входных сигналов звено удерживается в зафиксированном положении.



Рис. 1. Структурная схема гидравлического шагового привода

Поскольку для воспроизведения образующей линии по методу обката между перемещениями рабочих органов - заготовки и инструмента – необходимо осуществить требуемую функциональную зависимость, а для получения формообразующего движения необходимо обеспечить жесткую кинематическую связь между заготовкой и инструментом, то в этом случае из всех видов шаговых гидродвигателей наиболее приемлемыми для применения во внутренних кинематических цепях, выполненных в виде гидравлических связей на основе шагового гидропривода, являются двигатели с механической редукцией шага.

Используя особенности частотного регулирования скорости исполнительных силовых шаговых гидродвигателей и высокие компоновочные качества шагового гидропривода, представляется возможным применять гидравлические связи на основе шагового гидропривода для построения внутренних (формообразующих) цепей станков со сложными движениями формообразования.

К таким внутренним (формообразующим) цепям относятся цепи деления, цепи обката, цепи подач зуборезных станков; цепи винторезные резьбообрабатывающих станков, цепи затылования в токарно-затыловочных станках.

Выводы

Благодаря использованию гидравлических связей кинематика и компоновка станка существенно упрощается, металлоемкость и масса станка уменьшается, точность обработки не значительно зависит от изменения режимов резания и условий эксплуатации. Накопленная погрешность изделия уменьшается, так как погрешность гидравлической связи не зависит от расстояния между заготовкой и инструментом, а будет определяться точностью изготовления конечных делительных передач станка и точностью изготовления силовых шаговых гидродвигателей, общая протяженность кинематической цепи между инструментом и изделием значительно сокращается.

Одним из возможных, практически реализуемых средств повышения точности внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков со сложными движениями формообразования, является сокращение их протяженности [11-15].

При замене механических кинематических цепей гидравлическими связями на основе шагового гидропривода возможно осуществить агрегатно-модульный принцип построения внутренних цепей металлорежущих станков. Этот принцип позволяет не конструировать формообразующие цепи станков различного технологического назначения с большим различием характеристик каждый раз заново, а компоновать их из небольшого, экономически обоснованного количества типовых или стандартных унифицированных общих агрегатов (модулей), имеющих функциональную и конструктивную завершенность с использованием ограниченного числа деталей и узлов индивидуального проектирования и изготовления.

Список литературы

1. Металлорежущие станки. В 2 т. Т. 2: учебник для вузов / В.В. Бушуев, А.В. Еремин, А.А. Какоило и др. – М.: Машиностроение, 2011. – 584 с.
2. *Остяков Ю.А., Шевченко И.В.* Проектирование деталей и узлов конкурентоспособных машин: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2013. – 336 с.
3. Металлорежущие станки: учебник для вузов / В.Д. Ефремов, В.Д. Горохов, А.Г. Схиртладзе, И.А. Коротков; под общ. ред. П.И. Ящерицына. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 696 с.
4. *Тарасов Г.А.* Проектирование металлорежущих станков: учебное пособие. – М.: МГОУ, 2010. – 546 с.
5. Расчет и проектирование металлорежущих станков: учебное пособие для вузов / А.М. Гаврилин, Ю.П. Мельников, А.В. Катунин и др. – Орел: ОрелГТУ, 2006. – 228 с.
6. *Гуртяков А.М., Мойзес Б.Б.* Металлорежущие станки. Типовые механизмы и системы металлорежущих станков: учебное пособие. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2009. – 112 с.
7. Металлорежущие станки. В 2 т. Т. 1: учебник для вузов / Т.М. Аврамова, В.В. Бушуев, Л.Я. Гилевой и др. – М.: Машиностроение, 2011. – 608 с.
8. *Ванин В.А., Колодин А.Н.* Кинематическая структура металлорежущих станков со сложными движениями формообразования с внутренними гидравлическими связями // Технология машиностроения. – 2015. – № 5 (155). – С. 18–26.

9. *Ванин В.А., Колодин А.Н.* Станки с гидравлическими внутренними (формообразующими) связями на основе шагового гидропривода для обработки винтовых поверхностей // Справочник. Инженерный журнал с приложениями. – 2012. – № 7 (184). – С. 30–35.
10. *Ванин В.А., Колодин А.Н., Родина А.А.* Кинематическая структура металлорежущих станков с гидравлическими формообразующими связями // СТИН. – 2014. – № 5. – С. 2–8.
11. *Колодин А.Н., Ванин В.А., Родина А.А.* Затыловочные станки с гидравлическими формообразующими связями: монография. – Deutschland: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. – 169 с.
12. *Vanin V.A., Kolodin A.N., Rodina A.A.* Kinematic structure of metal-cutting machines with hydraulic couplings // Russian Engineering Research. – 2015. – N 34 (12). – P. 763–768.
13. *Vanin V.A., Kolodin A.N.* Modular design based on hydraulic step drives for internal kinematic chains in metal-cutting machines // Russian Engineering Research. – 2011. – N 31 (1). – P. 56–58.
14. *Vanin V.A., Kolodin A.N.* Kinematic structure of gear-cutting machine tools based on a hydraulic step drive for the production of noncircular gears // Russian Engineering Research. – 2009. – N 29 (3). – P. 291–297.
15. *Vanin V.A., Kolodin A.N.* Application of hydraulic step drives in metal-cutting machine tools // Russian Engineering Research. – 2010. – N 30 (5). – P. 446–450.

KINEMATIC STRUCTURE OF MACHINE TOOLS WITH HYDRAULIC CONNECTIONS IN SHAPING THE CIRCUITS

Vanin V. A., D. Sc. (Engineering), Professor, e-mail: vanin51141@yandex.ru

Kolodin A. N., Assistant, e-mail: dekorkan@yandex.ru

Rodina A. A., Senior Lecturer, e-mail: ant.rodina1209@yandex.ru

Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya str., Tambov, 392000, Russian Federation

Abstract

This article discusses the possibility of using hydraulic links with hydraulic drives stepper motors in the executive bodies of machines, where the movement is strictly coordinated with each other in a certain kinematic dependencies and build these relationships in a modular fashion based on stepper hydraulic drive.

The kinematic chain composed of mechanical units are designed and manufactured individually for each machine layout. Furthermore, the mechanical kinematic chains have significant disadvantages: considerable length, low stiffness and unstable, leading to reduced accuracy.

Keywords

The internal hookup, hydraulic hookup, stepping hydraulic drive, hydraulic stepping engine, hydraulic pulse generator, forms-formative connection

УДК 621.9.025

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА РЕЗЦОВ ПРИ РАСТАЧИВАНИИ

*А.А. РОДИНА, старший преподаватель
В.Х. ФИДАРОВ, канд. техн. наук, доцент
И.С. ЕРМАКОВ, магистрант
(ТГТУ, г. Тамбов)*

Родина А.А. – 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 116,
Тамбовский государственный технический университет,
e-mail: ant.rodinal209@yandex.ru

В данной статье проведены теоретические и экспериментальные исследования износостойкости при токарно - копирной обточке - расточке поршневых колец с целью повышения их износостойкости. Экспериментальные исследования проводились на специальном станке путем обработки поршневых колец. Исследования износостойкости резцов проводились путем измерения величины износа резцов в зависимости от марки инструментального материала. По результатам исследования установлено, что применение твердосплавных неперетачиваемых пластин с износостойкими покрытиями позволяет повысить износостойкость резцов по сравнению с существующим более чем в 1.5 раза. В результате работы опробованы и подтверждены исследования износостойкости резцов в производственных условиях.

Ключевые слова: поршневые кольца, токарно-копирная обточка – расточка, износостойкость резцов, неперетачиваемые твердосплавные пластины, износостойкие покрытия.

Введение

Поршневые кольца предназначены для уплотнения и создания совместно с поршнем изолированных пространств, находящихся по обе стороны поршня в цилиндре поршневой машины.

Надежно изолировать указанные пространства можно только при условии, если между рабочей поверхностью поршневого кольца и сопряженной поверхностью цилиндра и между хотя бы одной торцевой поверхностью кольца и соответствующим торцом канавки поршня имеются и значительное время сохраняется, по меньшей мере по одной замкнутой линии соприкосновения.

В связи с этим к поршневым кольцам предъявляются жесткие требования по качеству материала и точности обработки.

Для изготовления поршневых колец двигателя Ярославского моторного завода (ЯМЗ) применяется высокопрочный чугуны. [1-5]

Теория***Влияние материала режущей части инструмента на его износостойкость***

Работоспособность режущего материала может быть повышена за счет такого изменения поверхностных свойств инструментального материала, при которых контактные пло-

щадки инструмента будут наиболее эффективно сопротивляться абразивному, адгезионно-усталостному, коррозионно-окислительному и диффузионному видам изнашивания. При этом инструментальный материал должен одновременно обладать достаточным запасом прочности при сжатии и изгибе, приложении ударных импульсов и знакопеременных напряжений [6-7].

Перечисленные свойства инструментальных материалов обычно являются взаимоисключающими, поэтому создание инструментального материала, обладающего идеальным комплексом указанных свойств в объеме однородного тела, практически не представляется возможным.

«Идеальный» инструментальный материал может быть получен нанесением покрытия. Нанесение покрытия позволяет создать на поверхности необходимый комплекс свойств с сохранением исходных свойств в объеме инструментального материала [8-12].

Промышленное использование режущих инструментов износостойкими покрытиями позволяет решать целый комплекс важнейших народно-хозяйственных задач. К таким задачам относятся:

1. Значительное повышение стойкости и надежности металлорежущего инструмента;
2. Увеличение производительности процессов обработки деталей резанием;
3. Сокращение удельного расхода дорогостоящих инструментальных материалов и остродефицитных элементов (вольфрам, молибден, тантал, кобальт) для их изготовления;
4. Расширение эффективной области использования твердых сплавов и сокращение номенклатуры применяемых сплавов стандартных марок;
5. Увеличение качества поверхностного слоя и точности размеров обработанных деталей;
6. Улучшение обрабатываемости сложнолегированных сталей сплавов;
7. Повышение режущей способности инструментов, изготовленных из низколегированных материалов [1].

Результаты и обсуждение

Методика исследования влияния износостойкого покрытия на стойкость инструментов

Учитывая дефицитность и строгую фондируемость инструментального материала, принято решение повысить стойкость инструмента материала режущих пластин. Поставленная цель может быть достигнута нанесением покрытия на твердый сплав, что позволит создать на поверхности необходимый комплекс свойств с сохранением исходных свойств в объеме инструментального материала.

Причем инструментальный материал с покрытием можно рассматривать как принципиально новый тип композиционного материала с оптимальным сочетанием заданных «поверхностных» свойств и «объемных» свойств [13-16].

Исследования влияния износостойкого покрытия выполняются в следующей последовательности. Перед экспериментом выполняется контроль состояния задних поверхностей режущих пластин обточного и расточного резцов. После обработки каждого пакета колец выполняется измерение максимальных наружного и внутреннего диаметров. Радиальная толщина колец определяется расчетом по формуле:

$$b = \frac{D_{\text{н.н.}} - D_{\text{в.н.}}}{2},$$

где $D_{\text{н.н.}}$, $D_{\text{в.н.}}$ — соответственно максимальные наружный и внутренний диаметры поршневых колец.

По результатам измерений строятся кривые рассеяния размеров наружного, внутреннего диаметров и радиальной толщины поршневых колец. Эксперименты продолжаются до выхода размеров за пределы допуска.

Методика исследования влияния геометрических параметров инструмента на его стойкость и точность обработки. Исследованиям подвергаются резцы со следующими геометрическими параметрами

Для исследования влияния переднего угла γ спроектированы и изготовлены резцы, имеющие $\gamma = -5^\circ$, $\gamma = 0^\circ$ и $\gamma = 5^\circ$. Резец с $\gamma = -5^\circ$ имеют четырехгранную режущую пластину из твердого сплава МС 321 с шириной рабочей грани 9,5 мм без заднего угла. Эта пластина получена в результате переточки ранее изношенной пластины с задним углом $\alpha = 11^\circ$ и шириной рабочей грани 12,7 мм. Ширина рабочей грани 9,5 мм входит в размерный ряд, предусмотренный ГОСТ 19049-80. Резцы $\gamma = 0^\circ$ и $\gamma = 5^\circ$ имеют режущую пластину с шириной рабочей грани 12,7 мм и задним углом $\alpha = 11^\circ$.

Исследование предусматривает также испытания на стойкость и точность обработки пластин четырехгранных с задним углом $\alpha = 11^\circ$, с шириной рабочей грани 12,7 мм и с фаской шириной 0,5 мм, заправленной под углом 5° .

Исследуется также влияние радиуса при вершине r . Используются пластины, имеющие радиус при вершине $r = 0,4$ мм и $r = 1,2$ мм.

Исследованию могут быть подвергнуты также пластины с шириной рабочей грани 9,5

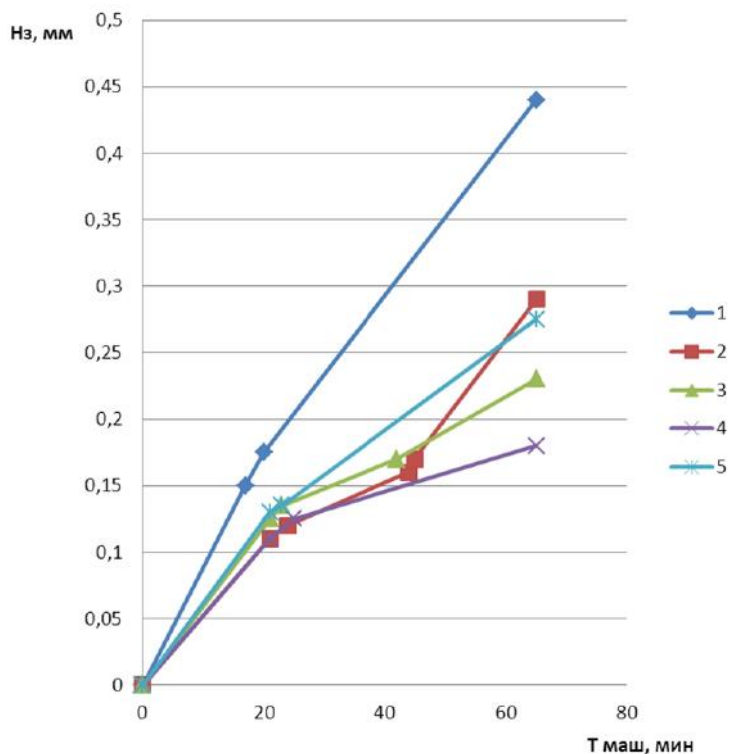


Рис. 1. Зависимость износа от времени при растачивании ($n=2 \text{ с}^{-1}$, $S=0,125 \text{ мм/об.}$) поршневых колец резцом ($\gamma = 0^\circ$, $\phi = \phi_1 = 45^\circ$, $\alpha = 11^\circ$) оснащенным пластинами: 1. МС 321 ($r=0,4$ мм); 2. МС 321 ($r=0,4$ мм) с покрытием; 3. МС 321 ($r=1,2$ мм) с покрытием; 4. ВП 3325 ($r=1,2$ мм); 5. ВК 10 ОМ ($r=0,8$ мм) с покрытием.

мм, имеющие задний угол $\alpha = 11^\circ$, которые планируется получить переточкой изношенных пластин с шириной рабочей грани 12,7 мм.

Помимо названных параметров предполагается исследование влияния главного угла в плане ϕ . Для этих целей экспериментальные резцы могут иметь главный угол в плане ϕ равный 45° и 60° .

Полученные результаты исследования представлены на рис. 1.

Исследование влияния геометрических параметров инструмента на его стойкость и точность обработки проводятся в виде однофакторного эксперимента.

После обработки каждого пакета выполняется измерение максимальных наружного и

внутреннего диаметров. Радиальная толщина колец определяется расчетом по формуле:

$$b = \frac{D_{\text{вн}} - D_{\text{вн}}'}{2}$$

По результатам измерений строятся кривые рассеяния размеров наружного, внутреннего диаметров и радиальной толщины поршневых колец. Эксперимент продолжается до выхода размеров за пределы допуска.

Выводы

Установлено, что применение твердосплавных непоретачиваемых пластин с износостойкими покрытиями позволяет повысить износостойкость резцов по сравнению с существующим на ОАО «Завод подшипников скольжения» техпроцессом более чем в 1.5 раза. В результате работы опробованы и подтверждены в производственных условиях ОАО «ЗПС».

Для внедрения результатов работы в производство необходимо при токарно - копирной обточке-расточке поршневых колец на заводе ОАО «ЗПС» взамен применяемых твердосплавных пластин марки МС 321 для резцов применить пластины с износостойкими покрытиями марки ВП 3325 и МС 3215 и разработанные исполнителем конструкции резцов и приборов, что позволяет повысить точность обработки и износостойкости резцов более, чем в 1.5 раза.

Список литературы

1. Сысоев С.К., Сысоев А.С., Левко В.А. Технология машиностроения. Проектирование технологических процессов: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2011. – 352 с.
2. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебное пособие. – 3-е изд. – СПб.: Лань, 2010. – 512 с.
3. Ванин В.А., Преображенский А.Н., Фидаров В.Х. Разработка технологических процессов изготовления деталей в машиностроении: учебное пособие. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2008. – 332 с.
4. Ванин В.А., Преображенский А.Н., Фидаров В.Х. Приспособления для металлорежущих станков: учебное пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 316 с.
5. Хватов Б.Н., Зубков Д.В., Родина А.А. Исследование производительности шлифования абразивными лентами с самозатачивающимся зерном // Вестник ТГТУ. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 1030–1037.
6. Пестрецов С.И., Родина А.А. Методика оптимального проектирования процессов лезвийной обработки материалов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2010. – № 10-12 (31). – С. 369–372.
7. Ковшов А.Н. Технология машиностроения: учебник. – 2-е изд., испр. – СПб.: Лань, 2008. – 320 с.
8. Аверьянов О.И., Клетиков В.В. Режущий инструмент: учебное пособие. – М.: МГИУ, 2007. – 144 с.
9. Адашкин А.М., Колесов Н.В. Современный режущий инструмент: учебное пособие для среднего профессионального образования. – М.: Академия, 2012. – 224 с.
10. Рыжкин А.А., Шучев К.Г., Схиртладзе А.Г. Режущий инструмент: учебное пособие. – Ростов н/Д: Феникс, 2009. – 405 с.
11. Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Режущий инструмент. Эксплуатация: учебное пособие. – М.: ИНФРА-М: Новое знание, 2012. – 256 с.

12. Неумоина Н.Г., Белов А.В. Тепловые процессы в технологической системе резания: учебное пособие. – Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2006. – 84 с.
13. Технология машиностроения: учебное пособие / М.Ф. Пашкевич и др. – Минск: Новое знание, 2008. – 478 с.
14. Ермолаев В.А. Технологические процессы в машиностроении: конспект лекций. – М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2011.
15. Научные исследования в технологии машиностроения: учебное пособие / В.А. Ванин и др. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2009. – 232 с.
16. Vanin V.A., Kolodin A.N., Rodina A.A. Kinematic structure of metal-cutting machines with hydraulic couplings // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 34, iss. 12. – P. 763–76.

THE RESEARCH OF BIT WEAR ON BORING

Rodina A. A., Senior Lecturer, e-mail: ant.rodina1209@yandex.ru

Fidarov V. H., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: fidval@mail.ru

Ermakov I. S., Master's Degree student, e-mail: manhunt.47@yandex.ru

Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya str., Tambov, 392000, Russian Federation

Abstract

Theoretical and experimental studies of wear resistance through lathe and template-controlled turning/boring of ring to increase its wearability are carried in this article. Experimental studies were conducted on a special machine by rings processing. The studies of bits wear resistance were conducted by measuring of bits wearability depending on tooling material grade. According to studies results, the application of throw-away carbide inserts with wear-resistance coating can increase bits wear resistance in comparison with current in more than by half.

As the result of work, the studies of bits wear resistance were tested and proved under factory conditions.

Keywords

Ring, lathe and template-controlled turning/boring, bits wear resistance, throw-away carbide inserts, wear-resistance coating

УДК 621.8

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИВОДА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
ТОЧКИ ВЫВЕСКИ СИСТЕМЫ ОБЕЗВЕШИВАНИЯ**

*Г.О. ЧА^{1,2}, магистрант, конструктор
Д.В. СКОКОВ², нач. конструкторского отдела
В.Р. ГЛЕЙМ¹, магистрант
А.Ю. ЛЕВЧУК¹, магистрант
К.П. ПЛОТНИКОВ¹, магистрант
В.Ю. СКИБА¹, канд. техн. наук, доцент
(¹ НГТУ, г. Новосибирск,
² КТИ НП СО РАН, г. Новосибирск)*

Ча Г.О. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41,
Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения Российской академии наук,
e-mail: Grigoriy_olegovich@mail.ru

Для созданий условий имитации отсутствия силы тяжести (обезвешивания) при раскрытии механических устройств солнечных батарей (МУ БС), необходим привод вертикального перемещения точки вывески системы обезвешивания автоматизированной активной (СОА). В Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН) разработан привод вертикального перемещения точки вывески системы обезвешивания в составе СОА. В настоящее СОА изготавливается в опытном производстве КТИ НП СО РАН. Принцип действия привода заключается в перемещении точки вывески по сигналу управляющей программы.

Ключевые слова: приборостроение; привод; система обезвешивания.

Введение

Для проведения испытаний подвижных конструкций систем космических аппаратов в отрасли космического приборостроения используют специальные устройства, называемые системами обезвешивания [1 - 6].

Автоматизированная система обезвешивания предназначена для создания условий имитации отсутствия силы тяжести при раскрытии механических устройств солнечных батарей. СОА должна обеспечивать обезвешивание МУ БС в автоматическом режиме с заданной точностью в момент её трансформации. Раскрытие МУ БС из транспортного положения в рабочее должно происходить с максимальной компенсацией влияния собственной массы МУ БС на работу её механических узлов и минимизацией влияния на результаты испытаний присоединённой массы СОА для МУ БС.

Описание конструкции и принципа ее работы

Способ обезвешивания состоит в том, что крыло механических устройств солнечных батарей в транспортном положении закрепляется на имитаторе корпуса космического аппа-

рата, а панели МУ БС подвешиваются на тросы за центры масс конструкции в 12-ти точках вывески, каждая из которых имеет отдельный привод вертикального, продольного и горизонтального перемещения. С каждым приводом осуществляется обратная связь с помощью датчика силы вывески и блока определения рассогласования координат. В ходе раскрытия датчик силы определяет натяжение троса и посылает сигнал в контроллер, установленный в щите автоматики. В случае изменения натяжения троса контроллер управляет серводвигателем для компенсации изменения натяжения. При раскрытии конструкции отклонение троса от вертикали фиксируется блоком определения рассогласования координат (специальными оптическими датчиками), которые, в свою очередь, передают сигнал на серводвигатели и отклонение компенсируется.

Привод вертикального перемещения точки вывески обезвешивания осуществляет поперечное перемещение по рельсовым профильным направляющим продольной каретки, которая совершает движение вдоль основания, за счет приводов продольного и поперечного перемещения, состоящих из серводвигателей, редукторов и зубчатых шкивов, обкатывающих зубчатые ремни, натянутые по направлению движения. Продольный и поперечный ход ограничивается концевыми выключателями.

Конструкция привода такова, что при отказе датчиков, ограничивающих вертикальный ход, исключается аварийная ситуация, приводящая к поломке МУ БС и нарушению работоспособности системы.

На рисунке 1 представлена кинематическая схема разработанного изделия. Трос с

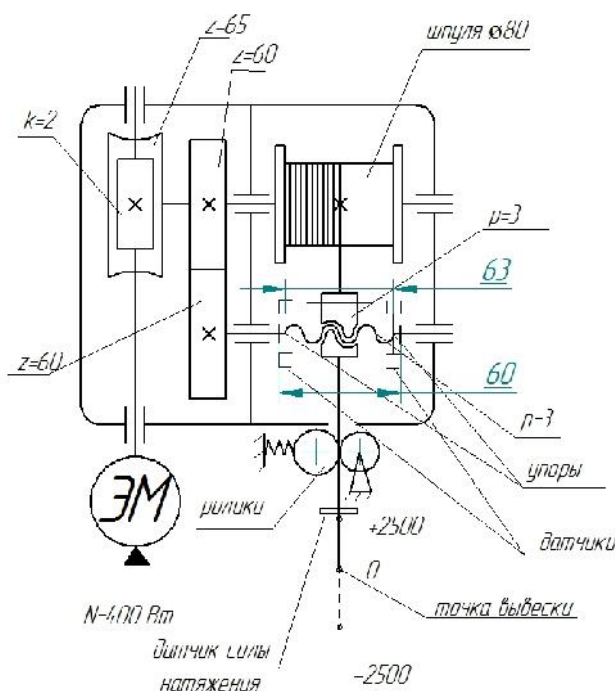


Рис. 1. Кинематическая схема привода системы вертикального перемещения точки вывески обезвешивания

точкой вывески укладывается в один слой гайкой-укладчиком на шпулю диаметром 80 мм. В данной конструкции используется передача «винт-гайка», шаг резьбы винта равен диаметру троса (3 мм), поступательным движением гайки-укладчика согласованы с оборотами вала со шпулей посредством цилиндрической зубчатой передачи 60-60. Таким образом, при перемещении точки вывески на 2500 мм от нулевой точки, шпуля совершит 10 оборотов, гайка-укладчик пройдет путь в 30 мм, перекроет луч датчика, произойдет остановка двигателя. В случае отказа датчиков гайка пройдет путь в 31,5 мм и достигнет механического упора. Как только момент на двигателе возрастет - произойдет его останов. Во избежание перемещения объекта обезвешивания при воздействии каких-либо внешних нагрузок установка двигатель и шпуля согласованы посредством червячной передачи, обладающей свойством самоторможения.

Выбор диаметра и ширины шпули [7 - 12]:

$$n = \frac{L}{\pi D} \quad (1)$$

где n – количество оборотов шпули, L – вертикальный ход точки вывески, D – диаметр шпули.

$$D = \frac{L}{\pi n} \tag{2}$$

Принимаем $n = 20$ оборотов.

$$D = \frac{5000}{3,14 \cdot 20} = 79,618 \text{ мм} \tag{3}$$

Принимаем $D = 80$ мм. Тогда минимальная ширина m шпули:

$$m = n \cdot d + b \tag{4}$$

$$m = 20 \cdot 3 = 60 + b \text{ мм} \tag{5}$$

где d – диаметр троса, b – толщина укладчика.

Таким образом, выставляем датчики ограничения вертикального хода на расстоянии $60+b$ мм, а упоры для гайки-укладчика на расстоянии $63+b$ мм (во избежание обрыва троса добавляем по 1,5 мм на сторону, что равно половине оборота шпули). На рисунке 2 представлена кинематическая схема привода в крайних положениях.

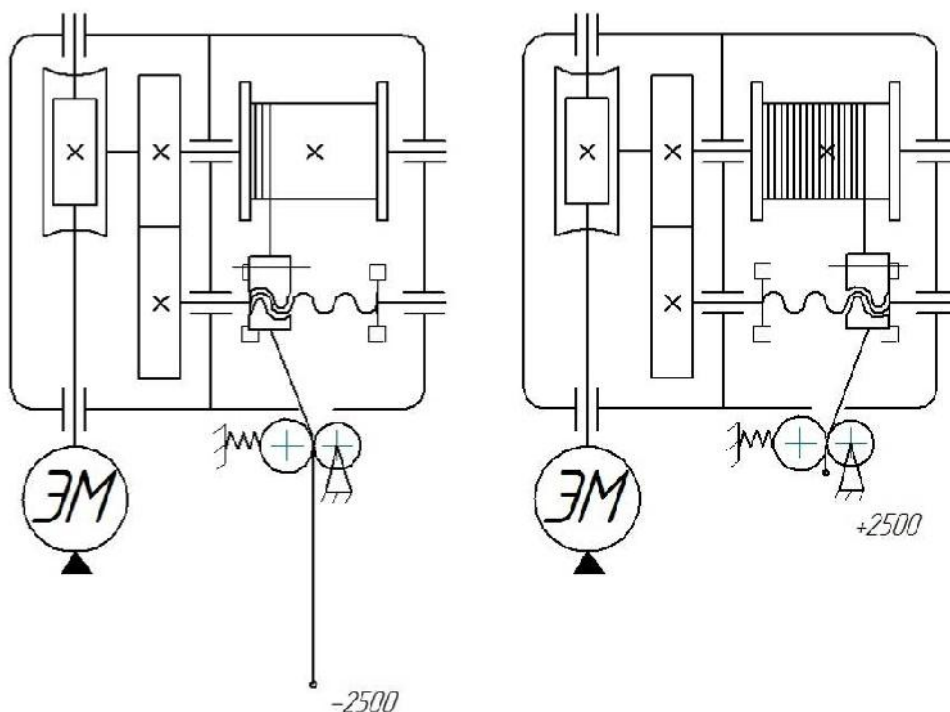


Рис. 2. Крайние положения точки вывески

Выводы

Привод вертикального перемещения системы автоматизированной активной показал высокую степень надёжности в эксплуатации и был разработан таким образом, что вертикальный ход точки вывески ограничивается не только оптическими датчиками, но и жесткими упорами, что фактически сводит к минимуму вероятность механической поломки как БС, так и элементов привода системы. Червячная передача, обладающая свойством самоторможения, позволяет точкам вывески перемещаться только за счет двигателя, что исключает вероятность движения объекта обезвешивания под воздействием сил тяжести или внешней нагрузки при возникновении аварийной ситуации (отключении электричества).

Список литературы

1. Камалов В.С. Производство космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1982. – 280 с.
2. Кучина Ю.В., Круглов П.В. 77-48211/625361 Разработка конструкции стенда трёхосного обезвешивания малого космического аппарата для наземной экспериментальной отработки системы ориентации и стабилизации // Инженерный вестник. – 2013. – № 10. – С. 14.
3. Актуальные проблемы в машиностроении / под ред. В.Ю. Скибы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 588 с. – ISBN 978-5-7782-2410-0.
4. Экспериментальные исследования элементов космических конструкций [Электронный ресурс] / В.Н. Зимин, И.М. Колосков, В.Е. Мешковский, Л.П. Таирова, С.А. Чурилин // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 3. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/617.html> (дата обращения: 21.03.2016).
5. Экспериментальная отработка космических летальных аппаратов / В.А. Афанасьев, В.С. Барсуков, М.Я. Гофин и др.; под ред. Н.В. Холодкова. – М.: Изд-во МАИ, 1994. – 412 с.
6. Actual problems and decisions in machine building / ed. by V.Yu. Skeebea. – Pfaffikon: Trans Tech Publ., 2015. – 344 p. – (Applied mechanics and materials; vol. 788). – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788. – ISBN 978-3-03835-551-9.
7. Курсовое проектирование деталей машин: учебное пособие для машиностроительных специальностей техникумов / С.А. Чернавский, К.Н. Боков, И.М. Чернин и др.; ред. С.А. Чернавский. – М.: Машиностроение, 1988. – 416 с.
8. Совершенствование технологических процессов машиностроительных производств / А.С. Янюшкин, С.О. Сафонов, Д.В. Лобанов и др. – Братск: Изд-во БрГУ, 2006. – 302 с.
9. Определение основных параметров технологического оборудования / Ю.И. Подгорный, Т.Г. Мартынова, В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, Н.В. Вахрушев, Д.Ю. Корнев, Е.К. Зайцев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 3 (60). – С. 68–73.
10. Выбор конструктивных параметров несущих систем машин с учетом технологической нагрузки / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, О.В. Максимчук, Д.В. Лобанов, В.Р. Глейм, А.К. Жигулев, О.В. Саха // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 4 (69). – С. 51–60. – doi: 10.17212/1994-6309-2015-4-51-60.
11. Иванов М.Н., Финогенов В.А. Детали машин: учебник для высших технических учебных заведений. – М.: Высшая школа, 2008. – 408 с.
12. Архипов П.В., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Совершенствование оборудования под процессы комбинированной обработки // Вестник Таджикского технического университета. – 2013. – Т. 2, № 2. – С. 32–37.

DESIGNING OF WEIGHT POINT'S VERTICAL MOVEMENT DRIVE OF ZERO GRAVITY SYSTEM

Cha G.O.^{1,2}, Master's Degree student, designer , e-mail: Grigoriy_olegovich@mail.ru

Skokov D.V.², Head of Design Department, e-mail: 15823@mail.ru

Gleym V.R.¹, Master's Degree student, e-mail: v_gleim@mail.ru

Levchuk A.Yu.¹, Master's Degree student, e-mail: ge.911@mail.ru

Plotnikov K.P.¹, Master's Degree student, e-mail: k.plotnikow@gmail.com

Skeeba V.Yu.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, 41 Russkaya str., Novosibirsk, 630058, Russian Federation

Abstract

For creating the conditions to simulate the zero gravity during the disclosure of the mechanical devices of solar panels there must be a weighting point's vertical movement drive for an active automated zero gravity system.

In 2014 Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering (TDI SIE) Siberian Branch RAS developed the weighting point's vertical movement drive for an active automated zero gravity system as part of this automated system. At the present time automated system of zero gravity is produced in the pilot plant of TDI SIE.

The operating principle of the drive is to move the weighting point by the signal of the control program.

Keywords

instrumentation; the zero gravity system; drive

УДК 621.313.282.2: 621.318.3

**ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НА ВЫХОДНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

*Л.А. НЕЙМАН, канд. техн. наук, доцент
В.Ю. НЕЙМАН, доктор техн. наук, профессор
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Неyman Л.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: neyman@ngs.ru

В качестве объекта исследований рассматривается колебательная электромеханическая система с электромагнитным возбуждением, получающая питание от синусоидального источника напряжения по однополупериодной схеме выпрямления. На примере расчета периодических процессов электромеханической системы рассмотрены возможности динамической модели для проведения всестороннего анализа рабочих процессов, учитывающих потери мощности в механической системе, методами и средствами структурного моделирования в среде *Matlab Simulink*. Установлено, что точность при динамических расчетах в значительной степени определяется точностью воспроизведения математических аналогов механических характеристик упругих связей и сил трения скольжения.

Ключевые слова: линейный электромагнитный привод, динамическая модель, электромеханические процессы, методы структурного моделирования, анализ рабочих режимов, потери в механической системе

Введение

Электромеханические колебательные системы с электромагнитным возбуждением применяются в различных отраслях промышленности для реализации многих технологических процессов и производств [1–9].

При проектировании подобных систем наибольшее внимание уделяется вопросам электромагнитного и теплового расчета [10–17].

Механическая подсистема, как правило, упоминается только номинально, а сам расчет в большинстве случаев ограничивается только учетом жесткости упругих связей. В особенности это касается расчета динамических характеристик, основанного на различных допущениях и упрощениях физических процессов [18–20].

Вопросы исследования динамического состояния машин и устройств в составе электромеханической системы с электромагнитным возбуждением по-прежнему вызывают серьезные затруднения при решении задач оптимального проектирования [21–23].

Необходимость дальнейшего совершенствования и расширения возможностей динамического расчета линейного электромагнитного привода колебательного движения, применяемого в технических системах для возбуждения низкочастотных колебаний и вибраций, определяет актуальность выполненных исследований.

Динамическая модель электромеханической системы с электромагнитным возбуждением

В качестве объекта исследования рассматривается одномассовая колебательная электромеханическая система с электромагнитным приводом, получающим питание от источника напряжения промышленной частоты по однополупериодной схеме выпрямления (рис. 1, а).

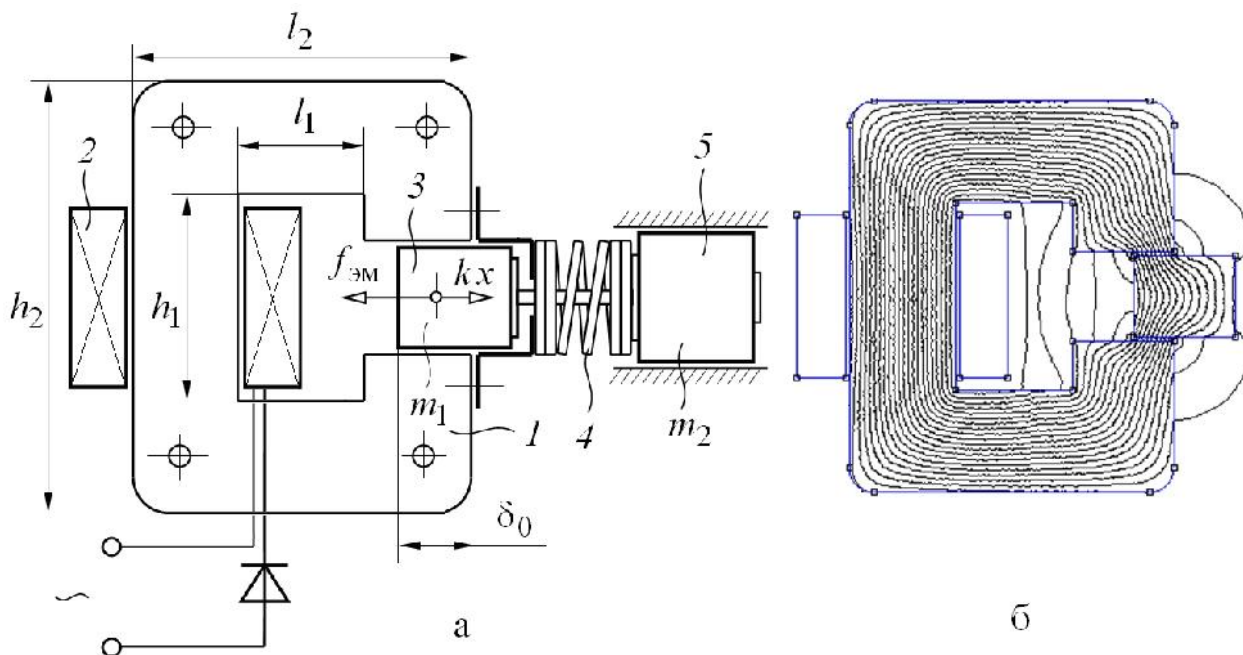


Рис. 1. Электромеханическая система колебательного движения с электромагнитным возбуждением

Электропривод содержит магнитопровод 1, набранный из листов электротехнической стали, закрепленную на магнитопроводе катушку 2 и установленный в воздушном промежутке, образованном полюсными наконечниками, якорь 3, связанный с системой его возврата в исходное положение. Механическая система возврата якоря 3 содержит упругий элемент 4 и жестко связанную с якорем присоединенную массу 5.

Основу динамической модели электропривода составляют дифференциальные уравнения, записанные для электрического равновесия нелинейной цепи и по принципу Даламбера для механической системы с одной степенью свободы.

Расчет статических параметров модели электромагнитного двигателя (ЭМД) $\psi = f(i, x)$ и $f_{эм} = f(i, x)$ для различных положений сердечника якоря осуществлялся через интегральные характеристики магнитного поля [24].

В качестве примера на рис. 1, б показана расчетная область модели ЭМД и результаты построения картины линий магнитного потока.

Вариант структурной схемы электромеханической колебательной системы (рис. 1, а) в программе *Matlab Simulink* представлен на рис. 2.

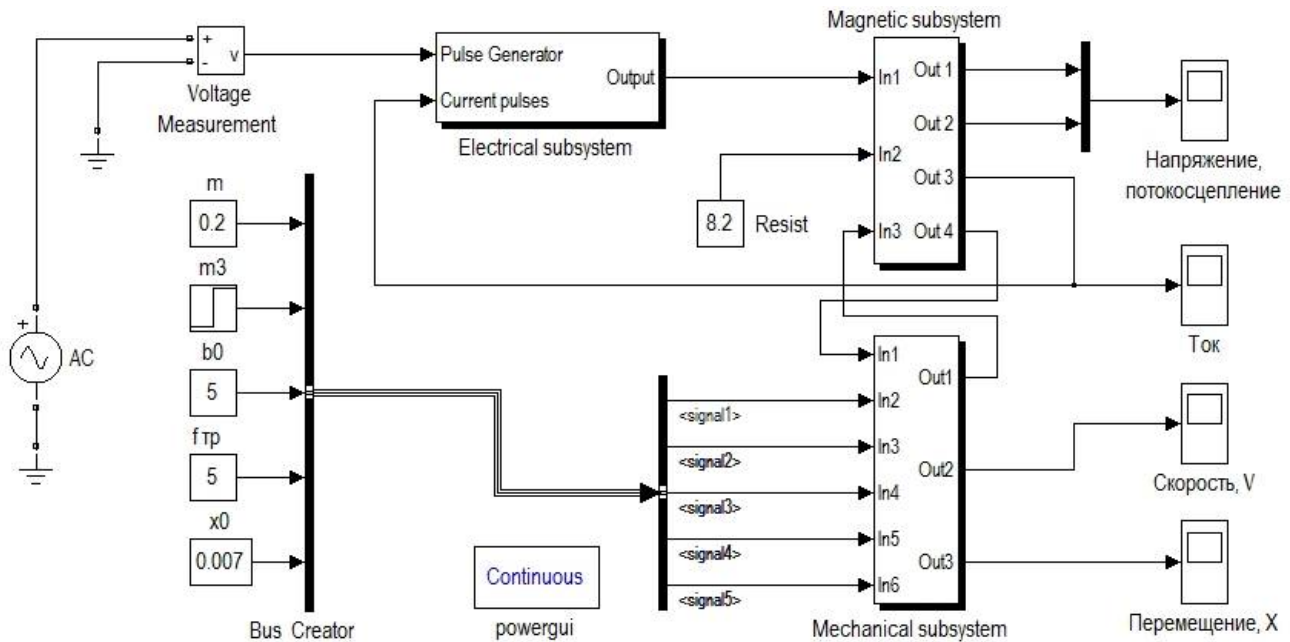


Рис. 2. Структурная схема динамической модели электромеханической системы колебательного движения.

Питание модели осуществляется от однофазного источника напряжения промышленной частоты 50 Гц по однополупериодной схеме выпрямления, реализованной с помощью блока *Electrical subsystem*. Учет нелинейных свойств модели реализован в программе с помощью подсистемы *Magnetic subsystem*. Задание функции двух аргументов и интерполяция статических параметров модели $\psi(i, x)$ и $f_{эм}(i, x)$ в процессе счета осуществляется с помощью блока двумерной таблицы. Учет механических характеристик модели, в соответствии с уравнением (2), реализован с помощью подсистемы *Mechanical subsystem* (рис. 2).

Результаты анализа динамической модели

Анализ рабочих режимов методами и средствами структурного моделирования выполнен при следующих параметрах динамической модели: напряжение источника $U_m = 175 \text{ В}$; масса подвижных частей $m = 0,2 \text{ кг}$; сопротивление катушки $r = 8,2 \text{ Ом}$; коэффициент жесткости упругого элемента (пружины) $k = 12500 \text{ Н/м}$; коэффициент вязкого трения упругих связей $b_0 = 0 \dots 15 \text{ Нс/м}$; сила сухого трения $f_{тр} = 0 \dots 15 \text{ Н}$; начальная глубина внедрения якоря $x_0 = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Линейные размеры магнитопровода $l_1 = 45 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $l_2 = 95 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $h_1 = 46 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $h_2 = 96 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; толщина пакета набранного из листов электротехнической стали $L = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Частота собственных колебаний механической системы $\omega_0 = 250 \text{ с}^{-1}$.

На рис. 3. показаны изменения величин амплитуды A_m и максимальной скорости v_{\max} колебаний якоря электропривода в зависимости от величины коэффициента вязкого трения упругих связей b_0 и силы трения скольжения $f_{тр}$, возникающих в механической колебательной системе электропривода с электромагнитным возбуждением. Из представлен-

ных зависимостей $A_m = f(b_0, f_{тр})$ и $v_{max} = f(b_0, f_{тр})$ видно, что они имеют явно зависимый характер.

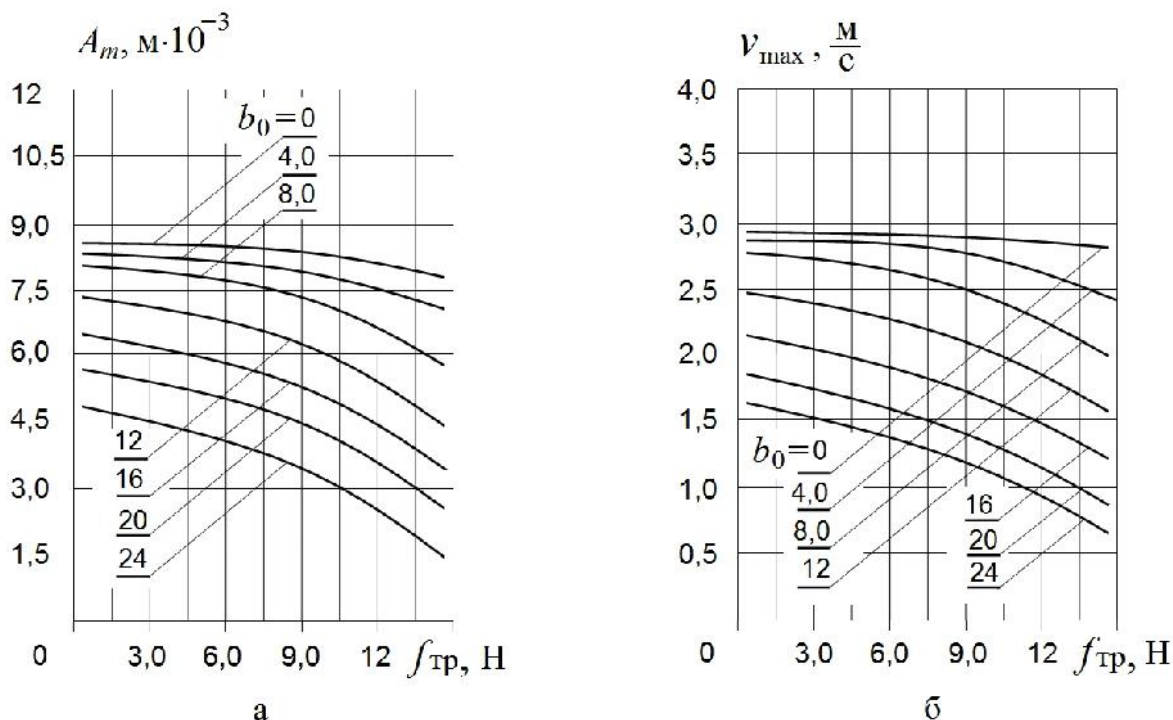


Рис. 3. Графики влияния демпфирующих свойств упругих связей и трения скольжения на: а) амплитуду колебаний A_m ; б) максимальную скорость колебаний v_{max} .

Несложно показать (рис. 3, а), что при ошибочной установке параметра силы трения скольжения в интервале $f_{тр} = 3...12$ Н ошибка вычислений динамической модели может составлять 8...45%. Здесь важно указать, что точность динамической модели в значительной степени зависит от правильности выбора коэффициента вязкости упругих связей и сил трения скольжения.

По разным причинам, возникающим при расчетах, силами сопротивления, зависящим от скорости движения зачастую пренебрегают. Имеющие место допущения, как показывает анализ, позволяют получать скорее качественные, чем количественные результаты.

Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей также показывает хорошее соответствие качественных и количественных результатов, что стало возможным только при точном учете аналогов механических характеристик модели.

Выводы

На примере расчета периодических электромеханических процессов в электромеханической системе с электромагнитным возбуждением, получающей питание от синусоидального источника напряжения по однополупериодной схеме выпрямления, рассмотрены возможности для проведения всестороннего анализа рабочих с учетом механических потерь энергии режимов в квазиустановившихся процессах методами и средствами структурного моделирования *Matlab Simulink*.

Для случая приближенного характера учета аналогов механических характеристик или учета только преобладающих сил сопротивления движению решение задачи

динамического расчета может существенно отличаться от процессов в реальных физических системах и иметь скорее качественные, чем количественные результаты.

Полученные результаты структурного моделирования и рассмотренные предложения по реализации динамической модели можно широко использовать, как в инженерной практике, так и для решения комплексных задач анализа и синтеза электромеханических колебательных систем с электромагнитным возбуждением.

Список литературы

1. *Kuchankov S.N., Timoshenko E.M.* Nonsteady thermal conditions of electromagnetic motors in shock-type equipment // *Journal of Mining Science*. – 1998. – Vol. 34, N 2. – P. 148–152.
2. *Усанов К.М., Угаров Г.Г., Мошкин В.И.* Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2006. – 284 с.
3. *Pevchev V.P.* Science of mining machines the super excitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source // *Journal of Mining Science*. – 2010. – Vol. 46, N 6. – P. 656–665.
4. Low-frequency electrodynamic vibrator with magnetically suspended movable part / *Y.N. Zhuravlyov, S.G. Matceovich, F.G. Kochevin et al.* // *Proceedings of the 4th International Conference on Motion and Vibration Control*. – 1998. – Vol. 3. – P. 1063–1067.
5. *Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В.* Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
6. *Ивашин В.В., Певчев В.П., Кудинов А.К.* Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
7. *Нейман Л.А., Нейман В.Ю.* Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2014. – № 1. – С. 256–259.
8. Прессовое оборудование с линейным электромагнитным приводом для механизации технологических процессов ударной сборки и штамповки мелких изделий / *В.А. Аксютин, Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников* // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2015. – № 2. – С. 220–224.
9. *Нейман Л.А., Нейман В.Ю.* Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // *Современные проблемы теории машин*. – 2014. – № 2. – С. 109–110.
10. *Pevchev V.P.* The use of micro-CAP software to simulate operating processes of electromechanical impulse devices // *Russian Electrical Engineering*. – 2010. – Vol. 81, N 4. – P. 213–216.
11. *Pevchev V.P.* Principal dimensions of the short-stroke electromagnetic motor for a seismic wave generator // *Journal of Mining Science*. – 2009. – Vol. 45, N 4. – P. 372–381.
12. *Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S.* Calculation of magnetic system of the magnetolectric machines // *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2014 Proceedings*. – 2014. – P. 7005698.
13. *Буль О.Б.* Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие. – М.: Академия, 2005. – 336 с.
14. *Нейман В.Ю., Нейман Л.А.* Оценка конструктивного совершенства систем принудительного охлаждения синхронных электромагнитных машин ударного действия // *Журнал Сибирского Федерального университета. Серия: Техника и технологии*. – 2015. – Т. 8, № 2. – С. 166–175.

15. *Нейман Л.А., Нейман В.Ю.* Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (97). – С. 214–218.
16. *Нейман Л.А., Нейман В.Ю.* Повышение точности аналитического расчета радиальных сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных элементов магнитопровода // Научный вестник НГТУ. – 2015. – № 1 (58). – С. 246–256.
17. *Andriyanova V.A., Antonov Y.B., Loginov V.S.* Unsteady temperature conditions of cylindrical active element of electromagnet // 9th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists – Modern Techniques and Technologies, МТТ' 2003: Proceedings. – 2003. – P. 58–59.
18. *Манжосов В.К., Лукутина Н.О., Невенчанная Т.О.* Динамика и синтез электромагнитных генераторов силовых импульсов. – Фрунзе: Илим, 1985. – 119 с.
19. *Усанов К.М., Каргин В.А., Волгин А.В.* Оценка эффективности энергопреобразований в электромагнитной ударной машине с упругим возвратным элементом // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2008. – № 1. – С. 86–87.
20. *Певчев В.П., Ивашин В.В.* Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей. – Тольяти: Изд-во ТГУ, 2012. – 142 с.
21. *Ивашин В.В., Певчев В.П.* Особенности динамики работы и энергетических диаграмм импульсного электромагнитного привода при параллельном и последовательном соединении обмоток возбуждения // Электротехника. – 2013. – № 6. – С. 42–46.
22. *Татевосян А.А., Татевосян А.С.* Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325, № 4. – С. 121–132.
23. Improved method of design simulation of force-controlled valve electromagnet in scheme with ballast resistor / A.V. Prikazchikov, N.V. Russova, E.V. Sagaradze, G.P. Svintsov, D.G. Shoglev // Russian Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 82, N 1. – P. 55–60.
24. *Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.* Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности // Автоматизированные электромеханические системы: сборник научных трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177–187.

**EFFECT OF MECHANICAL LOSSES IN THE OUTPUT PERFORMANCE
OF ELECTROMECHANICAL OSCILLATION SYSTEM WITH ELECTROMAGNETIC
EXCITATION**

Neyman L.A., Ph.D. (Engineering), Assistant Professor, e-mail: neyman@ngs.ru
Neyman V.Yu., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: nv.nstu@ngs.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

Dynamical analysis improvement and its capabilities extension are important for the complex analysis and synthesis of the vibratory electromagnetic drive applied in engineering systems for exciting low-frequency oscillations and vibrations. The electric drive dynamic model is based on differential equations of the non-linear circuit electrical balance with respect to d'Alembert principle for a mechanical system with spring linkages. Periodical electromechanical processes are considered as an example for studying dynamical model capabilities of the transient and quasi stationary mode fundamental analysis with structural modeling methods and facilities in Matlab Simulink. It is established that dynamical analysis accuracy is significantly depends on reproduction accuracy of mathematical models of mechanical characteristics of spring linkages and sliding friction forces. The electric drive operation characteristics are obtained from the developed dynamical model. The computer simulation results have been compared with physical experiment data. The results of the dynamical model implementation and operation characteristics analysis can be widely used for other types of machines and devices with reciprocated electromagnetic drives.

Keywords

linear electromagnetic drive, dynamical model, electromechanical processes, structural modeling methods, operating modes analysis, losses in the mechanical system.

УДК 621.313.17

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВИБРОКОМПРЕССОРА**

*О.В. РОГОВА, ассистент
В.Ю. НЕЙМАН, доктор техн. наук, профессор
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Рогова О.В. - 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: rogoва@corp.nstu.ru

Работа посвящена исследованию линейного электромагнитного двигателя с активной зубцово-пазовой зоной, используемого для электропривода виброкомпрессора. Наличие активной зубцово-пазовой зоны силовых элементов магнитной системы обеспечивает получение высоких амплитудных значений статической тяговой характеристики без механической фиксации конечного положения якоря и использования сложных схем управления. Предложен корректирующий коэффициент k_1 , учитывающий угол раскрытия и число пар полюсов статора двигателя. Выполнено исследование по изменению постановки решения задачи в численном эксперименте с учетом корректирующего коэффициента. Установлено, что при расчетах магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны с учетом k_1 максимальная относительная погрешность получаемых значений не превышает 14 %. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании линейных электромагнитных двигателей с активной зубцово-пазовой зоной силовых элементов магнитной системы.

Ключевые слова: вибрационные технологии, цилиндрический электромагнитный двигатель, зубчатые элементы конструкции магнитопровода, корректирующий коэффициент, конечно-элементное моделирование.

Введение

Несмотря на простоту конструкции электромагнитных двигателей, проектирование их затруднено нелинейностью свойств используемых магнитных материалов и сложным пространственным распределением магнитного поля [1-9]. Основное энергопреобразование в линейных электромагнитных двигателях (ЛЭМД), разрабатываемых для электропривода виброкомпрессора [10-13], происходит в зубцово-пазовой зоне, поэтому точность расчета магнитной системы будет в основном определяться точностью расчета магнитного поля воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны силовых элементов магнитной системы двигателя.

В качестве параметра, подлежащего расчету, рассматривается магнитная проводимость воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны ЛЭМД, так как от точности определения ее значений, в частности, будет зависеть точность получаемых значений статической тяговой характеристики электромагнитных двигателей [14-15].

Метод исследования

Расчет магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны ЛЭМД рисунка 1 предполагается выполнять в декартовой системе координат по методикам, разработанным для геометрически плоских магнитных систем с выраженной зубцово-пазовой зоной [16-21]. Однако конструктивное исполнение силовых элементов магнитной цепи двигателя предполагает трехмерное решение задачи отыскания магнитной проводимости. В данном случае полюса статора охватывают якорь частично, а область их взаимодействия определяется числом пар полюсов статора z и углом их раскрытия α . Пренебрежение данными величинами при расчетах может вызвать существенное увеличение погрешности получаемых значений магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны двигателя.

На основании вышеизложенного, при аналитических расчетах предлагается использовать корректирующий коэффициент k_1 , число пар полюсов статора z и угол их раскрытия α :

$$k_1 = (\alpha \cdot z) / 180 \quad (1)$$

При расчете учитывалось, что ширина полюса l_2 не должна быть меньше диаметра якоря для $z_1 = 1$ и радиуса якоря – для $z_2 = 2$ (рис. 1).

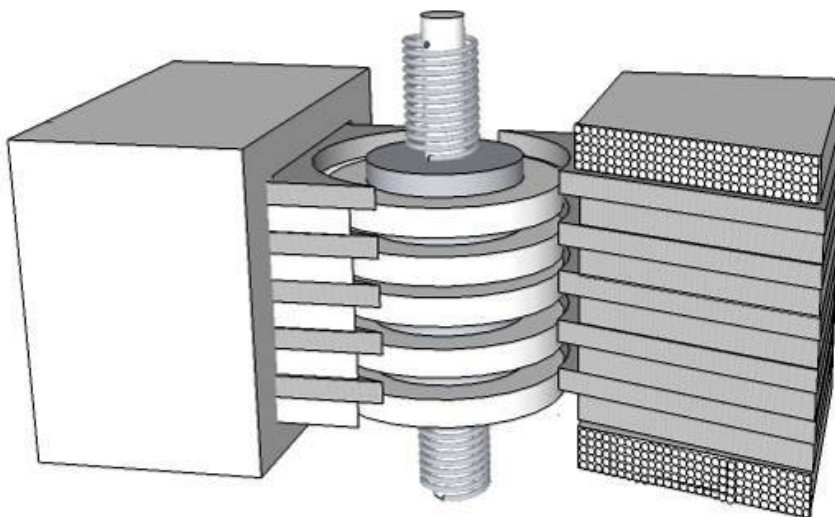


Рис. 1. Конструктивная схема ЛЭМД с катушкой в разрезе

В ходе проведенного ранее исследования [22] было установлено, что развертка двигателя при конечно-элементном моделировании не оказывает существенного влияния на получаемые значения магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны двигателя. Поэтому для рассматриваемого варианта исполнения ЛЭМД, проверку точности значений магнитной проводимости, полученных аналитически, предполагается осуществлять сопоставлением с результатами численного эксперимента двигателя в развернутом виде с последующим умножением на корректирующий коэффициент k_1 .

Для оценки корректности вводимого коэффициента k_1 в программном пакете «FEMM» была проведена серия численных экспериментов по определению значений магнитной проводимости, полученных:

- при плоскопараллельной постановке решения задачи для числа пар полюсов статора $z_1 = 1$, $z_2 = 2$ (рис. 2) и угла их раскрытия в интервале $\alpha_1 = 180 \div 115$ град, $\alpha_2 = 90 \div 58$ град соответственно;

- при осесимметричной постановке решения задачи с умножением результатов на корректирующий коэффициент k_1 . После чего была определена максимальная разница между значениями, полученными при различных постановках решения задачи.

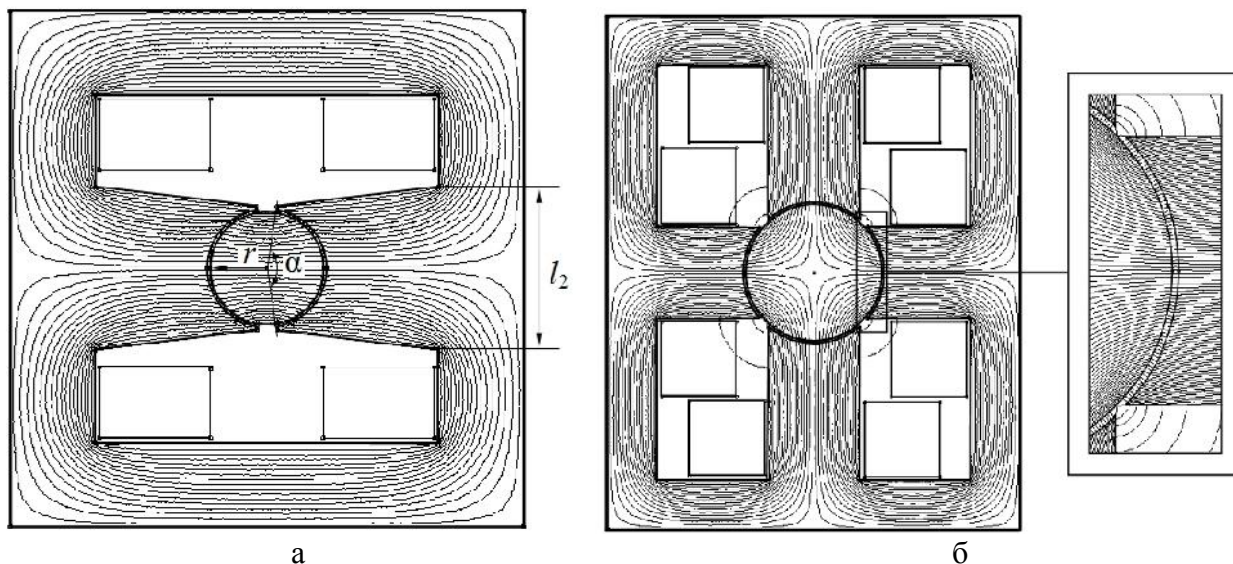


Рис. 2. Линий магнитного потока и геометрическая структура ЛЭМД

В ходе численного моделирования, с целью уменьшения влияния поля выпучивания на значения магнитной проводимости, получаемые при различных значениях α и z в воздушных зазорах, магнитная проводимость определялась в технологических воздушных зазорах в областях взаимодействия полюсов статора с якорем двигателя (рис. 2, б).

Значения магнитной проводимости определялись через нахождение значений энергии магнитного поля в воздушных зазорах зубцово-пазовой зоны двигателя.

Ввиду двухмерного построения конечно-элементных моделей, якорь двигателя имел форму сплошного цилиндра, поэтому после сравнения значений магнитной проводимости, полученных при различных постановках решения задачи с учетом корректирующего коэффициента, было выполнено изменение формы якоря, представленной на рисунке 3, а, на изображенную на рисунке 3, б, при сохранении неизменными массогабаритных параметров магнитной системы. В результате в ходе численного моделирования было установлено, что значения магнитной проводимости при изменении формы якоря меняются в пределах 0,3 %.

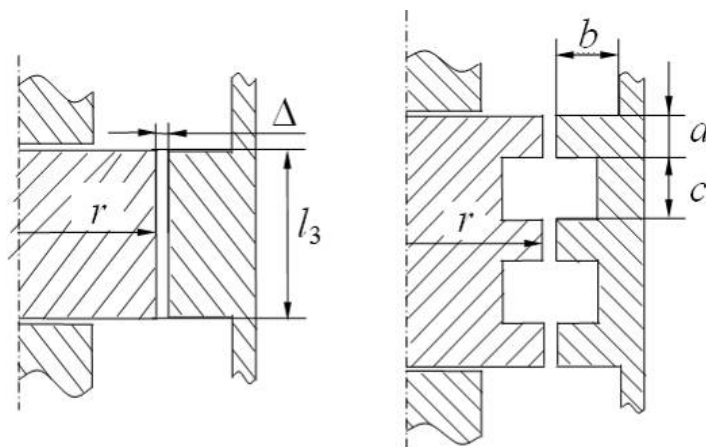


Рис. 3. Рабочие зоны ЛЭМД

Численное моделирование выполнялось при следующих геометрических соотношениях и размерах рабочей зоны силовых элементов магнитной системы: $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$, $c/a = 1,5$, $b/a = 1$, $l_3 = a \cdot n$, $n = 3$ и $a = 4$ мм, где a – ширина зубца, c – межзубцовое расстояние, b – высота зубца, Δ – технологический воздушный зазор, n – число зубцов. Радиус якоря $r = 24$ мм исходя из равенства площадей сечений якоря $S_1 = \pi r^2$ и зубцово-пазовой зоны $S_2 = 2\pi r a n = 2\pi r l_3$. Разница в объемах активных материалов магнитных систем при изменении постановки решения задачи составила 2 %.

Результаты

В ходе проведенного исследования было установлено, что для диапазона соотношений $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$:

- при изменении постановки решения задачи в численном эксперименте разница в значениях магнитной проводимости при $z_1 = 1$ и $\alpha_1 = 180$ град ($z_2 = 2$ и $\alpha_2 = 90$ град) составляет 3 % (4%);

- максимальная разница в значениях магнитной проводимости, полученных при различных постановках решения задач (для интервалов значений $\alpha_1 = 180 \div 115$ град, $\alpha_2 = 90 \div 58$ град) составляет 13-14%.

Выводы

На основании проведенных исследований установлено, что предлагаемый корректирующий коэффициент k_1 обеспечивает точность получаемых значений магнитной проводимости в пределах 97-86%, и может быть использован при проектировании ЛЭМД с активной зубцово-пазовой зоной для электропривода виброкомпрессора [12-13].

Список литературы

1. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Calculation of efficiency of DC electromagnet for mechatronic systems // IFOST 2008: Proceedings of the 3rd International Forum on Strategic Technology, 23–29 June 2008. – Novosibirsk; Tomsk, 2008. – P. 452–454.
2. On the question of taking into account the main dimensions when selecting type of electromagnet according to value of constructive factor / V.Yu. Neiman, L.A. Neiman, A.A. Petrova, A.A. Skotnikov, O.V. Rogova // Russian Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 82, N 6. – P. 328–331.
3. Chen H.S., Tsai M.C. Design considerations of electromagnetic force in a direct drive permanent magnet brushless motor // Journal of Applied Physics. – 2008. – Vol. 103, N 7. – P. 117–122.
4. A microfabricated electromagnetic linear synchronous motor / M.V. Shutov, E.E. Sandoz, D.L. Howard, T.C. Hsia, R.L. Smith, S.D. Collins // Sensors and Actuators A: Physical. – 2005. – Vol. 121, N 2. – P. 566–575.
5. Bogdanov E., Nomokonova Y., Rikkonen S. Oscillatory system of the jet electromagnetic vibrator // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 66: 20th

International Conference for Students and Young Scientists: Modern Techniques and Technologies, MTT 2014. – Tomsk, 2014. – P. 84–88.

6. *Pevchev V.P.* Principal dimensions of the short-stroke electromagnetic motor for a seismic wave generator / V. P. Pevchev // *Journal of Mining Science*. – 2009.– Vol. 45, N 4. – P. 372–381.

7. *Neiman L.A., Neiman V.Yu., Shabanov A.S.* A simplified calculation of the intermittent periodic operating regime of an electromagnetic // *Russian Electrical Engineering*. – 2014. – N 12. – Vol. 85. – P. 757–760.

8. *Neiman V.Yu., Neiman L.A.* Linear synchronous electromagnetic machines for lowfrequency impact technologies // *Russian Electrical Engineering*. – 2014.– Vol. 85, N 12. – P. 752–756.

9. *Neiman L.A., Neiman V.Yu., Shabanov A.S.* Investigation of non-stationary processes in a nonlinear inductor with the massive magnetic core by structured modeling methods // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 792. – P. 38–43.

10. *Rogova O.V.* Electromagnetic motor with an active teeth-slot zone for vibration technologies // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 792. – P. 67–72.

11. *Нейман В.Ю., Рогова О.В.* Бытовое компрессорное оборудование с линейным электромагнитным двигателем // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. – 2012. – № 2. – С. 257–261.

12. Патент 112722 Российская Федерация, МПК F 04 В 45/00. Электромагнитный компрессор / В.Ю. Нейман, О.В. Рогова. – № 2011133626/06; заявл. 10.08.11; опубл. 20.01.12, Бюл № 2. – 2 с.

13. Патент 116916 Российская Федерация, МПК F 04 В 45/04. Электромагнитный компрессор / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, О.В. Рогова. – № 2011151028/06; заявл. 14.12.11; опубл. 10.06.12, Бюл № 16. – 2 с.

14. *Нейман Л.А., Нейман В.Ю.* Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2015. – № 2. – С. 214–218.

15. *Дмитриенко А.В., Угаров Г.Г., Мошкин В.И.* Расчет статических тяговых характеристик цилиндрического ЛЭМД с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем // *Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки*. – 2005. – № 2. – С. 236–238.

16. *Буль О.Б.* Простейшие методы расчета магнитных проводимостей // *Электротехника*. – 2007. – № 1. – С. 17–24.

17. *Ротерс Г.К.* Электромагнитные механизмы. – М.: Госэнергоиздат, 1949. – 412 с.

18. *Буль Б.К.* К расчету магнитных проводимостей поля вблизи воздушного зазора // *Электричество*. – 1952. – № 7. – С. 52–55.

19. К определению магнитных проводимостей электромагнитных систем / Ю.А. Бахвалов, В.П. Гринченков, А.Г. Никитенко, В.В. Пахомов, А.В. Шипулин, Е. Калленбах // *Электромеханика*. – 1997. – № 3. – С. 29–32.

20. *Русин С.Ю.* Расчет электромагнитных систем. – Ленинград: Энергия, 1968. – 133 с.

21. *Рогова О.В.* Сравнительный анализ методик расчета магнитной проводимости // *Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сборник научных трудов*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – С. 148–151.

22. *Рогова О.В., Нейман В.Ю.* К вопросу проектирования линейных магнитных систем с зубчатой структурой магнитопровода // *Современные проблемы машиностроения: сборник научных трудов*. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2013. – С. 57–60.

**IMPROVE OF ACCURACY OF CALCULATION OF THE LINEAR
ELECTROMAGNETIC MOTOR FOR THE ELECTRIC DRIVE
OF VIBROCOMPRESSOR**

Rogova O.V., Senior Lecturer, e-mail: rogoval@corp.nstu.ru

Neyman V.Yu., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: nv.nstu@ngs.ru

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The work is devoted to the study of linear electromagnetic motor with an active gear area for the electric drive of vibrokompressor. The presence of the active gear area provides high amplitude values of the static traction characteristics without mechanical fixation of the end position of the rotor and the use of complex control circuits. The correcting k_1 coefficient considering a corner of disclosure and number of couples of poles of the stator of the engine is offered. Research on change of statement of the solution of a task in numerical experiment taking into account the correcting coefficient is executed. It was established that in the calculation of the magnetic conductivity of air gaps of the gear area, taking into account the maximum relative error of k_1 values obtained does not exceed 14%. The results can be used in the design of the electromagnetic linear motor with an active gear area for the electric drive of vibrokompressor.

Keywords

vibrating technologies, cylindrical electromagnetic motor, gear magnetic circuit, correction factor, finite element modeling

УДК 621.313.282.2: 621.318.3

**МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ ПОТЕРЬ
В МЕХАНИЧЕСКОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ
С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

*Л.А. НЕЙМАН, канд. техн. наук, доцент
Н.И. ЩУРОВ, доктор техн. наук, профессор
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Неyman Л.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: neyman@ngs.ru

Предметом исследований является разработка обоснованного подхода по учету мощности потерь в механической системе с одной степенью свободы на основе экспериментальных исследований колебательных процессов физической модели с линейным электроприводом возвратно-поступательного движения. В качестве объекта для исследований рассматривается одномассовая электромеханическая колебательная система с электромагнитным возбуждением, получающая питание от периодического источника тока. Разработана методика измерения мощности потерь, основанная на предварительной оценке процессов рассеяния энергии в механической системе как за счет собственных демпфирующих свойств упругих связей, зависящих от скорости движения, так и за счет сил сухого трения.

Ключевые слова: мощность потерь в механической системе, электромагнитный привод, сила трения скольжения, вязкое трение, методика измерения.

Введение

Перспективным направлением исследований в области импульсных и виброимпульсных технологий является совершенствование машин и механизмов, созданных на базе электромагнитного привода возвратно-поступательного движения [1–8].

Преимуществами такого электропривода по-прежнему сохраняется его относительно высокая надежность, повышенный ресурс работы, а также простой способ управления амплитудой колебаний независимо от его частоты [9–12].

Имеющиеся методики учета конструктивных параметров машин и узлов, использующих электромагнитный привод позволяют в разной степени улучшать их силовые и энергетические характеристики [13–23].

Известно, что существенное влияние на динамику электромагнитного привода оказывают параметры, учитывающие свойства механической колебательной системы.

В первую очередь это относится к усилиям противодействующим движению и зависящим соответственно от перемещения и скорости движения электромеханической системы с электромагнитным возбуждением связанной с механической частью с помощью упругих связей [24–27].

Измерение потерь вызванных силами трения скольжения и процессами рассеяния (поглощения) энергии за счет собственных демпфирующих свойств упругих связей без использования специальных измерительных средств ограничивает в возможностях анализа баланса энергии электромеханической системы в целом.

Предметом настоящих исследований является разработка обоснованного подхода по учету мощности потерь в механической колебательной системе с одной степенью свободы на основе экспериментальных исследований свободных и вынужденных колебательных процессов без применения сложных измерительных средств.

Методика измерения и основные результаты

В предлагаемой методике следует предварительная оценка сил сопротивления движению при помощи физического эксперимента. В первую очередь этой оценке подвергаются силы трения скольжения (сухого трения) и вязкого трения.

На рис. 1 приведена экспериментальная установка электромеханической колебательной системы с электромагнитным возбуждением содержащая в своем составе катушку 1, сердечник 2 и механическую систему с пружинным возвратом.

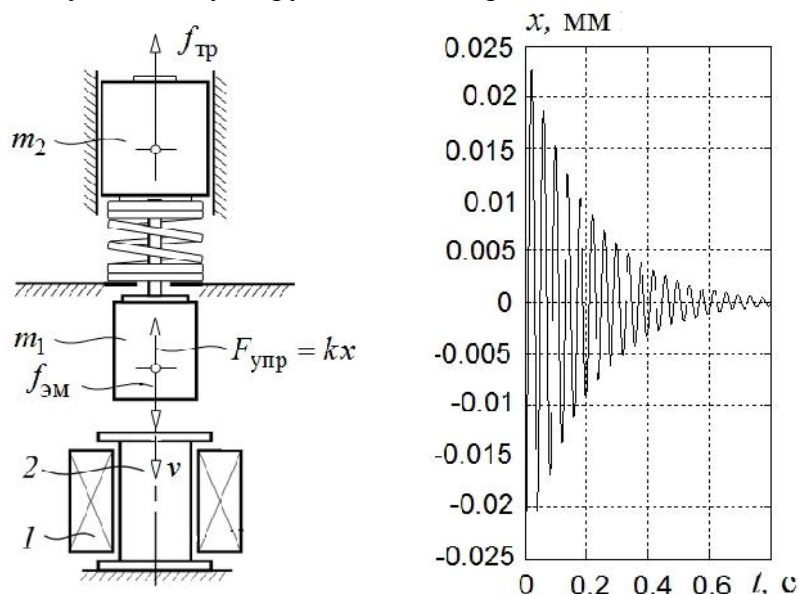


Рис. 1. Электромеханическая колебательная система с упругими связями и график свободных колебаний механической системы.

Под действием периодически изменяющейся электромагнитной силы $f_{эм}$ масса m_1 , а вместе с ней и масса m_2 совершают вынужденные колебания.

Сила сухого трения $f_{тр}$ в такой системе измеряется в статическом режиме методом динамометра для случая $F_{упр} = 0$.

В режиме свободных затухающих колебаний, для случая $f_{эм} = 0$, по осциллограмме (рис. 1) рассчитывается коэффициент вязкости упругих связей b_0 . При определенных условиях ($f_{тр} = 0$) процесс рассеяния (поглощения) энергии происходит только за счет диссипативных сил упругих связей.

Если смещение массы движущихся частей $m = m_1 + m_2$, совершающей свободные колебания отсчитывать от положения ее статического равновесия, то дифференциальное уравнение движения в рассматриваемом случае

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b_0 \frac{dx}{dt} + kx = 0$$

или

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\delta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0,$$

где $\delta = \frac{b_0}{2m}$ - коэффициент затухания; $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ - квадрат частоты собственных колебаний системы без потерь энергии.

Характеристическое уравнение свободных колебаний и его решение известны:

$$p^2 + 2\delta p + \omega_0^2 = 0; \quad p = -\alpha \pm j\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}.$$

Окончательное решение дифференциального уравнения будет определяться известным выражением свободного затухающего процесса

$$x = A_m e^{-\delta t} \cos(\omega_1 t + \varphi),$$

где $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ - угловая частота затухающих колебаний системы с потерями энергии; A_m - амплитуда колебаний в момент $t = 0$; φ - начальная фаза колебаний.

Имея экспериментальную кривую затухающего процесса, можно определить параметры ω_1 , δ и, следовательно b_0 . Найдя период колебаний T , определим частоту $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$. Через отношение двух последовательных амплитуд отстоящих друг от друга на величину периода определится декремент затухания, который связан с коэффициентом затухания соотношением $\Delta = \frac{A_k}{A_{k+1}} = e^{\delta T}$. Выражая коэффициент затухания получим $\delta = \frac{1}{T} \ln \Delta$. Также полагая,

что коэффициент затухания $\delta = \frac{b_0}{2m}$, то коэффициент вязкого трения упругих связей определится известным выражением $b_0 = \frac{2m}{T} \ln \Delta$.

При качественной осциллограмме огибающей свободного затухающего процесса точность расчета достаточно высока и погрешность вычислений не превышает 5%.

Далее при питании катушки переменным током (рис. 1) в режиме вынужденных колебаний механической системы с помощью регистратора перемещений устанавливается соответствующая механическим потерям энергии амплитуда колебаний A_m .

Потери в механической системе составляют

$$P_2 = P_{b_0} + P_{f_{тр}},$$

где $P_{f_{тр}}$ - механические потери мощности от действия силы трения скольжения; P_{b_0} - механические потери мощности, вызванные вязким трением.

Мощность потерь, вызванная сухим и вязким трением для случая периодического процесса, рассчитывается по выражениям:

$$P_{f_{тр}} = \frac{1}{T} \int_0^T f_{тр} [\text{sgn } v] v(t) dt, \quad P_{b_0} = \frac{1}{T} \int_0^T b_0 v^2(t) dt,$$

где $v(t)$ - скорость механических колебаний.

С учетом найденных значений трения скольжения, вязкого трения в упругих связях и соответствующих этим значениям амплитуды колебаний с помощью разработанной структурной схемы в среде *Matlab Simulink* представленной на рис. 2 выполняется окончательный расчет полной мощности потерь в механической системе или ее отдельных составляющих.

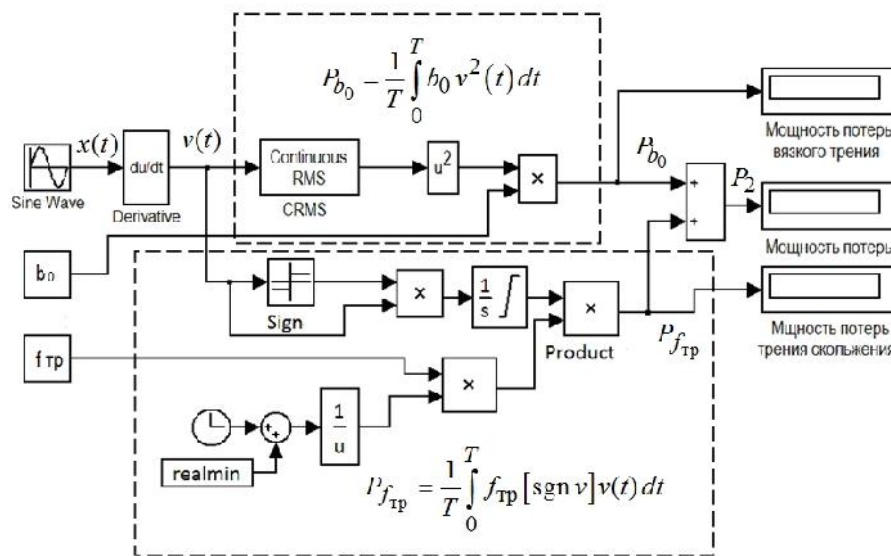


Рис. 2. Структурная схема для расчета механических потерь.

Входной величиной измерительной системы (рис. 2) являются четыре основных параметра: амплитуда колебаний A_m , частота вынужденных колебаний ω ; сила трения скольжения $f_{\text{тр}}$ и коэффициент вязкого трения b_0 .

В случае если магнитными потерями можно пренебречь, то потери мощности в механической системе приближенно можно рассматривать как разность потребляемой активной мощности P_1 и мощности потерь в катушке $P_M = I^2 r_M$ по выражению

$$P_2 \approx P_1 - P_M.$$

При проведении эксперимента контроль потерь лучше осуществлять по двум методикам. В случае шихтованного магнитопровода наблюдается близкое совпадение результатов эксперимента по разным методикам.

Таким образом, точность при составлении баланса энергий электромеханической системы во многом зависит от точности в определении мощности потерь в механической системе, которые связаны с процессами рассеяния энергии как за счет собственных демпфирующих свойств отдельных звеньев и упругих связей, зависящих от скорости движения, так и за счет сил сухого трения.

Список литературы

1. Low-frequency electrodynamic vibrator with magnetically suspended movable part / Y.N. Zhuravlyov, S.G. Matcevic, F.G. Kochevin et al. // Proceedings of the 4th International Conference on Motion and Vibration Control. – 1998. – Vol. 3. – P. 1063–1067.
2. Pevchev V.P. Science of mining machines the superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source // Journal of Mining Science. – 2010. – Vol. 46, N 6. – P. 656–665.
3. Chen H.S., Tsai M.C. Design considerations of electromagnetic force in a direct drive permanent magnet brushless motor // Journal of Applied Physics. – 2008. – Vol. 103, N 7. – P. 07F117.
4. A microfabricated electromagnetic linear synchronous motor / M.V. Shutov, E.E. Sandoz, D.L. Howard, T.C. Hsia, R.L. Smith, S.D. Collins // Sensors and Actuators A: Physical. – 2005. – Vol. 121, N 2. – P. 566–575.

5. Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р. Исследование виброударного режима в электромеханических реактивных преобразователях // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № 2. – С. 23–27.
6. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В. Электромагнитные прессы // Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
7. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 256–259.
8. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.
9. Прессовое оборудование с линейным электромагнитным приводом для механизации технологических процессов ударной сборки и штамповки мелких изделий / В.А. Аксютин, Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 220–224.
10. Bogdanov E., Nomokonova Y., Rikkonen S. Oscillatory system of the jet electromagnetic vibrator // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 66: 20th International Conference for Students and Young Scientists: Modern Techniques and Technologies, MTT 2014". – Tomsk, 2014. – P. 012017.
11. Манжосов В.К., Лукутина Н.О., Невенчанная Т.О. Динамика и синтез электромагнитных генераторов силовых импульсов. – Фрунзе: Илим, 1985. – 119 с.
12. Pevchev V.P. Science of mining machines the superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source // Journal of Mining Science. – 2010. – Vol. 46, N 6. – P. 656–665.
13. Ряшенцев Н.П., Мирошниченко А.Н. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин. – Новосибирск: Наука, 1987. – 160 с.
14. Pevchev V.P. The use of micro-CAP software to simulate operating processes of electromechanical impulse devices // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 81, N 4. – P. 213–216.
15. Pevchev V.P. Principal dimensions of the short-stroke electromagnetic motor for a seismic wave generator // Journal of Mining Science. – 2009. – Vol. 45, N 4. – P. 372–381.
16. Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. Calculation of magnetic system of the magnetoelectric machines // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2014 Proceedings. – 2014. – P. 7005698.
17. Improved method of design simulation of force-controlled valve electromagnet in scheme with ballast resistor / A.V. Prikazchikov, N.V. Russova, E.V. Sagaradze, G.P. Svintsov, D.G. Shoglev // Russian Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 82, N 1. – P. 55–60.
18. Певчев В.П., Ивашин В.В. Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. – 142 с.
19. Татевосян А.А., Татевосян А.С. Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325, № 4. – С. 121–132.
20. Нейман В.Ю. К вопросу о рационализации рабочих процессов и выбора конструктивных схем электромагнитных ударных машин // Автоматизированные электромеханические системы / Новосибирский государственный технический университет; под ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155–170.
21. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Новые конструктивные решения проблемы точной синхронизации возвратно-поступательного движения бойка неуправляемой электромагнитной машины ударного действия // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 280–285.

22. *Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.* Расчет показателя экономичности силового электромагнита постоянного тока с помощью моделирования магнитного поля // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 6. – С. 21–24.
23. *Нейман Л.А., Нейман В.Ю.* Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (97). – С. 214–218.
24. *Ивашин В.В., Певчев В.П.* Особенности динамики работы и энергетических диаграмм импульсного электромагнитного привода при параллельном и последовательном соединении обмоток возбуждения // Электротехника. – 2013. – № 6. – С. 42–46.
25. *Мошкин В.И., Угаров Г.Г.* Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных линейных электромагнитных двигателей с возвратной пружиной // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – № 2 (66). – С. 130–135.
26. *Нейман Л.А., Нейман В.Ю.* Динамическая модель электромагнитного привода колебательного движения для систем генерирования низкочастотных вибраций // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 3 (28). – С. 75–87.
27. *Исмагилов Ф.Р., Саттаров Р.Р., Гумерова М.Б.* Математическое моделирование динамических режимов электромагнитных демпфирующих элементов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т. 14, № 5 (40). – С. 86–90.

METHOD OF POWER LOSS MEASUREMENT IN A MECHANICAL OSCILLATION SYSTEM WITH ELECTROMAGNETIC EXCITATION

Neyman L.A., Ph.D. (Engineering), Assistant Professor, e-mail: neyman@ngs.ru
Schurov N.I., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: ni_schurov@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The research purpose is development of the method how to estimate power loss in a mechanical oscillation system with an electromagnetic drive. A single-mass electromechanical oscillation system with electromagnetic excitation is considered as a test object. The electromechanical system contains the electric drive, movable armature, return spring and additional mass installed in the conductor pipe. The electromechanical system is moved by periodic electromagnetic force generated by the coil powered by a voltage or current source. The power loss measurement method has been developed. The sequence of operations has been considered including measurement of loss caused by mechanical system sliding friction and lubricated friction. Power loss calculation is performed with the flowchart in *Matlab Simulink*. The main advantage of the proposed method is capability of measurement of power loss in the mechanical system without complicated measurement devices.

Keywords

power loss in mechanical system, electromagnetic drive, sliding friction force, lubricated friction, measurement method

УДК 621.833.6 + 622.24.054

**УРАВНЕНИЯ ПРОФИЛЯ ВЕНЦА СО СКРУГЛЕННЫМИ КРОМКАМИ
ДЛЯ ВОЛНОВОЙ ПЕРЕДАЧИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ
ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ**

*В.С. КОРОТКОВ, канд. техн. наук, доцент
ГУАНЬЦИН ЛАО, магистрант
(ТПУ, г. Томск)*

Коротков В.С. - 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
e-mail: kvs@tpu.ru

Рассматриваются геометрические параметры венца волновой передачи с промежуточными телами качения. Выбирается система координат. Выводятся параметрические уравнения профиля венца. С целью повышения коэффициента полезного действия передачи и уменьшения периода ее приработки выводится уравнение для получения скругленных кромок выступов венца. Строится эпициклоидальный профиль венца со скругленными кромками в программе AutoCad. Приводиться образец модели венца, изготовленный на основе полученных математических зависимостей. Изделие предназначено для использования в конструкции ручной машины электробур на базе коллекторного двигателя с полезной мощностью 1 кВт.

Ключевые слова: ручная машина, электробур, коллекторный двигатель, волновая передача, промежуточные тела качения, профиль венца, эпициклоида, эксцентриситет, параметрические уравнения, радиус скругления.

Введение

В работах [1 - 4] описана конструкция ручной машины (РМ) электробур на базе коллекторного двигателя с волновой передачей с промежуточными телами качения. Отличительной особенностью привода РМ является его малая масса и габаритные размеры. Это было достигнуто за счет использования в конструкции привода коллекторного двигателя, имеющего малую удельную массу в сравнении с двигателями других типов [5] в сочетании с волновой передачей с промежуточными телами качения, которая по своим техническим характеристикам превосходит существующие типы механических передач [6, 7]. В [6, 8] получены параметрические уравнения профиля венца волновой передачи с промежуточными телами качения. Профиль представляет собой эпициклоиду [9, 10] с количеством впадин, равным числу тел качения передачи плюс одна. Такой профиль венца имеет острые кромки в местах перехода от одной впадины к другой. На начальном этапе приработки передачи происходит интенсивный износ этих кромок, и продукты износа попадают в места контакта тел качения с венцом, что снижает коэффициент полезного действия передачи. С целью устранения этого недостатка получены уравнения профиля венца со скругленными кромками.

Теория

Для получения параметрических уравнений профиля венца со скругленными кромками введем новую систему координат и обозначения, не изменяя кинематической схемы механизма (рис.1).

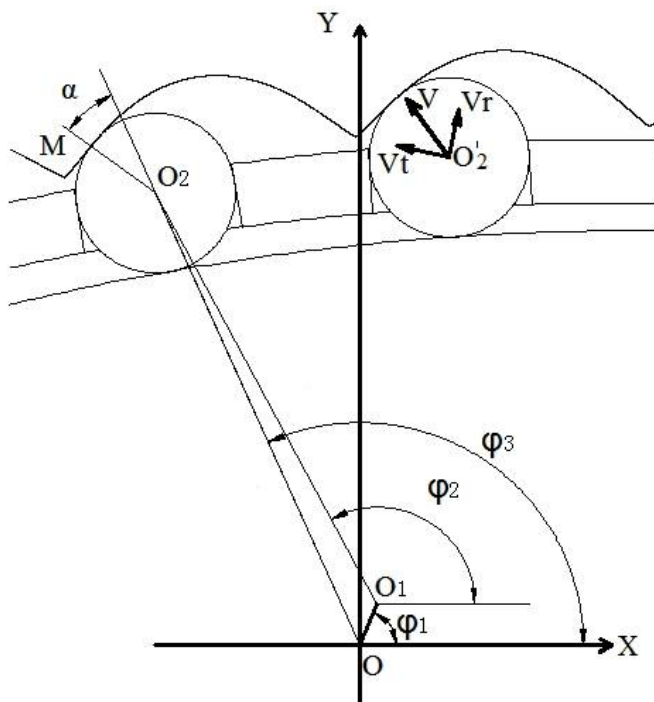


Рис. 1. Новая система координат

OO_1 – эксцентриситет генератора; OO_2 – расстояние между центрами венца и ролика; O_1O_2 – расстояние между центрами генератора и ролика; φ_1, φ_3 – текущий угол генератора и сепаратора; φ_2 – угол поворота воображаемого шатуна (O_1O_2); α – угол передачи движения.

Обозначим $OO_1 = \vec{L}_1$; $O_1O_2 = \vec{L}_2$; $OO_2 = \vec{L}_3$, тогда:

Применив преобразование $\vec{L}_1 + \vec{L}_2 = \vec{L}_3$ Эйлера, параметрические уравнения профиля венца запишем в виде:

$$\begin{cases} x = L_3 \cdot \cos(\varphi_3) + 0,5 \cdot Dш \cdot \cos(\varphi_3 - \alpha) \\ y = L_3 \cdot \sin(\varphi_3) + 0,5 \cdot Dш \cdot \sin(\varphi_3 - \alpha) \end{cases} \quad (1)$$

$Dш$ – диаметр тела качения (шарика или ролика).

Угол передачи движения находим по зависимости [6]:

$$tg(\alpha) = \frac{V_r}{V_t}; \quad (2)$$

V_r – радиальная составляющая скорости движения центра O'_2 ,

V_t – тангенциальная составляющая скорости движения центра O'_2 .

Выведем уравнения для получения скругленных кромок выступов венца. Для этого изобразим расчетную схему (рис.2).

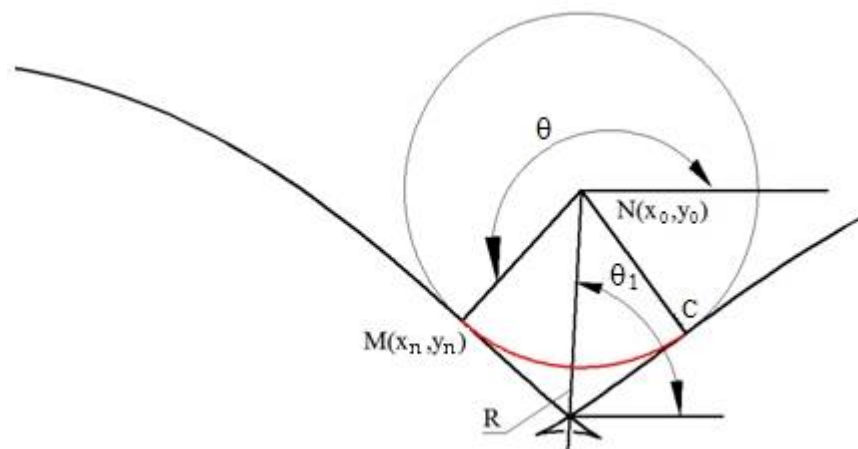


Рис. 2. Расчетная схема:

MC – дуга скругления выступов; $N(x_0, y_0)$ – координаты центра скругляющей окружности; R – расстояние между центрами венца и скругляющей окружности; NC – радиус скругляющей окружности (r); θ – угол между перпендикуляром к касательной линии в точке M и осью X; θ_1 – угол между отрезком R и осью X.

Радиус скругляющей окружности выбирается в зависимости от диаметра тела качения в диапазоне: $r = 0,5 \dots 0,55 Du$.

Тогда уравнения для дуги скругления запишем в виде:

$$\begin{cases} x=R \cdot \cos(\theta_1)+r \cdot \cos(\theta+\Delta \theta) \\ y=R \cdot \sin(\theta_1)+r \cdot \sin(\theta+\Delta \theta) \end{cases} \quad (3)$$

Углы θ и θ_1 находим по зависимостям:

$$\theta = \varphi_3 - \alpha + \pi; \quad (4)$$

$$\theta_1 = \pi/2 - \pi/U . \quad (5)$$

Координата центра скругляющей окружности $N(x_0, y_0)$ находится в точке пересечения отрезков R и MN, заданных функциями:

$$\begin{cases} y_0=k_1 x_0 \\ y_0=k_2(x_0-x_n)+y_n \end{cases} \quad (6)$$

где: $k_1 = \operatorname{tg}(\pi/2 - \pi/U)$ - для прямой R;

$k_2 = \operatorname{tg}(\varphi_3 - \alpha)$ - для прямой MN.

Таким образом, определены все необходимые уравнения для построения профиля венца волновой передачи с промежуточными телами качения со скругленными кромками.

Результаты и обсуждения

По полученным зависимостям (1, 2) рассчитаны координаты профиля венца передачи с промежуточными телами качения в программе MatCad 15 [11, 12]. По этим координатам построена эпициклоида с острыми кромками (рис.3) с характерными петлями в местах перехода от выступа к впадине (рис. 4).



Рис. 3. Фрагмент эпициклоиды

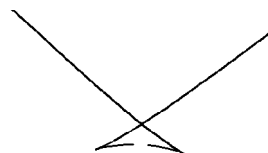


Рис. 4. Петля на острой кромке

Затем были рассчитаны координаты эпициклоиды со скругленными кромками по уравнениям (3,4,5,6). И в программе AutoCad [13, 14] построена кривая профиля венца (рис.5).

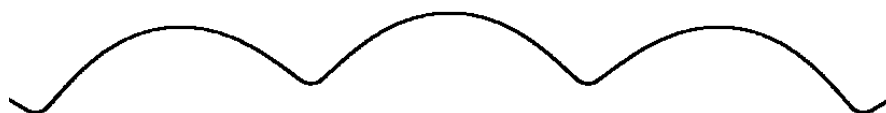


Рис. 5. Фрагмент эпициклоиды со скругленными кромками

Файл с эпициклоидой профиля венца загружался в программу ADEM [15], где создавалась управляющая программа, которая передавалась на УЧПУ станка Emco Concept Mill 155 (рис.6).

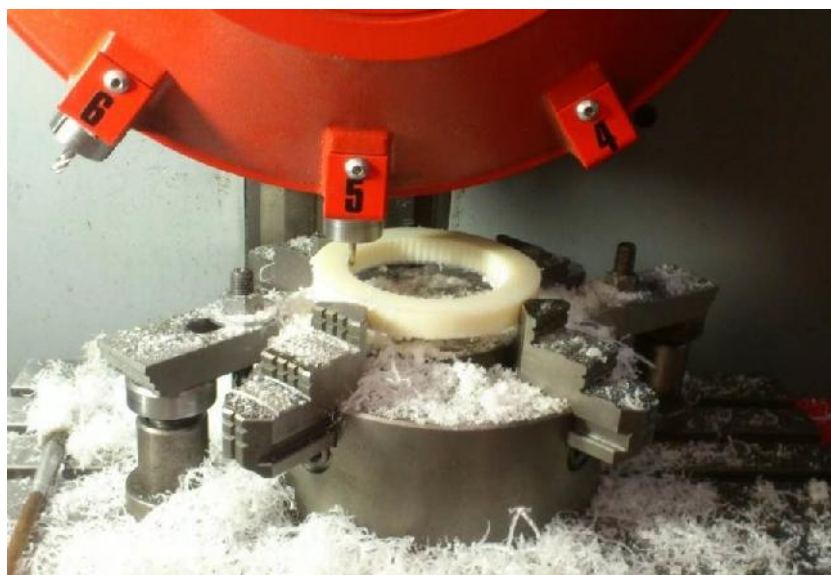


Рис. 6. Модель венца волновой передачи со скругленными кромками.

Контроль размеров венца производился на универсальном измерительном микроскопе УИМ-21.

Выводы

В результате проделанной работы получены уравнения для построения профиля венца волновой передачи с промежуточными телами качения со скругленными кромками. По расчетным координатам создана управляющая программа для станка с ЧПУ и изготовлена модель изделия. Профильный венец со скругленными кромками снизит время приработки передачи, исключит попадание большого количества продуктов износа в зону контакта промежуточных тел качения с венцом, что приведет к повышению коэффициента полезного действия, а также надежности и долговечности передачи.

Список литературы

1. *Коротков В.С.* Создание ручной машины с волновой передачей и исследование ее работоспособности // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 5. – С. 126–130.
2. Патентр 52067 Российская Федерация, МПК E21 В 3/02. Электробур с редуктором с промежуточными телами качения / В.С. Коротков. – № 2005124607/22; заявл. 02.08.2005; опубл. 10.03.2006, Бюл. № 7.
3. *Коротков В.С., Разумов С.В.* Привод с редуктором с ПТК для ручной машины электробур // Справочник. Инженерный журнал. – 2014. – № 9. – С. 58–61.
4. *Korotkov V.S., Razumov S.V.* Electric drill drive with intermediate rolling members reducer // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 756: Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS2014). – P. 24–28.
5. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Т. 2 / под ред. Б.К. Клокова, И.П. Копылова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.
6. *Панкратов Э.Н.* Проектирование механических систем автоматизированных комплексов для механообрабатывающего производства: практикум лидера-проектировщика. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. – 295 с.
7. Волновые и винтовые механизмы и передачи: учебное пособие / В.С. Янгулов; Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 190 с.
8. *Степанов В.С.* Методика проектирования привода на основе волновой передачи с телами качения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. – М., 2009. – 20 с.
9. *Yates R.C.* A handbook on curves and their properties. – Whitefish: Literary Licensing, 2012.
10. *Lockwood E.H.* A book of curves. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
11. *Larsen R.W.* Introduction to Mathcad 15. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.
12. *Кирьянов Д.В.* Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.
13. *Schrock C.R.* Beginning AutoCAD 2010: exercise workbook. – New York: Industrial Press, 2009.
14. *Левковец Л.Б.* Самоучитель AutoCAD 2010. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 672 с.
15. Adem. CAM/CAE/CPD [Electronic resource]: website. – URL: <http://www.adem.ru/> (accessed: 22.03.2016).

**EQUATIONS OF PROFILE TOOTHING WITH ROUNDED EDGES FOR A WAVE GEAR
WITH INTERMEDIATE ROLLING SOLIDS**

Korotkov V.S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kvs@tpu.ru

Lao Guanqing, Master's Degree student, e-mail: taixuyiqing@mail.ru

National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenina Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Abstract

The geometric parameters of the tothing of the wave gear with intermediate rolling solids is considered. A coordinate system is selected. The parametric equations of the profile of the rim are derived. In order to improve transmission efficiency and to reduce its running-in period the equations for the rounded edges of tothing are deduced. The coordinates of the center of the rounding circle are found. The recommendation for the selection of the diameter of the rounding circle is given. Epicycloidal profile with rounded edges by AutoCad program is drawn. The sample model of the ring gear on the basis of the mathematical relationships is made. The product is intended for use in the construction of the power tool electric drill on the basis of the commutator motor with a useful capacity of 1 kW.

Keywords

electric drill, commutator motor, wave gear, intermediate rolling solids, tothing, rounded edges, wear debris, epicycloid, rounding circle, parametric equations

УДК 621.91.01

МОДЕРНИЗАЦИЯ СВЕРЛОЗАТОЧНОГО СТАНКА ЗБ652

*Г.И. СМАГИН, канд. техн. наук, доцент
Н.Д. ЯКОВЛЕВ, ст. преподаватель
С.Д. БУРДУКОВ, инженер
П.А. БУЛАНОВ, магистрант
Н.В. КАЛУГИНА, магистрант
И.А. ОРЛОВА, студентка
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Смагин Г.И. – 630092, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: g.Smagin@ngs.ru

Сверлозаточной станок ЗБ652 предназначен для мелкосерийной заточки спиральных сверл по конической задней поверхности в диапазоне диаметров от 3 до 15 мм. Осциллирующее движение пиноли шпинделя станка предназначено для осуществления самозаточки шлифовального круга, а правящим индентором в этом случае является само сверло. Сверлозаточной станок ЗБ652 используется для переточки стандартных сверл, заточка же на нем многокромочных сверл невозможна.

Целью работы является устранение этих недостатков, т.е. переход на другое базирование, повышающее точность заточки и облегчающее эксплуатацию станка при переточках сверл, а также осуществление конструктивной доработки станка, с целью возможности заточки на нем многокромочных сверл.

Ключевые слова: заточной станок для сверл, сверло, сверлодержатель, крестовой стол, заточка сверла по конической поверхности, многокромочные сверла, заточка многокромочных сверл.

Введение

Сверлозаточной станок ЗБ652 предназначен для мелкосерийной заточки спиральных сверл по конической задней поверхности в диапазоне диаметров от 3 до 15 мм. Осциллирующее движение пиноли шпинделя станка предназначено для осуществления самозаточки (правки) шлифовального круга, а правящим индентором в этом случае является само сверло. Сверлозаточной станок ЗБ652 используется для переточки затупившихся сверл, при этом точность заточки не превышает 0.03 мм. Ввиду конструктивных особенностей станка на нем невозможна заточка многокромочных сверл [1 - 6].

Целью статьи является предложить проект такой модернизации станка, на котором были бы устранены эти недостатки. Для этого предложено перейти на другое базирование, повышающее точность заточки и облегчающее эксплуатацию оборудования при переточках сверл, а также предложены конструктивной доработки станка, для возможности заточки на нем и многокромочных сверл [7 - 14].

Существующее базирование спирального сверла на станке 3Б652 и технология заточки

На модернизируемом станке 3Б652 применяется перезаточка сверл по конической поверхности 1-ого типа (рис. 1).

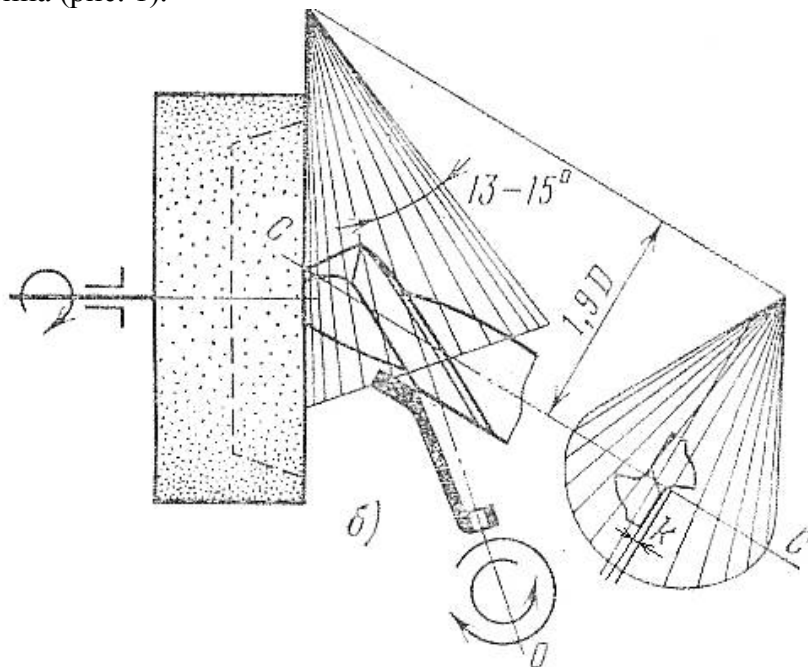


Рис. 1. Схема заточки сверл по конической поверхности

На рис. 2 показана схема базирования спирального сверла на станке 3Б652.

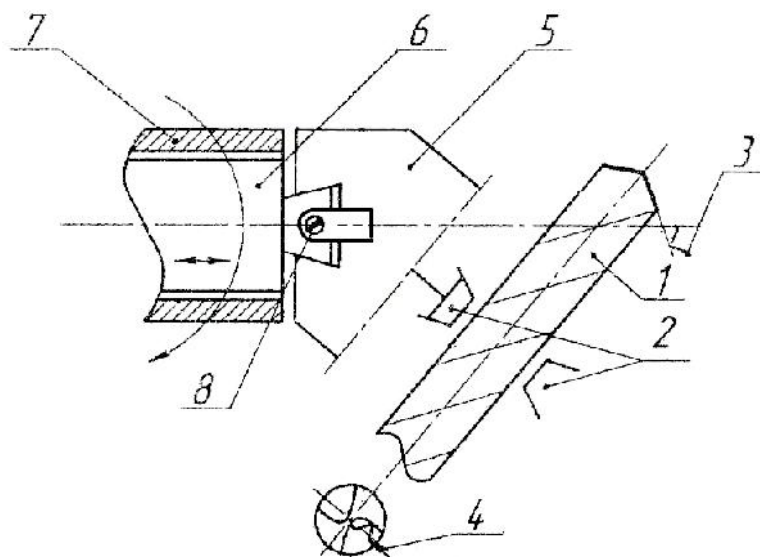


Рис. 2. Схематическое базирование сверла на станке 3Б652

1. Сверло; 2. Базы призмы; 3. База-упорка; 4. База-упорка; 5. Каретка поперечного движения сверлодержателя; 6. Шпиндель сверлодержателя; 7. Корпус шпинделя сверлодержателя; 8. Винт для перемещения поперечной каретки сверлодержателя.

О существующем базировании на станке (рис.2) можно сказать следующее:

В сверлодержателе сверло базируется в призмы, при этом устраняется четыре степени свободы;

Вдоль оси сверла положение сверла ограничивается упоркой, контактирующей с задней поверхностью сверла не затачиваемой в данный момент, устраняется одна степень свободы;

Движение вокруг оси сверла ограничивается упоркой контактирующей с лезвием сверла, затачиваемой первым - устраняется одна степень свободы.

Итого: в сумме устраняется шесть степеней свободы, необходимых при установке базирующего сверла.

Технология заточки сверла при таком базировании при учете того, что сверлодержатель стоит на крестовом суппорте заключается в следующем:

После установки смещения режущей кромки сверла на величину k (рис. 1) с помощью винта (8) (рис.2) перемещения поперечной каретки (5) сверлодержателя (рис. 2), где $k = f(\alpha)$, (α - задний угол сверла) с помощью установочных движений продольной и поперечной кареток (рис. 3. а, б) сверло располагается в средней части осциллирующего движения пиноли, при этом установочное перемещение поперечной и продольной кареток осуществляется с помощью ходовых винтов этих кареток (рис. 3. а, б).

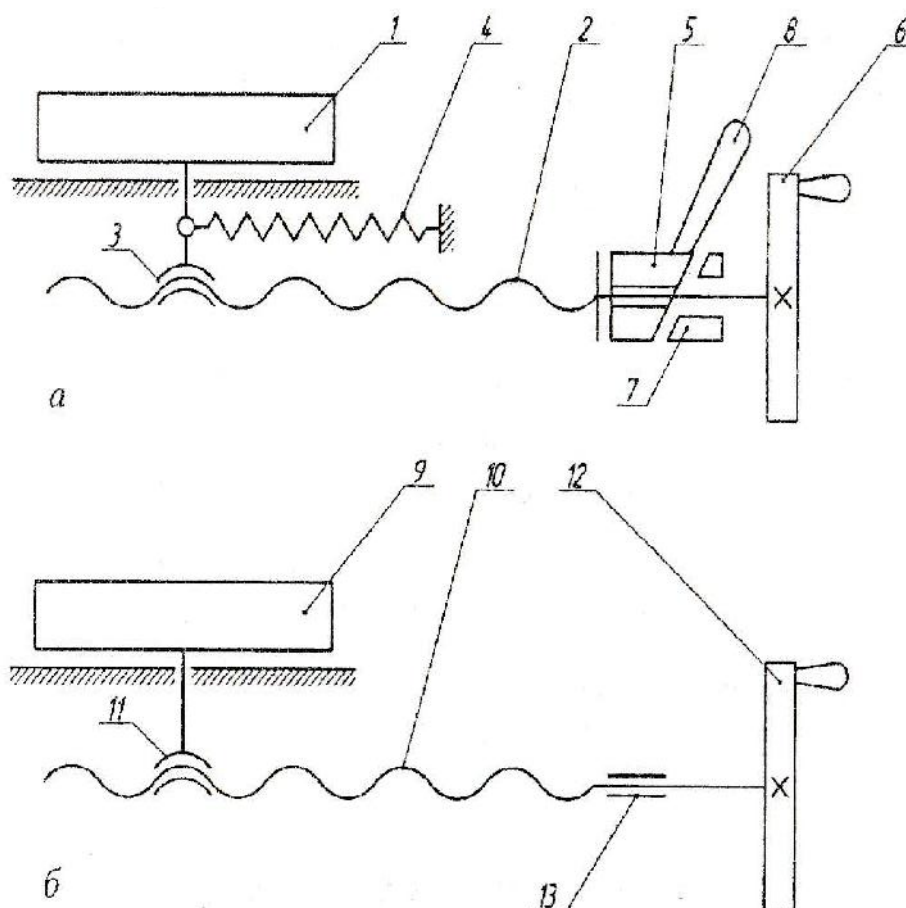


Рис. 3. Крестовой стол станка: а) поперечная каретка; б) продольная каретка.

1. Каретка; 2. Ходовой винт поперечной подачи; 3. Гайка поперечной каретки;
4. Пружина; 5. Кулачок; 6. Рукоятка; 7. Опора ходового винта; 8. Каретка продольная
9. Ходовой винт продольной каретки; 10. Гайка продольного винта; 11. Рукоятка продольного винта; 12. Опора продольного ходового винта.

После этих настроечных процедур осуществляется заточка первой задней поверхности сверла. Поперечную каретку перемещают на величину снимаемого припуска на 0,4 мм, с помощью кулачкового механизма 5 (рис. 3, а). Поперечная каретка (рис. 3, а) может перемещаться от ходового винта 2 (рис. 3, а) и от кулачкового механизма 5 независимо от ходового винта 2.

Заточка второй задней поверхности сверла осуществляется следующим образом:

- С помощью продольной каретки сверло отводится из зоны заточки;
- Сверло поворачивается на 180° и доводится до касания с упоркой 3 (рис. 2), так как с первой поверхности снят припуск, то сверло подвинется до упорки 3 на величину снятого припуска – 0,4 мм, да и с помощью кулачкового механизма каретка пододвинута вперед так же на 0,4 мм;
- С помощью кулачка 5 (рис. 3, а) поперечная каретка отводится в нулевое положение, т.е. на 0,4 мм, т.е. сверло выдвинуто теперь только на 0,4 мм;
- Заточка второй задней поверхности сверла производится уже с помощью продольного суппорта (снимается припуск 0,4 мм);

Такой способ заточки определяется тем, что база 3 (рис. 2) переменна: в одном случае упорка касается еще не заточенной задней поверхности сверла, в другом случае заточенной задней поверхности сверла. При этом сверло при заточке второй задней поверхности перемещается вдоль оси на величину снятого припуска на первой задней поверхности сверла. Отсюда недостатком такого базирования является то, что одну заднюю поверхность сверла затачиваем с помощью поперечного суппорта, а вторую – с помощью продольного. Качество заточек этих поверхностей получается различным.

Схема заточка сверла на станке 3Б652 с базированием сверла в трехкулачковом патроне или цанге (вместо базирования в призмах) представлена на рисунке 4.

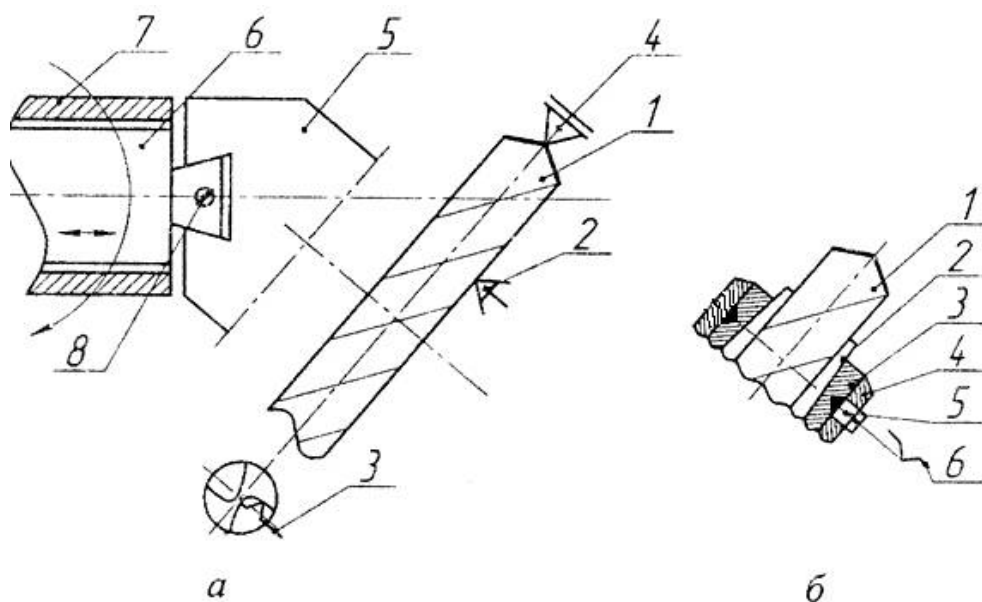


Рис. 4. Базирование сверла в трехкулачковом патроне

а) Схема базирования: 1. Сверло; 2. База-трехкулачковый патрон; 3. База-упорки; 4. Скрытая база в опоре; 5. Поперечный корпус сверлодержателя; 6. Шпиндель сверлодержателя; 7. Опора шпинделя;

8. Винт установки заднего угла α .

б) Конструктивное исполнение базы 4: 1. Сверло; 2. Кулачки патрона; 3. Корпус патрона; 4. Подшипник; 5. Базирующий винт.

Также как и в предыдущем случае при таком базировании заточку сверла можно производить одной поперечной кареткой. Перемещение поперечной каретки при заточке сверла необходимо контролировать индикатором часового типа.

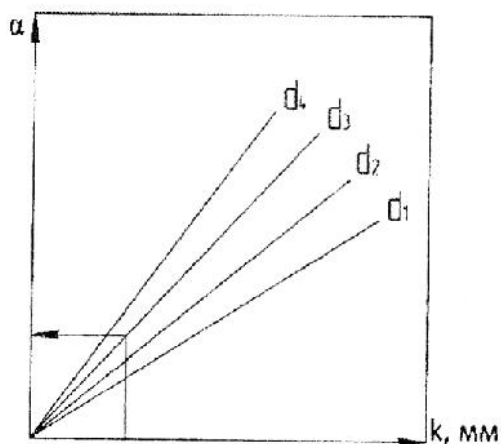


Рис. 5. Тарировочный график установки угла α° с помощью микрометрического винта на сверлодержателе.

Таким образом: 1) при базировании сверла в трехлачковый патрон оператору наиболее комфортно производить переточку сверла. Для удобства настройки угла α вместо обычного винта 8 (рис.4) необходимо установить микрометрический винт для установки смещения «к» (рис.1) и протарировать его на значения заднего угла α для различных диаметров сверл (рис. 5); 2) в трехлачковом патроне можно точно затачивать только шнековые сверла или лопаточные без стружечного исполнения канавок сверла; 3) для заточки сверл с нормальным углом наклона стружечных канавок необходимо применять цанговые зажимы.

Качество заточки сверл определяет точность заточки сверл после модернизации сверлодержателя (рис. 4) с помощью приспособления для измерения биения режущих кромок сверла. Результаты следующие: средняя точность заточки (биение кромок сверла) – 0,02 мм.

Итак, установку значения затачиваемого заднего угла осуществляем с помощью микрометрического винта для поперечного смещения головки сверлодержателя 5 (рис.4) и тарировочного графика (рис.5).

Общий вид модернизированного узла сверлодержателя с зажимом сверла через сверлильный патрон или цанговый зажим показан на рис. 6.

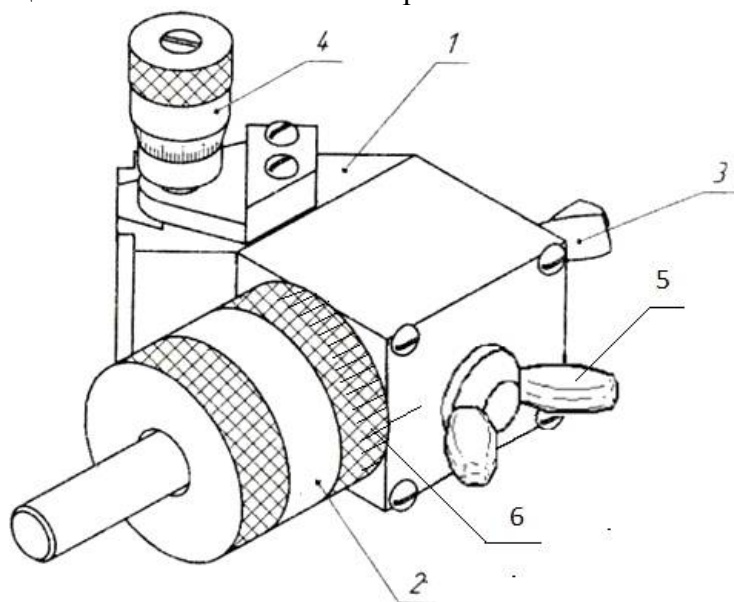


Рис. 6. Модернизированный узел сверлодержателя с зажимом:

1. Корпус поперечной каретки сверлодержателя; 2. Сверлильный патрон или цанговый; 3. Сверло; 4. Микрометрический винт поперечного смещения; 5. Базовый зажимной винт фиксации сверла при повороте на 180° ; 6. Базовые метки для установки сверла при повороте его на 180° .

Необходимо отметить, что в качестве цанг повышенной точности и жесткости могут быть использованы цанги с внутренним гидрозажимом сверла фирмы «Schunk» (Tendo Ecompact), радиальное биение которых составляет 0,003 мм. Но стоимость такого комплекта цанг достаточно высокая 30000 рублей за комплект.

Модернизация станка для заточки многокромочных сверл

В модернизации станка, описанной выше, вопрос касался заточки сверл по конической задней поверхности с одним или двумя углами ϕ . Для заточки многокромочных сверл необходимо уже останавливать осцилляцию пиноли шпинделя станка. Заточка сверл при этом производится специальными фасонными кругами за счет радиальной подачи (продольное перемещение суппорта сверлодержателя в этом варианте используется только как установочное).

В модернизируемом станке не предусмотрено периодическое отключение осцилляции пиноли шпинделя, поэтому в качестве конструктивной доработки предложено было снимать ремень со шкива червячного редуктора кулисного механизма на время обработки многокромочных сверл.

Вторым вариантом является переход на более длинный ремень, передающий движение на кулисный механизм, но с натяжным роликом (при нагружении натяжного ролика движение на кулисный механизм передается, при ослаблении натяжного ролика движение на осцилляцию пиноли не передается). Оба эти варианта и были приняты для модернизации узла осцилляции.

Существует несколько признанных форм заточки многокромочных сверл рис. 7-13 [15 - 17]. Для лучшего понимания формы типичного многокромочного сверла его описание приведено на рис. 7. Многокромочные сверла по сравнению с обычными спиральными сверлами обеспечивают следующее преимущества:

- 1) уменьшение сил резания;
- 2) улучшение условий теплоотдачи;
- 3) улучшение условий отвода стружки;
- 4) повышение производительности обработки или увеличение периода стойкости сверла.

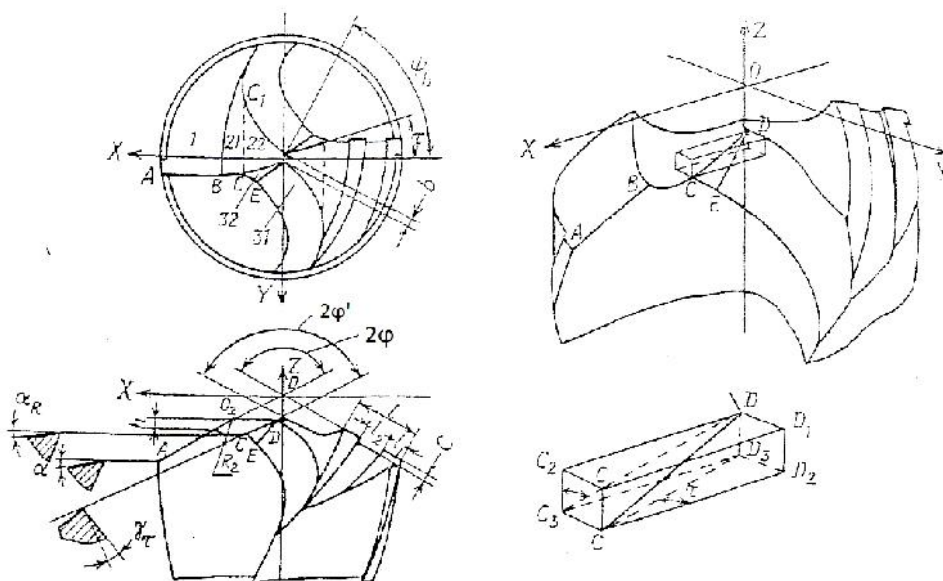


Рис. 7. Типичное многокромочное сверло.

Для разных целей и видов обработки были разработаны варианты многокромочных сверл.

Многокромочное сверло для обработки чугуна (рис. 8) имеет двойной угол ϕ при вершине, ϕ_1 при этом равен 70° . Это существенно улучшает условия теплоотвода от внешних режущих кромок. Поперечная кромка сверла для чугуна короче, а центр вершины сверла расположен ниже, чем у типичного многокромочного сверла.

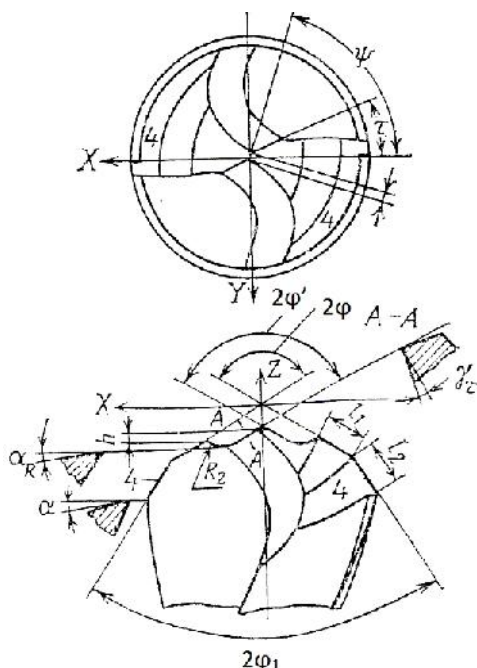


Рис. 8. Многокромочное сверло для обработки чугуна.

Иногда при сверлении латуни, меди сверло может само ввинчиваться в отверстие (эффект саморезов). Для устранения этого явления у сверл для этих материалов вблизи внешнего угла режущей кромки АВ выполняют небольшую дополнительную плоскость б (рис. 9) (подточка).

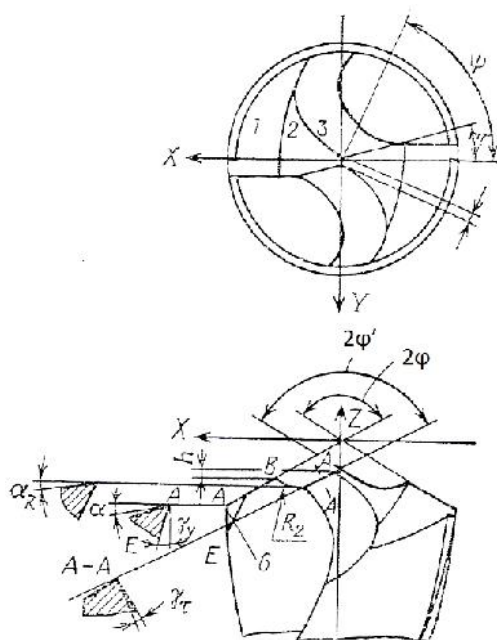


Рис. 9. Многокромочное сверло для обработки латуни.

Многокромочные сверла для обработки алюминиевых сплавов отличаются большими углами при вершине и двумя ассиметричными внешними режущими кромками (рис. 10) на стружко-разделительной поверхности канавок сверла вблизи внешней режущей кромки сошлифовывают очень узкие плоские участки 9. Эти элементы улучшают условия отделения стружки.

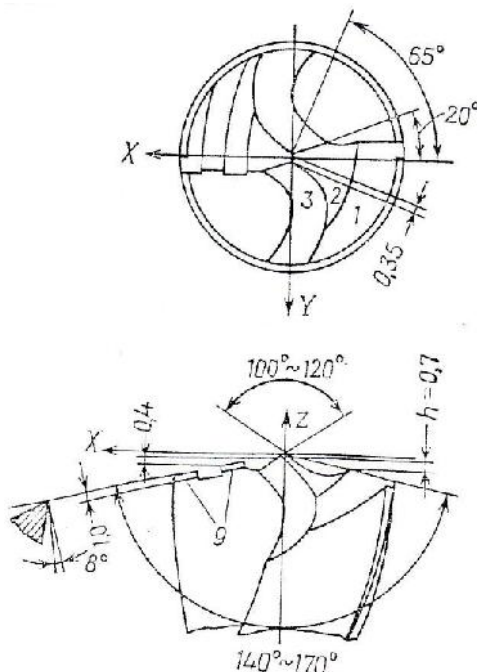


Рис. 10. Многокромочное сверло для обработки алюминиевых сплавов.

На рисунке 11 показано сверло для оргстекла. Плоскость 6 увеличивает передний угол у внешних режущих кромок и способствует уменьшению сил резания. Угол ψ и небольшая плоскость 8 на ленточке сверла способствуют уменьшению трения между сверлом и поверхностью отверстия (это важно из-за низкой теплопроводности оргстекла).

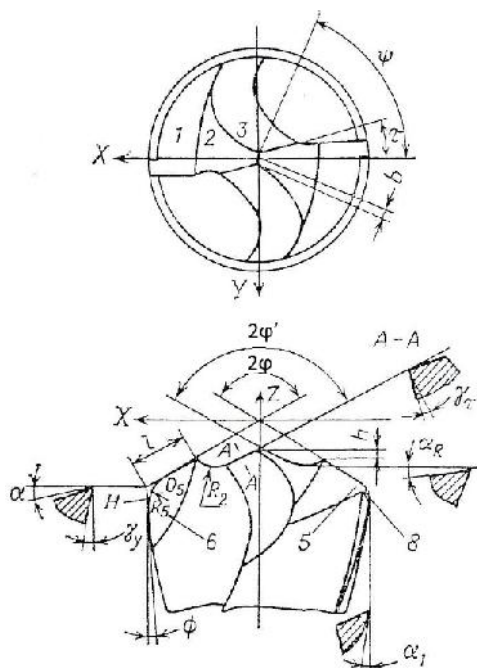


Рис. 11. Многокромочное сверло для обработки оргстекла.

Многокромочное сверло для резины имеет довольно своеобразный внешний вид. У этого сверла отсутствуют внешние режущие кромки, как у типичного многокромочного сверла. Сверло имеет три острия: одно в центре и два на ленточках сверла (рис. 12). Центральное острие служит для надежного центрирования, тогда как два периферийных острия действуют как два острых ножа, обеспечивая получение высокого качества поверхности отверстий в мягких материалах, таких, как резина.

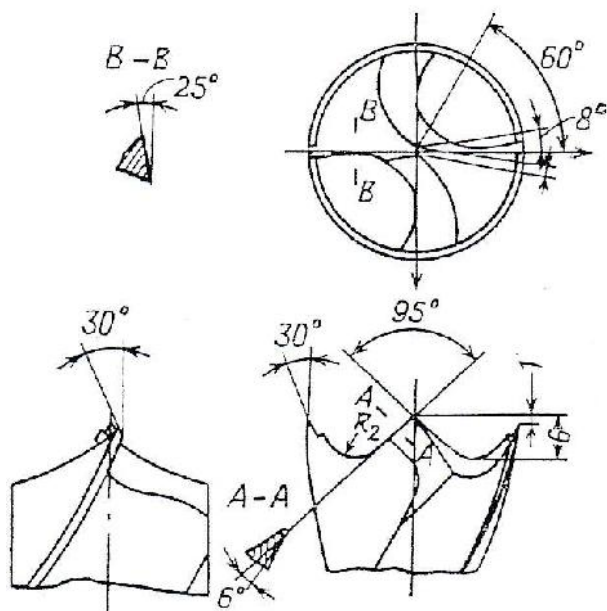


Рис. 12. Многокромочное сверло для обработки резины.

По своей геометрии многокромочное сверло для тонколистовых материалов аналогично сверлу для резины. Единственное различие состоит в отсутствии выемок на двух периферийных остриях (рис. 13). Многокромочные сверла для тонколистовых материалов обеспечивают более плавное осуществление процесса сверления.

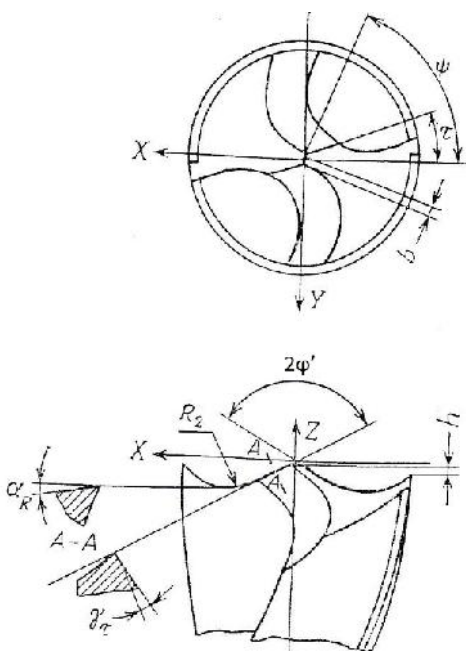


Рис. 13. Многокромочное сверло для обработки тонколистовых материалов

Выводы

1. Предлагаемое в статье новое базирование сверл и конструктивное исполнение сверлодержателя для станка 3Б652 позволяет упростить технологию и повысить точность заточки.
2. Модернизация узла осцилляции пиноли шпинделя (возможность при необходимости отключения ее) позволяет затачивать многокромочные сверла.
3. Для заточки многокромочных сверл необходимо пользоваться фасонными абразивными кругами, а также специальными фасонными наборами кругов.
4. Правку фасонных шлифовальных кругов для заточки многокромочных сверл необходимо осуществлять на месте, т.е. при посадке круга на шпиндель станка с использованием правящих приспособлений с базированием их на поперечной каретке станка.

Список литературы

1. Дибнер Л.Г., Шкурин Ю.П. Заточка спиральных сверл. – М.: Машиностроение, 1967. – 155 с.
2. Особенности обработки длинных ножей на специальных заточных станках / Г.И. Смагин, Н.Д. Яковлев, В.Ю. Скиба, Е.В. Карпов, Д.А. Мишанова, Е.С. Нахимова, А.Б. Цюпко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 1 (58). – С. 32–36.
3. Actual problems and decisions in machine building / ed. by V.Yu. Skeebea. – Pfaffikon: Trans Tech Publ., 2015. – 344 p. – (Applied mechanics and materials; vol. 788). – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788. – ISBN 978-3-03835-551-9.
4. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Ковалевский С.В. Повышение качества подготовки твердосплавного инструмента // Системы. Методы. Технологии. – 2009. – № 1. – С. 95–98.
5. Разработка технологии подготовки режущего инструмента для обработки слоистых композиционных материалов / Д.А. Рычков, В.А. Скрипняк, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 2 (63). – С. 6–13.
6. Contact processes in grinding / A. Yanyushkin, D. Lobanov, P. Arkhipov, V. Ivancivsky // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 17–21. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17.
7. Совершенствование технологических процессов машиностроительных производств / А.С. Янюшкин, С.О. Сафонов, Д.В. Лобанов и др. – Братск: Изд-во БрГУ, 2006. – 302 с.
8. Актуальные проблемы в машиностроении / под ред. В.Ю. Скибы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 588 с. – ISBN 978-5-7782-2410-0.
9. Архипов П.В., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Совершенствование оборудования под процессы комбинированной обработки // Вестник Таджикского технического университета. – 2013. – Т. 2, № 2. – С. 32–37.
10. Optimal organization of tools for machining composites / D.V. Lobanov, A.S. Yanyushkin, D.A. Rychkov, N.P. Petrov // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31. – N 2. – P. 156–157. – doi: 10.3103/S1068798X11020146.
11. Станочное оборудование, основанное на комплексировании нескольких технологических операций / В.Н. Пушкин, И.А. Ерохин, Д. Ю. Корнев, В.Ю. Скиба // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 245–255.
12. Контактные процессы при алмазной обработке инструментальных материалов / В.Ю. Попов, А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, В.Ю. Скиба // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 3 (23). – С. 68–74.

13. Скиба В.Ю. Актуальные проблемы в машиностроении: сборник материалов первой международной научно-практической конференции // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. – 2014. – № 11 (66). – С. 83.
14. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A. Automation tool preparation in the conditions of production // Applied mechanics and materials. – 2015. – Vol. 770. – P. 739–743.
15. Жэнь Ву. Разработка математических моделей, методов заточки и получение с помощью ЭВМ изображений многокромочных сверл // Конструирование и технология машиностроения. – 1984. – № 4. – С. 107–117.
16. Оборудование для заточки инструмента [Электронный ресурс]. – URL: http://www.stanki.ru/catalog/oborudovanie_dlya_zatochki_instrumenta/ (дата обращения: 22.03.2016).
17. Сверлозаточной станок BSM 20 [Электронный ресурс]. – URL: <http://kaindl-russia.ru/sverlozatochnoy-standok-bsm-20> (дата обращения: 22.03.2016).

MODERNIZATION OF THE 3B652 DRILL GRINDING MACHINE

Smagin G.I., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: dr.smagin@ngs.ru

Yakovlev N.D., Senior Lecturer, e-mail: n.yakovlev@ngs.ru

Burdukov S.D., Engineer, e-mail: sergej.burduckov@yandex.ru

Bulanov P.A., Master's Degree student, e-mail: bulanov1992@mail.ru

Kalugina N.V., Master's Degree student, e-mail: natas-kalugina@yandex.ru

Orlova I.A., Student

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The article represents the modernization variants of 3B652 drill grinding machine for opportunities to improve the accuracy of the clearance angle of sharpening drill tapered rear surfaces, as well as to simplify sharpening technology.

In addition, the modernization of 3B652 drill sharpening machine provides the ability to disconnect motion scenes for the oscillations of the quill spindle which allows to implement sharpening of multi edge drills by the cross slide of the machine.

Sharpening of multi edge drills is possible if the dressing spindle shaped grinding wheels are installed on the drill sharpening machine, according to the type of ruling devices used on universal grinding machines. Mounting these correcting devices requires the use of the mounting screw while drill adapter is attached to the plate by this screw to the cross slide. At the same time the case of drill adapter is removed from the machine during the setting of the shaped grinding wheel.

Dial gauge (0.001) is also provided on the modernized machine capacity to control movement of the cross slide for sharpening drills.

Keywords

grinding machine for drills, drill, cross table, sharpening drills on a conical surface

УДК 621.23.05

ПНЕВМАТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОКЛАДКИ КОММУНИКАЦИЙ

*В.П. ГИЛЕТА^{1,2}, доктор техн. наук, профессор
Ю.В. ВАНАГ¹, старший преподаватель
Ю.В. ТИЩЕНКО², канд.техн. наук,
ст. науч. сотр.,
П.М. ВЕДЕЛЬ¹, студент
С.В. РИДЕЛЬ¹, студент
(¹НГТУ, г. Новосибирск,
²ИГД СО РАН, г. Новосибирск)*

Гилета В.П. – 630092, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: pmx08@mail.ru

Пневматические машины ударного действия все шире используются при прокладке коммуникаций, особенно, в условиях плотной городской застройки. Экспериментально доказано, что для повышения скоростей прокладки необходимо дополнительное силовое воздействие, в горизонтальном направлении. Предлагается реализации такого воздействия с помощью лебедки с пневмоприводом, работающей от передвижного компрессора. Сформулированы требования к размерам, массе и условиям транспортировки разрабатываемой лебедки. Достоинством разрабатываемого оборудования является: простота обслуживания, пожаро- и взрывобезопасность, надежность работы в широком диапазоне температур, в условиях пыльной и влажной окружающей среды, высокое быстродействие.

Ключевые слова: пневматическая машина ударного действия, пневматический привод, виброударное продавливание, лебедка, напорное воздействие.

Введение

При точечной застройке в сложившейся части города строительные работы по замене существующих и прокладка новых коммуникаций, а также подключение объектов малоэтажного строительства к тепло-, электро- и водоснабжению осуществляются бестраншейными методами. Наиболее распространенными из них, является метод виброударного продавливания, реализуемый с помощью пневматических машин ударного действия (ПУМ).

Теория

При реализации метода виброударного продавливания – металлическая труба забивается открытым торцом в грунт (рис. 1 а) с последующим извлечением из нее грунтового керна (рис. 1 б) самодвижущимся грунтозаборным устройством, имеющим пневмоударный привод [1, 2]; также используется *комбинированный* метод (рис. 2), который может быть реализован с помощью бурильного устройства с пневмоударным приводом [3].

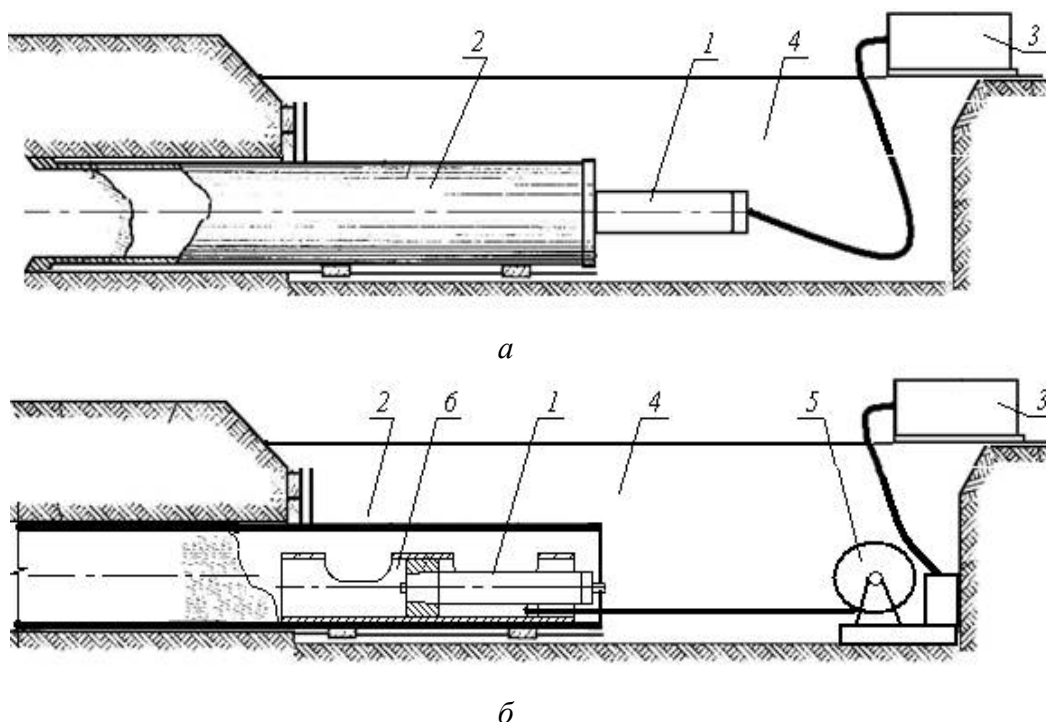


Рис. 1. Виброударное продавливание: а – забивка трубы, б – выемка грунтового керна; 1 – ПУМ, 2 – труба-кожух, 3 – компрессор, 4 – рабочий приямок, 5 – лебедка, 6 – грунтозаборное устройство.

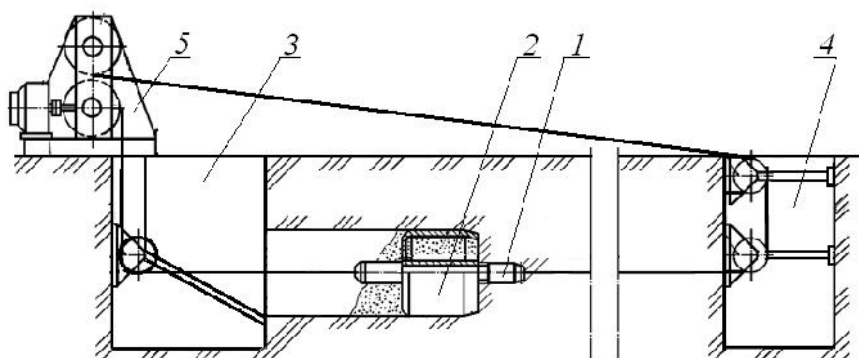


Рис. 2. Получение горизонтальных скважин: 1 – ПУМ, 2 – рабочий орган грунтозаборного устройства, 3, 4 – камеры соединяемых колодцев, 5 – лебедка

В указанных технологиях кроме пневматической машины используется и грунтозаборное устройство. Для повышения скоростей прокладки необходимо приложение дополнительного воздействия в горизонтальной плоскости [4], как на ПУМ, так и на грунтозаборное устройство (ГЗУ). Для этой цели подходит лебедка – с помощью которой, к ПУМ и ГЗУ прикладывается как напорное, так и извлекающее воздействие.

Применяемые в этих методах лебедки имеют чаще всего электрический привод, большие массу и размеры, что в условиях плотной городской застройки является недостатком, так как усложняет их транспортировку.

Таким образом, при реализации виброударных методов актуально использовать сжатый воздух в качестве энергоносителя не только машин, но и вспомогательного оборудования – лебедок.

Целью исследования является обоснование параметров тягового оборудования для приложения напорного и извлекающего воздействия в горизонтальном направлении при прокладке коммуникаций. Отличительной особенностью такого оборудования является возможность использования передвижного компрессора производительностью $4 \text{ м}^3/\text{мин}$, что обуславливает применение в сложившейся городской застройке.

Результаты и обсуждение

Для прокладки коммуникаций в сложившейся городской застройке в мастерских Института горного дела СО РАН изготовлена малогабаритная пневматическая машина ударного действия [5, 6] с размерами ($D \times L$) $0,073 \times 0,57 \text{ м}$ и массой $13,5 \text{ кг}$ (рис. 3 б). Основные характеристики машины: энергия ударов 30 Дж , частота ударов $22,3 \text{ с}^{-1}$ и расход сжатого воздуха $2,6 \text{ м}^3/\text{мин}$.

На базе этой машины в экспериментальных мастерских НГТУ изготовлено грунтозаборное устройство (рис. 3 а) с кернаприемником размерами ($D \times L$) $0,169 \times 0,85 \text{ м}$ (рис. 3 в) и массой $13,5 \text{ кг}$ [7].

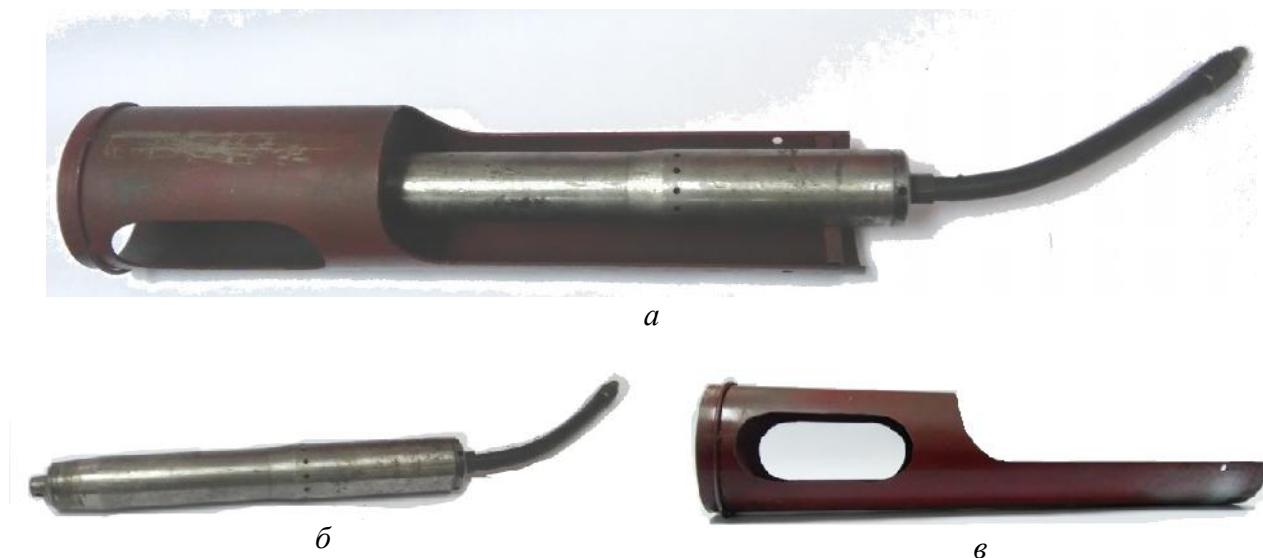


Рис. 3. Грунтозаборное устройство: а – общий вид, б – ПУМ; в – кернаприемник

Необходимо разработать лебедку с малыми массогабаритными размерами и пневматическим приводом. Для облегчения ее транспортировки и применения в стесненных условиях – из подвальных помещений и колодцев – предусмотреть сборную конструкцию лебедки для облегчения ее транспортировки и монтажа в месте производства работ.

В условиях конструктивных ограничений размеров такой лебедки, определяемых областью применения, ее достоинством, благодаря пневмоприводу является: 1) меньшие массогабаритные параметры, что облегчает иго транспортировку и обслуживание; 2) пожаро- и взрывобезопасность; 3) надежность работы в широком диапазоне температур, в условиях пыльной и влажной окружающей среды; 4) высокое быстродействие; 5) возможность передачи пневмоэнергии на относительно большие расстояния; 6) безопасность для обслуживающего персонала при соблюдении общих правил, исключающих механический травматизм.

Выводы

Одним из существенных факторов повышения производительности бестраншейной проходки скважин пневмоударными машинами является приложения горизонтального напорного воздействия на систему: «труба–грунт–грунтозаборное устройство». Для стесненных условий подземного строительства, когда применение грузоподъемных средств затруднено или невозможно, предложены технологии производства проходческих работ и сформулированы специфические требования к ударным машинным и оборудованию для реализации горизонтального напорного воздействия. В целях унификации энергоносителя машина и напорное оборудование должны работать от пневматического привода, приводимого в действие передвижным компрессором.

Список литературы

1. Рыбаков А.П. Основы бестраншейных технологий (теория и практика). – М.: Стройиздат, 2006. – 304 с.
2. Применение малогабаритного пневмоударного механизма / В.П. Гилета, Ю.В. Ванаг, Ю.В. Тищенко, П.М. Ведель, Н.С. Волков // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2 – С. 319–324.
3. Тищенко И.В., Смоляницкий Б.Н., Гилета В.П. Комбинированная проходка скважин в грунте ударным устройством с кольцевым инструментом // ФТПРПИ. – 2006. – № 6. – С. 87–97.
4. Резервы повышения производительности виброударного погружения в грунт стальных элементов в технологиях специальных строительных работ / Б.Н. Смоляницкий, И.В. Тищенко, В.В. Червов, В.П. Гилета, Ю.В. Ванаг // ФТПРПИ. – 2008. – № 5. – С. 72–80.
5. Патент 139290 Российская Федерация. Пневматическое устройство ударного действия / В.П. Гилета, И.В. Тищенко, Ю.В. Ванаг, Н.А. Чусовитин. – Оpubл. 10.04.2014, Бюл. № 10.
6. Гилета В.П., Тищенко И.В., Ванаг Ю.В. Экспериментальное исследование пневмоударного механизма с двумя управляемыми камерами // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – № 1 (107). – С. 18–23.
7. Экспериментальное исследование виброударного перемещения грунтозаборного устройства / В.П. Гилета, Ю.В. Ванаг, И.В. Тищенко, Н.А. Чусовитин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2014. – № 1, т. 2. – С. 82–88.

PNEUMATIC EQUIPMENT FOR LAYING OF COMMUNICATIONS

Gileta V.P.^{1,2}, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: pmx08@mail.ru

Vanag Y.V.¹, Senior lecturer, e-mail: yulia_vanag@mail.ru

Tischenko I.V.², Ph.D. (Engineering), Senior staff scientist,
e-mail: ighor.tishchienko.70@mail.ru

Vedel P.M.¹, Student, e-mail: naxeh2011@mail.ru

Ridel S.V.¹, Student, e-mail: serg.ridel@ya.ru

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the RAS, 54 Krasny ave., Novosibirsk, 630091, Russian Federation

Abstract

Pneumatic machines of vibropercussion action are more widely used for pipelaying, especially, in the conditions of dense city building. It is experimentally proved that increase of pipelaying speeds requires additional power influence in the horizontal direction. Realization of such influence by means of the winch with a pneumatic drive working from the mobile compressor is offered. Requirements to the sizes, weight and transportation conditions of the developed winch are formulated. The advantages of the developed equipment are: simplicity of service, fire and explosion safety, reliability of work in the wide range of temperatures, in the conditions of dusty and damp environment, high operation speed.

Keywords

pneumatic percussion mechanism, pneumatic drive, vibropercussion punching, winch, tractive effort

УДК 637.5'6.024

**МОЩНОСТЬ, ПОТРЕБЛЯЕМАЯ ВОЛЧКОМ, И ЕЁ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ПО МЕХАНИЗМАМ ВОЛЧКА**

*В.А. КЕРЖЕНЦЕВ, канд. техн. наук, доцент
Н.В. ПЕРОВА, ст. преподаватель
Н.С. ДРЕВЕЦКИЙ, студент
А.С. КОСИЛОВ, студент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Перова Н.В. - 630092, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: perova@corp.nstu.ru

Разработаны формулы для расчета параметров волчка (мясорубки) при переработке мясного сырья в фарш. Формулы взаимосвязаны и составляют единый расчетный процесс; расчеты по ним позволяют определить потребляемую волчком мощность в зависимости от основного типоразмера - диаметра ножевой решетки волчка. Рассчитаны числовые значения мощностей, затрачиваемые отдельными механизмами на: продвижение сырья шнеком, измельчение ножами, преодоление трения в режущем механизме. Определены коэффициенты, согласующие показатели мощности с такими факторами процесса, как силы резания, трения, размеры ножей и шнека, давление в продукте. Формулы, составляющие расчетный процесс, представлены в графическом виде как зависимости мощностей от диаметра ножевой решетки. Установлено, что расчётные значения мощностей механизмов равнозначны соответствующим значениям, представленным в виде графиков.

Ключевые слова: волчок, шнек, режущий механизм, производительность, мощность, частота вращения, графическая зависимость.

Введение

Расчет мощности волчков сложен и должен учитывать такие параметры, как производительность и диаметр ножевых решеток (основные характеристики). Методики расчета волчков даны в технической и методической литературе, например в [1 – 9]. Разработкой расчетных формул занимались многие авторы, научные труды которых вошли в различные пособия, например [10, 11]. Нередко эти вычисления касаются отдельных конструктивных или технологических параметров волчков. Так, например, мощность устройства в [10] рассчитывается по формулам мощности шнекового конвейера и здесь более правильным явился бы учёт режущей способности волчка, как это имеет место в [12, 13]. Некоторые расчетные методики излишне нагружены вспомогательными параметрами, например, такими, как учет степени деформированности мяса или определение времени истечения продукта из отверстия решетки [14]. Другие недостаточно полно учитывают факторы процесса измельчения, как например, в [15], где расчет мощности производится по удельному расходу электроэнергии. Немаловажно и число независимых переменных, входящих в формулы. Анализ источников показал, что наиболее приемлемой для дальнейших разработок является методика расчета, предложенная в [9]. Мощность волчков в ней рассчитывается для каждой отдельной операции, но без взаимосвязи между механизмами. Попытки представить операции, производимые волчком, как взаимосвязанные, приведены в работах [16-18]; в них рассмотрен вы-

сокопроизводительный волчок типа К6-ФВП, используемый в промышленности, и этот тип принят для исследований в данной статье (рис. 1).

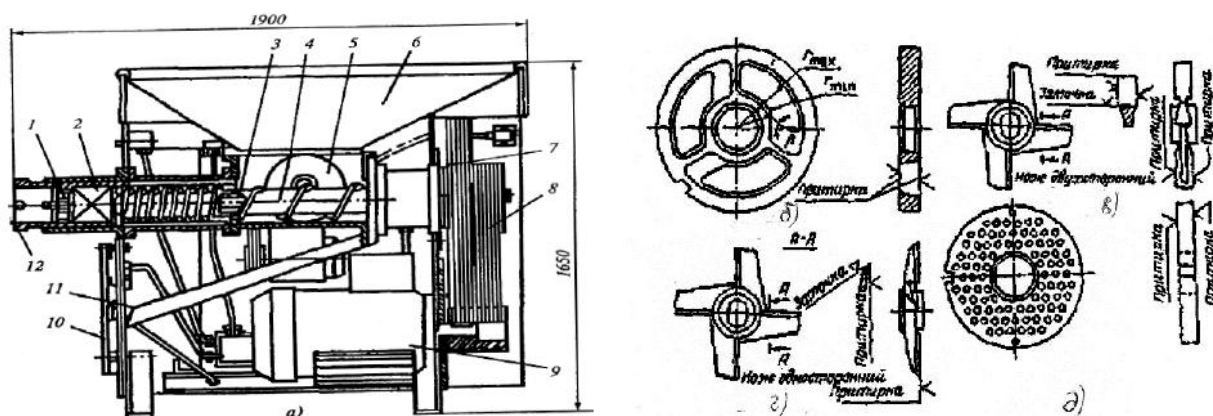


Рис. 1. Волчок К6-ФВП-160:

- а)-общий вид: 1 - подпорная решетка горловины, 2 - режущий механизм, 3 - ножевой вал, 4 - шнек питающего механизма, 5 - одновинтовая лопасть, 6 - питающий бункер, 7 - клиноремённый привод, 8 - клиноремённая передача ножевого вала, 9 - электродвигатель, 10 - площадка для емкости, 11 – желоб;
б) - подрезная решетка; в) - четырехперьевый двухсторонний нож; з) - односторонний нож;
д) - ножевая решетка

В волчке использован режущий механизм, содержащий одну подрезную, две ножевых решетки и два четырехперьевых двухсторонних ножа, а также питающий шнек 4 и одновинтовую лопасть 5. Волчок приводится в движение от электродвигателя мощностью 32,5 кВт, имеет согласно паспорту производительность 1,39 кг/с (5000 кг/ч) и диаметр решёток 0,160 м; он перерабатывает мясное сырьё плотностью $\rho = 1130 \text{ кг/м}^3$. Возникает задача определить, как распределяется мощность, подаваемая в волчок от привода, между отдельными механизмами волчка: между шнеком 4, продвигающим сырьё к ножам, режущим механизмом 2, измельчающим сырьё и механизмом подпорной решетки 1, регулирующем силу затяжки режущего механизма.

Цель работы – разработать согласованные уравнения, объединённые в расчетную систему, которая позволит рассчитывать мощности отдельных механизмов и определять влияние отдельных факторов на общую мощность волчка.

Теоретическое обоснование и вывод расчетных формул (теория)

Желательно подтверждать разработку формул (уравнений) числовыми расчетами. Для этого вводим исходные численные значения геометрических и кинематических параметров волчка из [16] и [17] (рис.1).

Исходные выражения и числовые данные

Согласно [9] общая мощность волчка суммируется из отдельных видов мощностей: мощности N_1 , затрачиваемой на резание продукта, мощности N_2 , затрачиваемой на преодоление трения в режущем механизме при определенной силе затяжки, мощности N_3 , затрачи-

ваемой на продвижение продукта шнеком. Определим также и мощность N_4 , требуемую для привода одновитковой лопасти. Используем данные из работы [16], это: скорость выхода v продукта из горловины и частота вращения вала n_p (индекс «р» - расчет ведётся по диаметру решетки D_p):

$$v = B_1 \frac{\Pi}{D_p^2} = 0,212 \text{ м/с}, \quad n_p = A_1 B_1 \frac{\Pi}{k_m D_p^3} = 1,70 \text{ с}^{-1}, \quad (1)$$

где $B_1 = \frac{4}{K_1 K_2 \pi \varphi \rho} = 0,0039 \text{ м}^3/\text{кг}$; $A_1 = \frac{2}{\pi \cdot \text{tg} \beta \cdot K_e (1 + k_d)} = 1,25$

и где $K_1 = 0,45$; $K_2 = 0,8$; – коэффициенты живых сечений решеток, $K_b = 0,8$ - коэффициент отставания продукта, продвигаемого шнеком ; $\varphi = 0,8$ – коэффициент заполнения пространства волчка продуктом, $\beta = 17,6$ град - угол подъема витков шнека, $k_m = 0,975$ - коэффициент соотношения наружного диаметра шнека и диаметра решетки D_p ; $k_d = 0,3$ – коэффициент соотношения между внутренним и наружным диаметрами шнека.

Разработка формул для расчёта мощностей

Сформируем аналитические выражения для указанных видов мощностей, приняв за основу факторы, указанные в [18, 19].

Мощность N_1 . Для волчка с подрезной решеткой, двумя ножами и двумя ножевыми решетками эта мощность выражается следующим образом, [9]:

$$N_1 = D_p^2 \frac{\pi}{4} (K_{np} + 2K_k + K_m) n_p a z, \quad (2)$$

где $K_{np} = 0,42$ – коэффициент использования площади подрезной решетки; $K_k = 0,45$ и $K_m = 0,36$ – коэффициенты использования площадей ножевых решеток соответственно с крупными и мелкими отверстиями; $a = 3500 \text{ Дж/м}^2$ – удельный расход энергии на перерезание волокон, $z = 8$ – количество перьев ножей (два четырёхперьевых ножа).

Подставим в (2) известные параметры, получим после преобразований:

$$N_1 = A_1 A_2 B_1 \frac{1}{k_m} \frac{\Pi}{D_p} = 2030 \text{ Вт}. \quad (3)$$

где A_2 , коэффициент, Дж/м^2 : $A_2 = \frac{\pi (K_{np} + 2K_k + K_m)}{4} a z = 1,194 \cdot 10^3$.

Мощность N_2 . Она рассчитывается по формуле:

$$N_2 = \pi n_p P_3 (r_{max} + r_{min}) f \psi, \quad (4)$$

где P_3 – усилие затяжки режущего механизма, равное:

$$P_3 = Pbz(r_{max} - r_{min}) = 1966 \text{ Н}, \quad (5)$$

и где $P = 3 \cdot 10^6$ Па – усредненное удельное давление в поверхности стыка ножей и решеток; $b = 0,003$ м – ширина площадки контакта лезвия ножа и решетки; $f = 0,15$ – коэффициент трения скольжения ножа о решетку в присутствии измельченного продукта; ψ – количество плоскостей резания ($\psi = 4$), r_{max} и r_{min} – максимальный и минимальный радиусы ножей (принимаем в первом приближении их равными: $r_{max} = r_n = 0,078$ м и $r_{min} = r_b = 0,0234$ м, где r_n и r_b – наружный и внутренний радиусы шнека).

Подставим выражение P_3 , формула (5), в формулу (4), получим для N_2 :

$$N_2 = \pi n_p f \psi Pbz (r_{max}^2 - r_{min}^2). \quad (6)$$

И, заменяя в формуле (6) параметр n_p на его выражение по формуле (1), будем иметь:

$$N_2 = A_1 A_3 B_1 k_m \frac{\Pi}{D_p} = 639 \text{ Вт}, \quad (7)$$

где A_3 – коэффициент, равный: $A_3 = \frac{\pi f \psi Pbz}{4} (1 - k_d^2) = 1,467 \cdot 10^4$, Н/м.

Мощность N_3 . Используем значения факторов, указанных для разработки шнековых устройств в [20], к расчету данной мощности по формулам [9]:

$$N_3 = \frac{2\pi^2}{3} n_p (r_n^3 - r_b^3) P_0 m K_{\beta} \operatorname{tg} \left(\frac{\beta_{cp} + \rho_m}{\cos \beta_{cp}} \right), \quad (8)$$

где $P_0 = 5 \cdot 10^5$ Па – давление за последним витком шнека; m – число витков шнека (принимаем $m = 7$); $\rho_t = 22$ град – угол трения продукта о шнек, $\beta_{cp} = 12$ град – средний угол подъема двух последних витков.

Подставим в формулу (8) вместо n_p её выражение по (1) получим:

$$N_3 = A_1 A_4 B_1 \Pi = 19590 \text{ Вт}, \quad (9)$$

где A_4 – коэффициент, равный:

$$A_4 = \frac{2\pi^2}{3 \cdot 8} P_0 m K_{\beta} \operatorname{tg} \frac{\beta_{cp} + \rho_m}{\cos \beta_{cp}} (1 - k_d^3) = 3,034 \cdot 10^6, \text{ Па}.$$

Мощность N_4 .

Одновитковая лопасть применяется не во всех типах волчков. Мощность, потребляемую лопастью в данном волчке, оценим приближённо. Пусть лопасть при продвижении сырья на шнек питающего механизма испытывает давление $P = 400$ кПа [9]. Тогда мощность на продвижение сырья от загрузочного отверстия составляет:

$$N_4 = P\Pi/\rho = 496 \text{ Вт}. \quad (10)$$

Сумма всех мощностей

Суммируя все мощности волчка К-ФВП-160, получаем значение мощности, необходимое для выбора электродвигателя, равное (при КПД привода $\eta = 0,85$) значению:

$$N_{\epsilon} = (N_1 + N_2 + N_3 + N_4) / \eta = 26676 \text{ Вт.} \tag{11}$$

Сравнивая эту мощность с паспортной, находим, что разность составляет $32,5 - 26,7 = 5,8$ кВт.

Результаты и обсуждение

Разработанные аналитические выражения мощностей можно представить следующей зависимостью, сложив их выражения, формулы (3), (7), (9) и (10):

$$N(\Pi, D_p) = (A_1 A_2 B_1 \frac{1}{k_m}) \frac{\Pi}{D_p} + (A_1 A_3 B_1 k_m) \frac{\Pi}{D_p} + (A_1 A_4 B_1 k_m^2) \Pi + (\frac{P}{\rho}) \Pi \tag{12}$$

Зависимость, выраженная формулой (12), представлена графически, рис.2. На нём кривая, характеризующая общую мощность волчка N_{ϵ} , является суммой кривых мощностей N_1, N_2, N_3 отдельных механизмов (мощность N_4 незначительна и поэтому не учтена). Графики показывают изменение этих мощностей в зависимости от диаметра D_p ножевой решетки.

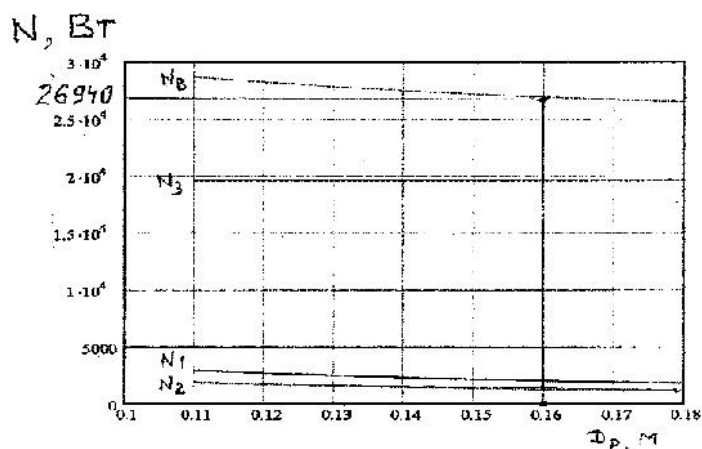


Рис. 2. Графики мощностей каждого механизма волчка в зависимости от диаметра решётки D_p

Коэффициенты $A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, k_m$ – входящие в формулы, содержат конструктивно-технологические факторы, связывающие формульные выражения в единый расчетный процесс. Эти коэффициенты так интерпретируют процесс в механизмах волчка: A_1 - безразмерная величина, согласующая частоты вращения шнека и ножей режущего механизма, A_2 - выражает работу по измельчению продукта, A_3 – характеризует жесткость конструкции режущего механизма скрепленного подпорной решеткой, A_4 - соответствует давлению, производимому шнековым механизмом на режущий механизм, B_1 - характеризует величину, обратную плотности фарша, разрыхленного при работе волчка ножевыми решетками, k_m – коэффициент геометрической связи между диаметром ножевой решетки и размерами шнека. В формулах можно при дальнейших исследованиях выделить факторы (например, K_1 и K_2, r_n и r_b, k_m и k_d и другие), чтобы уточнить их влияние на мощность, потребляемую волчком.

Вывод

Получены взаимосвязанные аналитические выражения мощностей механизмов волчка в зависимости от производительности, диаметра решетки и частоты вращения вала. По ним можно анализировать величины мощностей отдельных операций, производимых волчком, и определять вклад каждой из них в общую мощность. По разработанным зависимостям построены графики, по которым можно наглядно определить значения мощностей и выбрать соответствующий типоразмер волчка. Одновременно можно выбрать электродвигатель по мощности процесса и рассчитать передаточное отношение привода.

В результате исследования определено, что расчетная мощность волчка меньше паспортной. Для более точного определения мощности желательно уточнить значения коэффициентов A_1, A_2, A_3, A_4, B_1 и факторов, их образующих.

Список литературы

1. Машины и аппараты пищевых производств. В 3 кн. Кн 2: учебник для вузов / С.Т. Антипов, И.Т. Кретов, А.Н.Остриков и др.; под ред. В.А. Панфилова. – М.: Высшая школа, 2008. – 680 с.
2. Актуальные проблемы в машиностроении / под ред. В.Ю. Скибы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 588 с. – ISBN 978-5-7782-2410-0.
3. *Afanasev Yu.A., Perova N.V.* Tasks of kinematic investigation of spatial cam mechanisms // KORUS-99. The 3rd Russian-Korean international symposium on Science and Technology, abstracts. – 1999. – С. 367.
4. *Архипов П.В., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С.* Совершенствование оборудования под процессы комбинированной обработки // Вестник Таджикского технического университета. – 2013. – Т. 2, № 2. – С. 32–37.
5. Определение основных параметров технологического оборудования / Ю.И. Подгорный, Т.Г. Мартынова, В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, Н.В. Вахрушев, Д.Ю. Корнев, Е.К. Зайцев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 3 (60). – С. 68–73.
6. Actual problems and decisions in machine building / ed. by V.Yu. Skeebea. – Pfaffikon: Trans Tech Publ., 2015. – 344 p. – (Applied mechanics and materials; vol. 788). – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788. – ISBN 978-3-03835-551-9.
7. *Скиба В.Ю.* Актуальные проблемы в машиностроении: сборник материалов первой международной научно-практической конференции // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. – 2014. – № 11 (66). – С. 83.
8. Надежность прогноза качества технологического оборудования / С.В. Птицын, В.Ю. Скиба, Ю.С. Чёсов, Е.В. Мережко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 2. – С. 33–38.
9. Механическое оборудование предприятий общественного питания / В.Д. Елхина, А.А. Журин, Л.П. Проничкина, М.К. Богачев. – М.: Экономика, 1981. – 319 с.
10. *Ивашов В.И.* Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности. В 2 ч. Ч. 2. Оборудование для переработки мяса. – М.: КолосС, 2001. – 552 с.
11. Расчет и конструирование торгово-технологического оборудования / Л.И. Гордон и др.; под общ. ред. В.Н. Шувалова и др. – Л.: Машиностроение, 1985. – 335 с.
12. *Ситников Е.Д.* Практикум по технологическому оборудованию консервного и пищевого концентратного производств: учебное пособие. – 3-е изд. – СПб.: ГИОРД, 2004. – 401 с.
13. *Даурский А.Н., Мачихин Ю.А.* Резанье пищевых материалов: теория процесса,

машины, интенсификация. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 240 с.

14. Оборудование предприятий мясной промышленности: лабораторный практикум для УИРС / В.И. Ивашов и др. – М.: МТИПП, 1987 – 79 с.

15. Технологические расчеты в дипломном и курсовом проектировании: учебное пособие / Р.Э. Хабибуллин, И.Ф. Кабиров и др.; Казанский государственный технологический университет. – Казань, 2004. – 76 с.

16. *Керженцев В.А., Перова Н.В., Кузнецов А.С.* Выявление зависимости между производительностью волчков и частотой вращения вала по диаметру решетки // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 313–318.

17. *Керженцев В.А.* Аналитическое исследование волчков, перерабатывающих мясное сырье // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2007. – № 6. – С. 92–97.

18. *Керженцев В.А., Курсеитов С.И., Курсеитова Э.С.* Исследование волчков с учетом мощности, необходимой для переработки мясного сырья // Рыбное хозяйство Украины. – 2008. – № 6 (59). – С. 75–78.

19. *Керженцев В.А.* Технологическое оборудование пищевых производств. Ч. 1. Механическое оборудование: конспект лекций. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 140 с.

20. *Керженцев В.А., Перова Н. В.* Повышение точности расчетов шнековых конвейеров путем переопределения независимой переменной (аргумента) // Научный вестник НГТУ. – 2015. – № 4 (61). – С. 48–62. – doi: 10.17212/1814-1196-2015-4-48-62.

POWER OF THE MEAT GRINDER, AND ITS DISTRIBUTION ON CUTTING MECHANISMS

Kerzhencev V. A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kerjencev46@ngs.ru

Perova N. V., Senior Lecturer, e-mail: perova@corp.nstu.ru

Drevetsky N.S., Student, e-mail: yorwy@yandex.com

Kosilov A.S., Student, e-mail: kosilov_sanya@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The authors developed the formulas for calculating the parameters of the meat grinder in the processing of raw meat in the stuffing. Formulas interlinked and constitute a single settlement process, calculations it possible to determine power consumption gyroscope depending on the size of the main lattice cutter diameter grinder. Calculated numerical values of power consumed by individual arrangements to: promotion materials screw, grinding knives, overcoming friction in the cutting mechanism. The authors identified coefficients matching power values of the process with such factors as the cutting force, friction, and auger blades sizes, the pressure in the product. Formulas that make the settlement process, presented graphically as a capacity depending on the diameter of the blade array. The calculated values are equal to the corresponding values of mechanisms power given to graphic dependence.

Keywords

meat grinder, screw, cutting mechanism, performance, power, frequency rotation, graphic dependence

УДК 637.5'6.024

**РАЗРАБОТКА В ТАБЛИЧНОЙ ФОРМЕ РАСЧЕТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
И РАСЧЕТ МЕХАНИЗМОВ ВОЛЧКА**

*В.А. КЕРЖЕНЦЕВ, канд. техн. наук, доцент
Н.В. ПЕРОВА, ст. преподаватель
А.Н. БРЕДИХИНА, студент
Н.С. ПЕЧОРКИНА, студент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Перова Н.В. - 630092, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: perova@corp.nstu.ru

Разработана табличная форма расчета волчка с учетом факторов, участвующих в измельчении мясного фарша. В таблицах приведены расчетные формулы и числовые результаты для отдельных механизмов волчка, составляющих его структуру. Представление расчетных материалов в табличной форме позволило на понятийном аппарате установить связи, как между самими механизмами, так и выражения этих связей, отражающих конструктивные и технологические параметры волчка. Связи раскрыты через коэффициенты, обуславливающие непрерывность потока продукта, продвигаемого шнеком через режущий механизм и ножевые решетки. Коэффициенты имеют размерности, соответствующие определенным функциям механизмов. Показано согласование параметров в расчете технологической мощности волчка в зависимости от производительности и диаметра ножевой решетки.

Ключевые слова: волчок, производительность, мощность, шнек, режущий механизм, скорость, частота вращения, математические выражения, графическая зависимость.

Введение

Расчет волчков (мясорубок) представляет сложную задачу; она состоит из вычислений частных конструктивных и технологических параметров отдельных механизмов, и общих параметров, таких как производительность и диаметр ножевых решеток (основные характеристики, относящиеся ко всей структуре волчка). Среди частных параметров представлены такие, как диаметры отверстий в решетках, их количество, скорость выхода продукта, частота вращения ножей и шнека; а сами параметры включают в себя и факторы, характеризующие силы резанья, трения и другие. Имеющиеся в технической литературе источники не достаточно полно раскрывают согласование указанных параметров друг с другом. иную систему. Методики расчетов мясорубок и волчков приведены в технической и учебной литературе, например в [1 - 9]. Расчетами занимались многие авторы, например [10 - 13], Эти расчеты касаются как отдельных конструктивных параметров волчков, так и технологических, например, частот вращения ножей, давления в продукте [14]. Рассматриваемые в литературе параметры не всегда согласованы друг с другом и расчет одних не скорректирован с результатами расчета других. Желательно факторы, участвующие в расчетах, сгруппировать по отдельным механизмам, а параметры увязать друг с другом в общей структуре волчка. Такой подход предложен в работе [15]. В ней приведен расчет высокопроизводительного волчка по взаимосогласованным формулам, и показано, что

конструкцию волчка можно упростить, применив один приводной вал вместо двух. Это стало возможным при введении в формульные выражения условия равенства скорости выхода продукта и скорости продвижения его шнеком. Желательно было бы применить данное условие к другим параметрам волчка, например, к расчету мощности, потребляемой им, при этом учесть факторы, выявленные в работах [16 – 19].

Цель работы: рассмотреть частные формульные зависимости, относящиеся к отдельным механизмам волчка, ввести соответствующие коэффициенты, обеспечивающие согласованность между параметрами; провести численный расчет волчка в табличной форме.

Теоретическое обоснование и табличная форма представления расчетов волчка

Поставленная цель может быть реализована расчетными формулами в виде таблиц, представляющих в совокупности процесс численного расчета параметров. Таблицы в простой форме раскрывают понятийный аппарат, объясняющий связанность формульных зависимостей между факторами и параметрами для отдельных механизмов волчка. Весь расчетный процесс заканчивается расчетом мощности волчка, объединяющим отдельные процессы конечным результатом. Объединение процессов в расчетные формулы осуществлено при условии равенства скоростей движения продукта, продвигаемого шнеком через режущий механизм и ножевые решетки (механизмы волчка) к выходному отверстию горловины.

Табличная форма представления расчетного процесса

Ниже приведены таблицы 1, 2, 3, 4, раскрывающие суть процесса расчета. Числовой расчет проведен для малопроизводительного волчка (типа К6-ФВП производительностью $P=3000$ кг/ч и мощностью электродвигателя $N_{эд} = 12,5$ кВт (по аналогии).

Таблица № 1 предназначена для выбора и принятия исходных данных по заданной производительности волчка, [16]. Эта таблица позволяет изменять первоначальные данные для всего последующего цикла расчета.

Таблица № 2 предназначена для расчета параметров решетки, [18]. Значения таблицы определяют площадь проходного сечения горловины (решетки) и совместно со скоростью продвижения продукта характеризуют производительность и диаметр решетки.

Таблица № 3 предназначена для вычисления размеров шнека, [16]. Размеры шнека согласованы с диаметром решетки через коэффициент k_m .

Таблица №4 предназначена для расчета мощности, требующейся отдельным механизмам и волчку в целом, [17]. В таблице представлены расчеты коэффициентов, связывающие факторы и параметры процесса с отдельными механизмами. Коэффициенты приобретают размерности (в системе единиц СИ), соответствующие производимой механизмом операции.

Таблица 1

Таблица исходных данных волчка

№	Параметр	Характеристика параметра, фактора
1	$\Pi = 0,833 \text{ кг/с}$	- производительность продукта (3000 кг/ч)
2	$V = 0,2 \text{ м/с}$	- скорость конечного продукта
3	$\rho = 1130 \text{ кг/м}^3$	- плотность фарша
4	$K_1 = 0,4$	- коэффициент живого сечения решетки для отверстия с малым диаметром, ($K_1 = 0,35 \dots 0,45$)
5	$K_2 = 0,75$	- коэффициент живого сечения решетки для отверстия с большим диаметром, ($K_2 = 0,7 \dots 0,8$)
6	$K_{np} = 0,42$	- коэффициент использования площади подрезной решетки
7	$f = 0,1$	- коэффициент трения скольжения ножа о решетку в присутствии измельченного продукта
8	$\psi = 4$	- количество плоскостей резания
9	$P = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$	- усредненное давление в поверхности стыка ножей и решеток, ($P = (2 \dots 3) \cdot 10^6 \text{ Па}$)
10	$\rho_T = 22^\circ$	- угол трения продукта о шнек
11	$\beta_{cp} = 12^\circ$	- средний угол подъема двух последних витков шнека
12	$\beta = 7 \dots 11^\circ$	Угол подъема последнего витка шнека $\beta = 11 \text{ град}$
13	$k_m = 0,975$	- коэффициент, характеризующий соотношение размеров между наружным диаметром шнека и диаметром ножевой решетки
14	$P_o = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$	- давление за последним витком шнека, ($P = (3 \dots 5) \cdot 10^5 \text{ Па}$)
15	$k_d = 0,3$ $k_h = 0,43$	- коэффициенты, характеризующие соотношение размеров между внутренним диаметром шнека и наружным диаметром шнека
16	$K_B = 0,6$	- коэффициент отставания продукта относительно витков шнека, ($K_B = 0,35 \dots 0,8$)
17	$K_{pm} = 0,36$	- коэффициент использования площади ножевых решеток с мелкими отверстиями
18	$K_{pk} = 0,45$	- коэффициент использования площади ножевых решеток с крупными отверстиями
19	$a = 3 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}$	- удельный расход энергии на перерезание продукта, [$a = (2,5 \dots 3,5) \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^2$]
20	$z = 4$	- количество перьев одного ножа
21	$b = 0,002 \text{ м}$	- ширина площадки контакта лезвия ножа и решетки,
22	$m = 4$	- количество витков шнека ($m = 3 \dots 8$)
23	$\eta = 0,9$	Общее КПД привода мясорубки

Таблица 2

Расчетные формулы и результаты расчета ножевых решеток

№	Параметр	Расчетная формула	Значение
1	B_1 - коэффициент, характеризующий удельный объем продукта, м ³ /кг	$B_1 = \frac{4}{\kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot \pi \cdot \varphi \cdot \rho}$	0,00469
2	D_p - диаметр ножевой решетки, м	$D_p = \sqrt{B_1 \cdot \frac{\Pi}{V}}$	0,1398
3	D_p - принимаем из ряда, м:	0,80; 0,105; 0,114; 0,120;	0,140
4	z_5 - количество отверстий в решетке с диаметром 5 мм	$z_5 = \kappa_1 \left(\frac{D_p}{d_5} \right)^2$	313
5	z_3 - количество отверстий в решетке с диаметром 3 мм	$z_3 = \kappa_1 \cdot z_5 \left(\frac{d_5}{d_3} \right)^2$	653
6	Площадь ножевой решетки	$F_p = \frac{\pi D_p^2}{4}$	0,0154
7	$F_{ж5}$ - живое сечение для 1-ой ножевой решетки с диаметром 5мм	$F_{ж5} = \kappa_1 \left(\pi \frac{D_p^2}{4} \right)$	0,0062
8	$F_{ж3}$ - живое сечение для 2-ой ножевой решетки с диаметром 3 мм	$F_{ж3} = \kappa_1 \kappa_2 \left(\pi \frac{D_p^2}{4} \right)$	0,0046
9	$K_{н1}$ - коэффициент живого сечения для 1-ой ножевой решетки,	$K_{н1} = \frac{F_{ж5}}{F_p}$	0,509
10	$K_{н2}$ - коэффициент живого сечения для 2-ой ножевой решетки,	$K_{н2} = \frac{F_{ж3}}{F_p}$	0,382

Таблица 3

Расчетные формулы и расчет размеров шнека

№	Параметр	Расчетная формула	Значение
1	$D_{ш}$ - наружный диаметр шнека, м.	$D_{ш} = \kappa_m \cdot D_p$	0,137
2	r_n - наружный радиус шнека, м	$r_n = 0,5D_{ш}$	0,068
3	$d_{ш}$ - внутренний диаметр шнека, м	$d_{ш} = \kappa_d \cdot D_{ш}$	0,0409
4	r_B - внутренний радиус шнека, м	$r_B = 0,5d_{ш}$	0,021
5	r_{max} - максимальный радиус перьев ножей, м	$r_{max} = \frac{D_{ш}}{2}$	0,068
6	r_{min} - минимальный радиус перьев ножей, м	$r_{min} = \kappa_d \cdot \frac{D_{ш}}{2}$	0,021
7	$d_{срш}$ - средний диаметр шнека, м	$d_{срш} = \frac{D_{ш}}{2} \kappa_m (1 + \kappa_d)$	0,0887
8	P_3 – усилие затяжки режущего механизма, Н	$P_3 = P_{bz}(r_{max} - r_{min})$	955,5

Таблица 4

Расчетные формулы и расчет мощности

№	Параметр	Расчетная формула	Значение
1	A_1 - безразмерный коэффициент, согласующий частоты вращения ножей и шнека, обеспечивающий непрерывность потока продукта	$A_1 = \frac{2}{\pi \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot K_B (1 + K_d)}$	3,876
2	A_2 – коэффициент, характеризующий работу измельчения в расчете на 1 м ² поверхности, Дж/м ²	$A_2 = \frac{\pi a z}{4} (K_{np} + 2K_{pk} + K_{pm})$	15830
3	n_p - частота вращения шнека, согласованная с частотой вращения ножей, выраженная через диаметр решетки, с ⁻¹	$n_p = A_1 B_1 \frac{\Pi}{k_m \cdot D_p^3}$	5,668
4	N_{1P} - мощность, затрачиваемая на резанье продукта режущим механизмом, Вт	$N_{1P} = A_2 \cdot D_p^2 \cdot n_p$	1759
5	A_3 - коэффициент, характеризующий жесткость соединения ножей и ножевых решеток, при скреплении их подпорной решеткой, Н/м	$A_3 = \frac{\pi \cdot f \cdot \psi \cdot P \cdot b \cdot z}{4} (1 - k_d^2)$	5435
6	N_{2P} - мощность, затрачиваемая на преодоление трения между решетками и ножами в при определенной силе затяжки режущего механизма, Вт	$N_{2P} = A_1 \cdot A_3 \cdot B_1 \cdot K_M \frac{\Pi}{D_p}$	574
7	A_4 - коэффициент, характеризующий давление в продукте, создаваемое шнеком, продвигающего продукт к режущему механизму, Па	$A_4 = \frac{2\pi^2}{3 \cdot 8} P_0 \cdot m \cdot K_e \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta_{cp} + \rho_T}{\cos \beta_{cp}} (1 - K_d^3)$	$6,23 \cdot 10^5$
8	N_{3P} - мощность, затрачиваемая на продвижение продукта шнеком, Вт	$N_{3P} = A_4 \cdot K_m^3 \cdot n \cdot D_p^3$	9208
9	$N_{общ}$ - общая мощность волчка, Вт	$N_{общ} = \frac{N_{1P} + N_{2P} + N_{3P}}{\eta}$	12820

Результаты и обсуждение

Приведённые выше расчетные формулы (табл. № 1, 2, 3, 4) применены для высокопроизводительных волчков, используемых в промышленных масштабах (пищевых производствах). Данные формульные выражения позволили рассчитать параметры в зависимости от заданной производительности и диаметров ножевых решеток. Таким образом, можно будет для заданной производительности определить параметры волчка; и они будут согласованы с производительностью и с величинами диаметров ножевой решетки, а также с внутренними размерами шнекового устройства.

Выводы

Приведенные в таблицах формульные зависимости, представленные в виде коэффициентов, способствуют расширению понятийного аппарата, а также позволяют рассчитать более простым способом значения параметров. По размерностям, представленных при коэффициентах, наглядно показывают связи, существующие между математическими выражениями и конструктивным оформлением (структурной формой) механизмов волчка: шнековым, режущим и механизмом затяжки ножей.

Список литературы

1. Машины и аппараты пищевых производств. В 3 кн. Кн 2: учебник для вузов / С.Т. Антипов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков и др.; под ред. В.А. Панфилова. – М.: Высшая школа, 2008. – 680 с.
2. *Afanasev Yu.A., Perova N.V.* Tasks of kinematic investigation of spatial cam mechanisms // KORUS-99. The 3rd Russian-Korean international symposium on Science and Technology, abstracts. – 1999. – С. 367.
3. Актуальные проблемы в машиностроении / под ред. В.Ю. Скибы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 588 с. – ISBN 978-5-7782-2410-0.
4. Определение основных параметров технологического оборудования / Ю.И. Подгорный, Т.Г. Мартынова, В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, Н.В. Вахрушев, Д.Ю. Корнев, Е.К. Зайцев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 3 (60). – С. 68–73.
5. *Архипов П.В., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С.* Совершенствование оборудования под процессы комбинированной обработки // Вестник Таджикского технического университета. – 2013. – Т. 2, № 2. – С. 32–37.
6. Надежность прогноза качества технологического оборудования / С.В. Птицын, В.Ю. Скиба, Ю.С. Чёсов, Е.В. Мережко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 2. – С. 33–38.
7. Actual problems and decisions in machine building / ed. by V.Yu. Skeebea. – Pfaffikon: Trans Tech Publ., 2015. – 344 p. – (Applied mechanics and materials; vol. 788). – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788. – ISBN 978-3-03835-551-9.
8. *Скиба В.Ю.* Актуальные проблемы в машиностроении: сборник материалов первой международной научно-практической конференции // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. – 2014. – № 11 (66). – С. 83.
9. Механическое оборудование предприятий общественного питания / В.Д. Елхина, А.А. Журин, Л.П. Проникина, М.К. Богачев. – М.: Экономика, 1981. – 319 с.
10. Расчет и конструирование торгово-технологического оборудования / Л.И. Гордон и др.; под общ. ред. В.Н. Шувалова и др. – Л.: Машиностроение, 1985. – 335 с.
11. *Ситников Е.Д.* Практикум по технологическому оборудованию консервного и пищевых концентратных производств: учебное пособие. – 3-е изд. – СПб.: ГИОРД, 2004. – 401 с.

12. Даурский А.Н., Мачихин Ю.А. Резанье пищевых материалов: теория процесса, машины, интенсификация. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 240 с.
13. Оборудование предприятий мясной промышленности: лабораторный практикум для УИРС: учебное пособие / В.И. Ивашов и др. – М.: МТИПП, 1987. – 79 с.
14. Технологические расчеты в дипломном и курсовом проектировании: учебное пособие / Р.Э. Хабибуллин, И.Ф. Кабиров и др.; Казанский государственный технологический университет. – Казань, 2004. – 76 с.
15. Керженцев В.А., Перова Н.В., Кузнецов А.С. Выявление зависимости между производительностью волчков и частотой вращения вала по диаметру решетки // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 313–318.
16. Керженцев В.А. Аналитическое исследование волчков, перерабатывающих мясное сырьё // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2007. – № 6. – С. 92–97.
17. Керженцев В.А., Курсеитов С.И., Курсеитова Э.С. Исследование волчков с учетом мощности, необходимой для переработки мясного сырья // Рыбное хозяйство Украины. – 2008. – № 6 (59). – С. 75–78.
18. Керженцев В.А. Технологическое оборудование пищевых производств. Ч. 1. Механическое оборудование: конспект лекций. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 140 с.
19. Керженцев В.А., Перова Н.В. Повышение точности расчетов шнековых конвейеров путем переопределения независимой переменной (аргумента) // Научный вестник НГТУ. – 2015. – № 4 (61). – С. 48–62. – doi: 10.17212/1814-1196-2015-4-48-62.

DEVELOPMENT IN TABULAR FORM THE CALCULATION OF MECHANISMS MEAT GRINDER

Kerzhencev V. A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kerjencev46@ngs.ru

Perova N. V., Senior Lecturer, e-mail: perova@corp.nstu.ru

Bredikhina A. N., Student, e-mail: nyara.bredihina@yandex.ru

Pechorkina N. S., Student, e-mail: pechorkina94@yandex.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The authors developed tabular form based on the calculation of the factors involved in grinding meat minced. The tables show the formulas and numerical results for the individual mechanisms of meat grinder that make up its structure. Presentation of computational materials in tabular form allowed on the conceptual apparatus to establish communication, both between the mechanisms and expression of these relations, reflecting the structural and technological parameters of the meat grinder. The authors disclosed the links in terms of coefficients, product stream causing continuity, promoted by the screw through the cutting mechanism and knife hole plate. Coefficients have dimensions that correspond to certain functions mechanisms. Displaying addiction parameters in the technological power calculation of the meat grinder, depending on performance and the diameter of the knife hole plate.

Keywords

meat grinder, performance, power, screw, cutting mechanism, speed, rotation speed, mathematical calculation, graphic dependence

УДК 621.041 (045)

**ПРОБЛЕМЫ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
РУЧНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

В.В. РЫЖИКОВ¹, канд. техн. наук, доцент
Т.С. МКРТЧЯН¹, студентка
А.К. КИРЕЕВА¹, студентка
Е.А. ИГНАТОВА², нач. бюро ОТМ
(¹ БТИ АлтГТУ, г. Бийск,
² ОАО «БПО» «Сибприбормаш», г. Бийск)

Рыжиков В.В. - 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27,
Бийский технологический институт
(филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова,
e-mail: mrsi@bti.secna.ru

В статье рассматриваются вопросы: 1) создания комбинированного (сверление, шлифование, резка материала) инструмента оснащенного современным электроприводом; 2) конструкция станка для затачивания мелкоразмерного инструмента из инструментальных сталей, и твердого сплава.

Ключевые слова: финишная обработка, абразивный материал, алмазный инструмент, сверление, шлифование, ручной инструмент.

Введение

В современном машиностроении при изготовлении штампов, матриц, оригинальных изделий и специальной технологической оснастки из инструментальной стали, твердого сплава и керамики широко применяются отделочные операции. Операции шлифование, полирование, притирка плоских и более сложных криволинейных форм ведутся, в подавляющем большинстве случаев, с применением ручных инструментов. Вместе с тем актуальны проблемы затачивание мелкоразмерного (0,1-2,5мм) инструмента.

Описание технического решения

Известны технические решения [1 - 5], которые можно эффективно применить для финишной обработки.

Анализ охранных документов, полезных моделей, патентов и промышленных образцов показал, что по области применения их можно разделить на сверлильные машины, шлифовальные и угловые машины. Однако в настоящее время нет эффективных разработок комбинированных машин с электроприводом, выполняющих несколько операций.

Предлагаемое техническое решение это результат разработки и создания комбинированной ручной сверлильной – отрезной - шлифовальной машины, совмещающей в себе сразу три класса вышеперечисленных машин.

Предлагаемая полезная модель - комбинированная ручная сверлильная – отрезная - шлифовальная машина состоит из трех устройств присоединяемых к шпинделю угловой машины. Устройство для сверления (рис. 1); устройство для фрезерования и зачистки (рис. 2); устройство для шлифования и полирования (рис. 3).

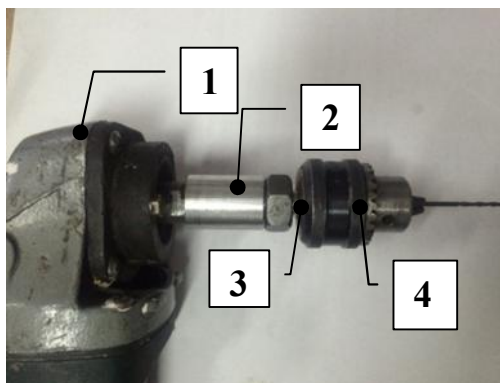


Рис. 1. Полезная модель в положении сверления.
1-корпус, 2-сверлильная насадка, 3-гайка для съема, 4-сверлильный патрон



Рис. 2. Конструкция полезной модели для резки.
1-корпус, 2-защитный кожух, 3-фланцы, 4- абразивный инструмент

На рис. 3 представлена комбинированная ручная сверлильная – отрезная - шлифовальная машина в рабочем положении шлифования и полирования. Для этой цели на вал насадку закрепляем специальную шлифовальную оправку с инструментом в виде шлифовального или полировальных кругов, тем самым машина обеспечивает возможность шлифования и полирования различных поверхностей из различных материалов.

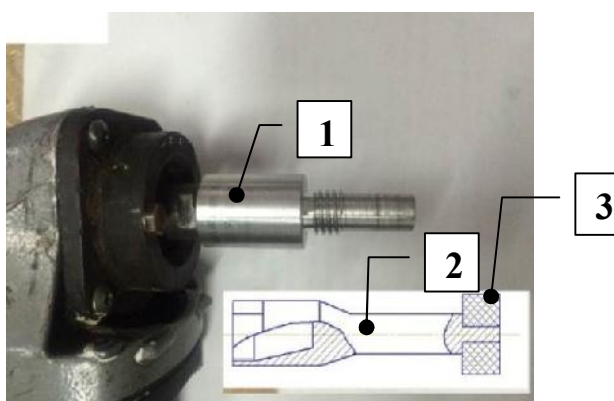


Рис. 3. Конструкция полезной модели в положении шлифования:
1-сверлильная насадка, 2-шлифовальная оправка, 3-шлифовальный или полировальный круг

Комбинированная ручная сверлильная – отрезная - шлифовальная машина работает следующим образом. В режиме резки (рис.2); устанавливаем ограждение 1, фланцы 2, отрезной круг 3 и специальную рукоятку и выполняем фрезерование и зачистку.

Для сверления отверстий (рис.1); демонтируем отрезной круг и ограждение, устанавливаем сверлильную насадку 2, закрепляем ее ключом, закрепляем сверло в патрон 4 и выполняем сверление.

Для шлифования поверхностей (рис.3); с помощью гайки снимаем сверлильный патрон, устанавливаем и закрепляем ключом специальную шлифовальную оправку 2, с полировальным или шлифовальным инструментом 3 и выполняем шлифование и полирование.

По результатам проведенной на кафедре МРСИИ конструкторской работы на базе отрезной машины, создана комбинированная ручная сверлильная – отрезная - шлифовальная машина, совмещающая три машины.

Результаты проведенных патентных исследований и проектных проработок оформлены в виде заявки на полезную модель и отправлены в ФИПС.

Для затачивания мелкогабаритного инструмента предлагается техническое решение, которое относится к области машиностроения и предназначено для заточки мелкогабаритного инструмента диаметром менее 2.5 мм, как из инструментальной, быстрорежущей стали, так и из твердого сплава.

Известен сверлозаточный станок [6], для сверл диаметром от 2 до 20 мм. Этот станок имеет самоцентрирующую призматическую систему крепления, что позволяет быстро и точно закрепить любой затачиваемый инструмент с диаметром хвостовика от 2 до 21 мм. Симметричная заточка обеспечивается поворотной прецизионной зажимной призмой. Недостатки станка: невозможность заточки сверл диаметром меньше 2 мм, применение обычного электродвигателя.

Так же известен станок для заточки сверл [7], содержащий бабку изделия, состоящую из корпуса, несущего шпиндель и кулачковые механизмы затылования, осцилляции и подачи. Недостаток станка состоит в сложности его конструкции. Невозможность заточки сверл диаметром меньше 2 мм, применение обычного электродвигателя.

Предлагаемая полезная модель дает возможность обработки мелкогабаритного инструмента диаметром (0,1-2,5мм), с использованием специального двигателя с внешним ротором, момент инерции которого выше, чем у обычного двигателя. Применяется специальная державка, увеличивающий экран, и калибр для визуального расширения зоны резания.

Результатом технического решения является:

- 1) использование специального электродвигателя с внешним ротором.
- 2) применение специального фланца, где закреплены алмазный и абразивный круги, при этом алмазный круг установлен постоянно в соответствии с рекомендациями по эксплуатации алмазного инструмента, а в качестве второго (сменного) инструмента применяется обычный абразивный круг;
- 3) использование специальной державки, которая предназначена для быстрого и точного закрепления мелкогабаритного инструмента диаметром от 0,1 мм до 2 мм и удобства манипулирования инструментом;
- 4) использование увеличивающего экрана с целью визуального увеличения зоны резания на поверхности экрана наносится штриховой калибр, для контроля инструмента во время затачивания.

Предлагаемая конструкция настольного заточного станка рис. 4 содержит основание 1, на котором установлен специальный электродвигатель 2. Фланец 3 закреплен штифтом 4, шпильками 5 и 6. На фланце закреплены два абразивных инструмента 7 (несъемный) и 8 (съемный).

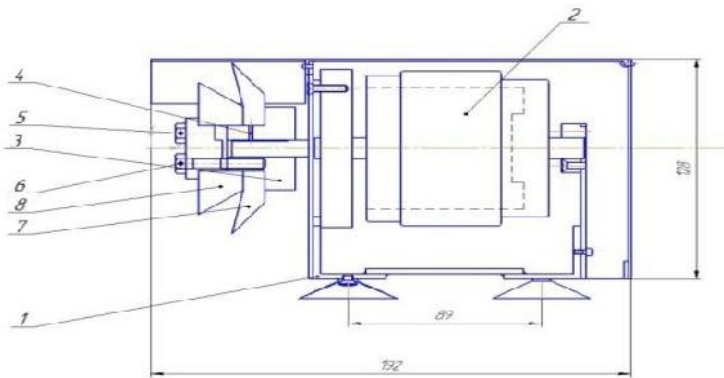


Рис.4. Общий вид настольного заточного станка

На рисунке 5 изображена специальная державка 9, увеличивающий экран 10, регулируемая стойка 11.

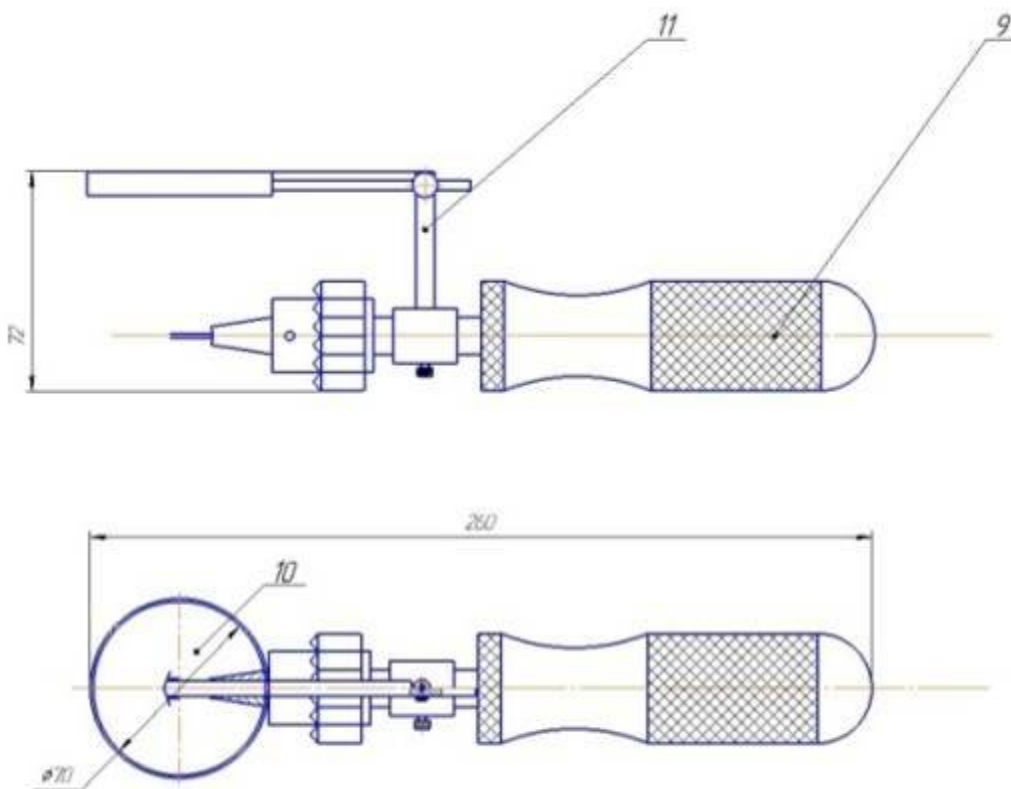


Рис.5. Общий вид державки для мелкоразмерного инструмента

Новизной станка является увеличивающий экран, который дает пятикратное увеличение зоны резания. На экран нанесен калибр, который обеспечивает возможность контроля заточки, чего нет в других станках. Инструмент закреплен и имеет возможность удобного манипулирования перемещение специальной державки.

Описанный настольный заточной станок (рис. 4) работает следующим образом.

Устанавливается абразивный инструмент 7 и 8. Сверло закрепляется в специальной державке (рис. 5), относительно державки настраивается увеличивающий экран 10 так, чтобы сверло попало в пределы калибра.

Заточной станок изготовлен на кафедре МРСиИ и проведено экспериментальное исследование качества заточки инструмента.

Цель испытания доказать эффективность работы заточного станка. Для испытания применен новый и обычный заточные станки, марки ЗЕ642.

С этой целью проведен эксперимент в соответствии с [10].

Экспериментом установлено, что новый станок повышает качество затачивания.

Выводы

Спроектирована и изготовлена универсальная комбинированная ручная сверлильная – отрезная – шлифовальная машина.

По результатам выполненной работы составлена заявка на полезную модель.

Спроектирован, изготовлен и испытан станок для затачивания мелкоразмерного инструмента с диаметрами от (0,1-2,5мм).

По результатам патентного поиска составлена заявка и получено положительное решение на полезную модель.

Список литературы

1. Патент 2529434 JP. Электрический инструмент / Аоки Йоносукэ. – Заявл. 19.03.2010; опубл. 27.09.2014.
2. Патент 2505391 JP. Приводной инструмент / Хатисука Томохиро. – Заявл. 13.11.2009; опубл. 27.01.2014.
3. Патент 2152862 Российская Федерация. Ручная шлифовальная машина / В.П. Ступицкий, М.Ю. Молочков, А.Г. Творогов. – Заявл. 10.08.1988; опубл. 20.07.2000.
4. Патент 2136470 Российская Федерация. Способ восстановления деталей из высокопрочных сталей и инструмент для его выполнения / М.С.Данилов, В.И. Мокряков, Ю.А. Косарев, В.И. Сагаловский, В.И. Павленко, В.М. Довгаленок, О.Н. Гмызина. – Заявл. 07.07.1997; опубл. 10.09.1999.
5. Патент 2434731 Российская Федерация. Электрический инструмент, такой как угловая шлифовальная машина / Моербеек Рубен Ян. – Заявл. 08.01.2008; опубл. 27.11.2011.
6. Сверлозаточной станок BSM 20 [Электронный ресурс]. – URL: <http://kaindl-russia.ru/sverlozatochnoy-standok-bsm-20> (дата обращения: 22.03.2016).
7. Патент 770753 СССР. Станок для заточки сверл / В.В. Идель, В.И. Горват. – Заявл. 26.10.1978; опубл. 15.10.1980.
8. *Палей М.М.* Технология производства металлорежущих инструментов: учебное пособие для студентов втузов, обучающихся по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1982. – 256 с.
9. *Ординарцев И.А., Филиппов Г.В.* Справочник инструментальщика. – М.: Машиностроение, 1987. – 846 с.
10. *Хикс Ч.* Основные принципы планирования эксперимента: пер. с англ. – М.: Мир, 1967. – 406 с.

PROBLEMS FINISHING COMPLEX SURFACES WITH ELECTRIC HAND TOOLS

Ryzhikov V. V.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: mrsi@bti.secna.ru

Mkrtchyan T. S.¹, Student, e-mail: tatevik_mkrtchyan26@mail.ru

Kireeva A. K.¹, Student, e-mail: tsoyaliya@yandex.ru

Ignatova E. A.², Chief of Bureau, e-mail: mrsi@bti.secna.ru

¹Biysk Technological Institute, Branch of Polzunov Altai State Technical University, 27 Trafimova st., Biysk, Altai region, 659305, Russian Federation

²Open Joint-stock Company Biysk Production Association "Sibpribormash", 1 Industrial Area, Biysk, Altai region, 659315, Russian Federation

Abstract

In the article the questions: 1) the creation of a combined (drilling, grinding, cutting material) instrument equipped with modern electric drive; 2) The design of the machine for sharpening of small-sized tool made of tool steel and carbide.

Keywords

finishing, abrasive, diamond tools, drilling, grinding, hand tools

УДК 621.7.044.7

**ИНДУКТОР ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ
ОБРАБОТКИ**

*А.Г. ОВЧАРЕНКО, доктор техн. наук, профессор
А.Ю. КОЗЛЮК, канд. техн. наук, доцент
М.О. КУРЕПИН, инженер
(БТИ АлтГТУ, г. Бийск)*

Овчаренко А.Г. - 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27,
Бийский технологический институт
(филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова,
e-mail: pbuk@bti.secna.ru

Для комбинированной магнитно-импульсной обработки режущего инструмента предложен индуктор, включающий специальный экран для защиты от импульсного магнитного поля. Представлен расчет эффективности защитного экрана. Расчет проведен для экранов с различной толщиной стенки и имеющих технологические отверстия. Для анализа магнитного поля в индукторе создана модель распределения индуктивности магнитного поля в процессе магнитно-импульсной обработки.

Ключевые слова: индуктор, магнитно-импульсная обработка, импульсное магнитное поле, экранирование.

Введение

Одним из перспективных способов поверхностного упрочнения металлорежущего инструмента является магнитно-импульсная обработка (МИО). МИО основана на воздействии импульсного магнитного поля высокой напряженности на обрабатываемую поверхность с целью улучшения ее механических и физических свойств. При этом, кроме повышения поверхностной твердости и износостойкости обработанного инструмента МИО способствует уменьшению остаточных и усталостных напряжений в структуре материала. Такой способ поверхностного упрочнения обладает рядом преимуществ: достаточно низкая себестоимость обработки, сохранение формы режущей поверхности обработанных изделий, отсутствие расходных материалов, простота технологической оснастки, экологическая чистота, возможность упрочнения инструмента любой конфигурации [1].

В Бийском технологическом институте на протяжении ряда лет ведется научно-исследовательская работа, направленная на совершенствование существующей технологии МИО. С учетом недостатков в известной технологии МИО были предложены следующие улучшения:

1. Применение локальных концентраторов магнитного поля. Это позволило не только обрабатывать отдельные участки сложных по форме деталей и инструмента (например, отдельные режущие поверхности), но и значительно снизить энергетические и соответственно массогабаритные параметры установки [2].

2. Комбинация импульсного магнитного поля и предварительного индукционного нагрева обрабатываемого инструмента. Это позволило значительно увеличить эффективность процесса МИО [3-5].

Новизна предлагаемого способа подтверждается патентом РФ на изобретение №2339704 «Способ комбинированной магнитно-импульсной обработки поверхностей инструментов и деталей машин» [6].

Практическое использование комбинированной МИО, включающей предварительный нагрев инструмента токами высокой частоты (ТВЧ), показало необходимость обеспечения защиты от импульсного магнитного поля, как обслуживающего персонала, так и электронных элементов магнитно-импульсной установки.

Таким образом, целью данной работы явилось усовершенствование индуктора для комбинированной МИО путем введения защитного экрана от импульсного магнитного поля.

Теоретическая часть

В процессе обработки режущего инструмента на магнитно - импульсной установке возникают электромагнитные поля высокой напряженности, что негативно влияет как на работу электронных устройств блока предварительного нагрева токами высокой частоты, так и на здоровье оператора, осуществляющего обработку изделий. Для уменьшения такого воздействия был разработан комбинированный индуктор, включающий металлический экран для защиты от магнитного поля, содержащий два технологических отверстия.

На рисунке 1 представлена конструкция комбинированного индуктора с экраном.

Основной характеристикой каждого экрана является степень ослабления электромагнитного поля, называемая эффективностью экранирования, которая представляет собой отношение напряженности магнитного поля в данной точке при отсутствии экрана к напряженности магнитного поля в той же точке при наличии экрана [7].

Расчет эффективности экранирования проведен для экрана цилиндрической формы диаметром 240 мм и высотой 82 мм с отверстиями диаметром 25 мм при частоте тока 1,67 кГц. В качестве материала экрана использовалась сталь 20Х.

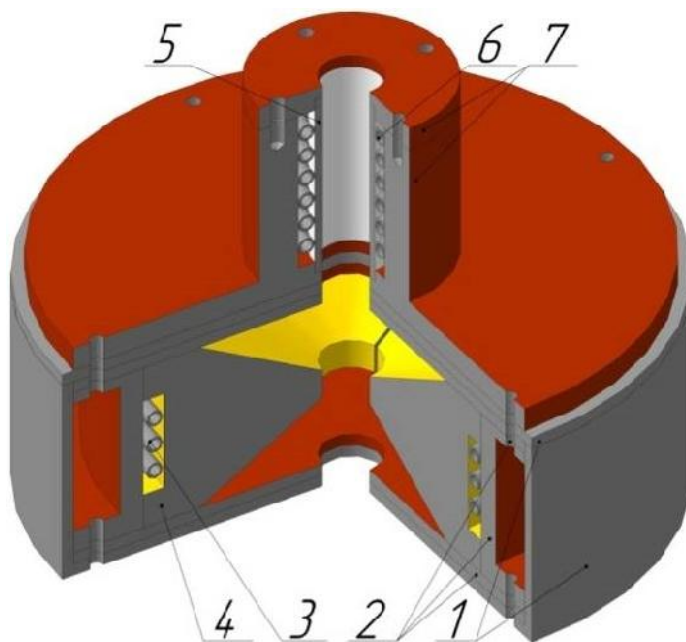


Рис. 1. Комбинированный индуктор:

- 1- корпус - экран; 2- изоляция магнитно-импульсного токопровода; 3 - магнитно-импульсный токопровод; 4- концентратор магнитного поля; 5 - керамическая втулка; 6 - токопровод для ТВЧ; 7 - изоляция токопровода для ТВЧ

При наличии в экране отверстий или щелей, возникающих вследствие несовершенства его конструкции и технологии изготовления, эффективность экранирования снижается. В этом случае её можно рассчитать по следующей формуле [8]:

$$e = 10 \lg \left| \frac{\sqrt{2} Z_1}{Z_2} \right| + 20 \lg \left[\left(\frac{2\pi}{r\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \right)^{1/3} \cdot (1 - 0,5l\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0})^6 \right] + \frac{17,372\pi h}{l}, \quad (1)$$

где с учетом формы экрана импеданс $|Z_1|$ записывается в виде:

$$|Z_1| = \omega\mu_1 r m, \quad (2)$$

где $m=1$ для цилиндрического экрана; ω - круговая частота; μ_1 - относительная магнитная проницаемость среды;

$$|Z_2| = \left| \sqrt{\omega\mu_2 / \sigma_2} \right|, \quad (3)$$

где σ_2 - удельная проводимость материала экрана; μ_2 - относительная магнитная проницаемость материала экрана; $r \approx 0,62V^{1/3}$ - эквивалентный радиус экрана любой геометрической формы (V - внутренний объём экрана, мм³); μ_0 , ϵ_0 - соответственно магнитная и электрическая постоянные: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, l - наибольший размер отверстия (щели) в экране, мм; h - толщина стенки экрана.

Результаты

Результаты расчета эффективности экранирования для экранов с различной толщиной стенки были сведены в таблицу.

Таблица

Зависимость эффективности экранирования от толщины стенки экрана

Материал экрана	Толщина стенки экрана, мм	Эффективность экранирования
Сталь 20Х	1	117
	2	119
	3	121
	4	123
	5	125

Из конструктивных соображений и с учетом величины эффективности экранирования толщина стенки экрана принимается равной пять миллиметров.

Так как в экране имеются два отверстия, то эффективность экранирования будет неравномерной по поверхности экрана, поэтому для проверки защитного воздействия экрана на токопровод установки ТВЧ была создана модель в программе Elcut 6.1 (рисунок 2).

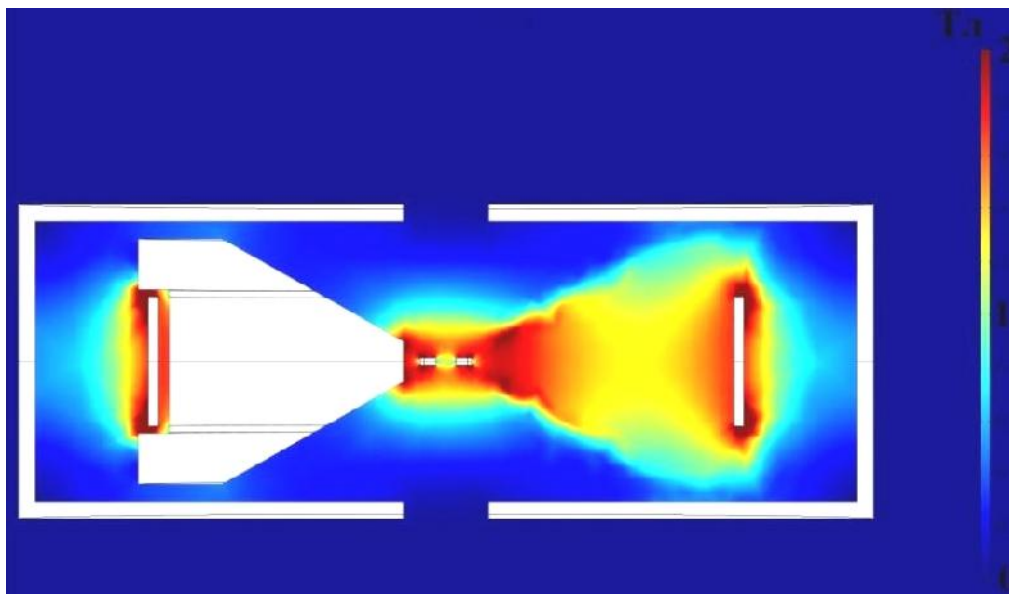


Рис. 2. Распределение индуктивности магнитного поля (Тл) при магнитно-импульсной обработке

Данная модель позволяет оценить эффективность экранирующего воздействия на токопровод ТВЧ в комбинированном индукторе (рисунок 2). Можно отметить, что экран работает эффективно, так как индуктивность магнитного поля в отверстиях экрана равна индуктивности магнитного поля вне экрана.

Выводы

Разработан индуктор для комбинированной магнитно-импульсной обработки, включающий металлический экран для защиты обслуживающего персонала и токопровода установки ТВЧ от отрицательного воздействия импульсного магнитного поля.

Произведен расчет эффективности экранирования импульсного магнитного поля металлическим экраном цилиндрической формы с двумя технологическими отверстиями.

Предложена простая в изготовлении конструкция экрана и достаточно эффективная при использовании, что подтверждается моделированием в программе Elcut 6.1.

Список литературы

1. Малыгин Б.В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 112 с.
2. Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю., Курепин М.О. Индукторы для комбинированной магнитно-импульсной обработки инструментов различной формы // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2008. – № 3. – С. 11–12.
3. Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю. Повышение износостойкости деталей комбинированной магнитно-импульсной обработкой // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 2. – С. 24–26.
4. Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю., Курепин М.О. Повышение износостойкости пластин из твердого сплава // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 2. – С. 13–15.

5. Исследование влияния комбинированной магнитно-импульсной обработки на качество твердосплавного инструмента / А.Г. Овчаренко, А.Ю. Козлюк, М.О. Курепин и др. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 3. – С. 95–98.

6. Патент 2339704 Российская Федерация. Способ комбинированной магнитно-импульсной обработки поверхностей инструментов и деталей машин / А.Г. Овчаренко, А.Ю. Козлюк. – Бюл. № 33. – 2008. – 6 с.

7. *Овчаренко А.Г.* Безопасность жизнедеятельности человека в электромагнитных полях: методические рекомендации к выполнению практических работ по курсу «Безопасность жизнедеятельности» / А.Г. Овчаренко, А.Ю. Козлюк. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2008. – 38 с.

8. *Аполлонский С.М., Каляда Т.В., Синдаловский Б.Е.* Безопасность жизнедеятельности человека в электромагнитных полях: учебное пособие. – СПб.: Политехника, 2006. – 263 с.

INDUCTOR FOR COMBINED MAGNETIC-PULSE TREATMENT

Ovcharenko A. G., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: pbuk@bti.secna.ru

Kozlyuk A. Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: andrey-pbuk@mail.ru

Kurepin M. O., Engineer, e-mail: btimish@mail.ru

Biysk Technological Institute, Branch of Polzunov Altai State Technical University, 27 Trafimova st., Biysk, Altai region, 659305, Russian Federation

Abstract

A inductor for combined magnetic-pulse processing cutting tool, comprising a metal field to protect service personnel and installation of electrical pathway from the negative effects of high frequency pulsed magnetic field. The calculation was performed for shields with varying wall thicknesses and with technological holes.

From these calculation results show that the shielding efficiency slightly increases with increasing the thickness of the shield wall. Because of the inductor design and taking into account the value of the effectiveness of the shielding wall thickness of the c is assumed to be five millimeters. For the analysis of the magnetic field in the inductor established distribution model of the magnetic field in the inductor magnetic-pulse processing.

Keywords

magnetic-pulse treatment, inductor, pulsed magnetic field, shielding

УДК 621.793

**К ЗАДАЧЕ СОЗДАНИЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ
С ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ АНТИФРИКЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ***

*А.Ю. ШУБИН¹, аспирант
В.С. ДМИТРИЕВ¹, доктор тех. наук, профессор
В.Х. ДАММЕР¹, канд. техн. наук
А.И. ПОТЕКАЕВ², доктор физ.-мат. наук, профессор
В.М. САВОСТИКОВ², канд. техн. наук
А.Н. ТАБАЧЕНКО², канд. физ.-мат. наук
(¹ НИ ТПУ, г. Томск, ² НИ ТГУ, г. Томск)*

Шубин А.Ю. – 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
e-mail: ayshubin@gmail.com

Для снижения виброшумов и повышения надежности работы электродвигателей проводятся исследования по замене подшипников качения на подшипники скольжения с ионно-плазменным антифрикционным покрытием. В качестве материала покрытия выбрана композиция Ti-C-Mo-S, содержащая износостойкие карбиды и антифрикционные сульфиды металлов. Для нанесения покрытия исследованы комбинированные магнетронно-плазменные методы с предварительным модифицированием поверхностного слоя подложки – азотированием или многокомпонентным легированием. Установлено, что предварительное магнетронно-плазменное легирование подложки совокупностью атомов Ti-C-Mo-S обеспечивает больший ресурс работы покрытия и более низкий коэффициент трения ($0,06 \div 0,07$) по сравнению с ионно-плазменным азотированием подложки. Для проведения натурных испытаний подшипников скольжения с антифрикционными покрытиями разработан и изготовлен специализированный стенд.

Ключевые слова: подшипник скольжения, покрытие, ионно-плазменные методы, азотирование, легирование, твердость, прочность сцепления, фрикционные испытания, коэффициент трения.

Введение

Для электродвигателей, к которым предъявляются специальные требования по виброшумовым характеристикам, необходимо особое внимание уделять опорным подшипниковым узлам роторов. Подшипники качения, в силу своих конструктивных особенностей, не обеспечивают низкий уровень виброшумовых характеристик [1]. Авторы работы полагают, что в данном случае целесообразно заменить подшипники качения подшипниками скольжения. Традиционные подходы в конструировании подшипников скольжения, работающих на жидких смазках, предусматривают применение относительно сложной системы принудительной подачи смазки в зону трения. Задача – обеспечить достаточный ресурс работы подшипника упрощенной конструкции, т.е. без системы принудительной подачи жид-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания № 2014/223 (код проекта 727).

кой смазки к рабочим (фрикционно-взаимодействующим) поверхностям подшипника. Одним из возможных вариантов решения этой задачи является применение твердых антифрикционных и, одновременно, износостойких покрытий на поверхностях подшипника скольжения. Перспективными методами формирования таких покрытий являются ионно-плазменные, характеризующиеся широкими функциональными возможностями в силу своих физических принципов. В частности, они позволяют синтезировать композиционные покрытия, сочетающие в себе и относительно мягкие компоненты с низким сдвиговым сопротивлением (углеродосодержащие, пластичные металлы, халькогениды), и твердые износостойкие составляющие по типу карбидов, нитридов, боридов и т.п.[2-4]. Современным направлением в области ионно-плазменного формирования покрытий является использование комбинированных методов, например, предварительное азотирование подложки и последующее магнетронное нанесение антифрикционного сульфидсодержащего покрытия [5], сочетание магнетронного напыления и ионно-лучевой обработки поверхности [6,7] и др. Такие комбинированные технологические приемы направлены на повышение качества покрытий и увеличение ресурса их работы.

Материалы и методы исследования

В качестве материала образцов для проведения экспериментальных исследований первоначально выбрана широко применяемая в отечественной промышленности конструкционная сталь 40X. Образцы для испытаний выполнены в виде дисков диаметром 40 мм и толщиной 4 мм. Образцы подвергались закалке и отпуску на твердость HRC42 и шлифовке с механической полировкой до шероховатости Ra 0,1. Для нанесения покрытий применялась комбинированная установка «Композит-3» (рис. 1), созданная на базе промышленной установки ННВ 6.6-И1. Установка содержит в рабочей камере три типа ионно-плазменных источников – газовый плазмодогенератор на основе разряда с накаливаемым катодом, дуомагнетрон и два электродуговых испарителя [8]. Газовый плазмодогенератор позволяет проводить высококачественную ионно-плазменную очистку поверхности подложки и модифицировать поверхностный слой подложки методами ионно-плазменного азотирования или магнетронно-плазменного легирования [8,9].



Рис. 1. Комбинированная установка «Композит-3»: 1 - дуомагнетрон с двумя распыляемыми мишенями, 2 – электродуговые испарители, 3- газовый плазмодогенератор

В качестве антифрикционного покрытия выбрано композиционное покрытие состава Ti-C-Mo-S, содержащее карбиды и сульфиды металлов. Покрытие может быть получено магнетронным или вакуумно-дуговым распылением [9, 10] многокомпонентных катодов, изготавливаемых по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). В данной работе покрытие осаждалось магнетронным распылением двух катодов [9]. Учитывая опыт зарубежных исследователей [5] и свой собственный [8, 9], покрытия формировались двумя комбинированными способами: вариант №1 – с предварительным азотированием поверхностного слоя подложки, вариант №2 – с предварительным легированием поверхностного слоя подложки совокупностью атомов Ti-C-Mo-S. Сравнительные исследования композиций модифицированный поверхностный слой-покрытие проводились методами:

- измерения микротвердости на приборе ПМТ-3 при нагрузках на индентор 0,5 и 1,0 Н ($H_{0,5}$ и $H_{1,0}$);
- оценки прочности сцепления покрытия с основой визуальным контролем характера разрушения покрытий при индентировании на твердомерах Викерса при нагрузке 2 Н и Роквелла при нагрузке 1000 Н;
- фрикционных испытаний на установке типа «Циклометр» по схеме неподвижный индентор в виде шарика диаметром 3,2 мм из закаленной до HRC62-63 стали ШХ-15– вращающийся диск из стали 40Х с покрытием. Испытания проводились под разными нагрузками (0,5; 1,0 и 1,5 Н).

Результаты исследований

В ниже приведенной таблице отражены результаты измерения микротвердости обратной стороны подложки (основы), закрытой от непосредственного воздействия ионно-плазменных потоков, и покрытия, осажденного на поверхностный слой подложки, модифицированный в двух технологических вариантах: №1 – ионно-плазменного азотирования и №2 – магнетронно-плазменного легирования.

Таблица

Значения микротвердости подложки и покрытия для двух вариантов предварительного ионно-плазменного модифицирования поверхностного слоя подложки

№ варианта модифицирования поверхностного слоя подложки	Микротвердость подложки, ГПа		Микротвердость покрытия, ГПа	
	$H_{0,5}$	$H_{1,0}$	$H_{0,5}$	$H_{1,0}$
№1	3,75	3,59	5,24	4,8
№2	4,04	4,12	5,02	4,65

Из анализа данных таблицы, видно, что значение твердости основы в технологическом варианте №1 несколько ниже, чем в варианте №2. Это объясняется более высокой и необходимой температурой процесса (нагревом подложки) при азотировании по сравнению с вариантом магнетронно-плазменного легирования (450 °С и 350 °С, соответственно) и частичным отпуском основы в первом случае. Однако, твердость композиции модифицированный поверхностный слой-покрытие в варианте №1 выше, чем в варианте №2, что, очевидно, связано с большей толщиной и твердостью модифицированного слоя в первом варианте – при азотировании. Это косвенно подтверждается существенным различием в значениях микротвердости при разных нагрузках на индентор (т.е. при разных глубинах проникновения индентора в исследуемый топокомполит) в вариантах №1 и №2 (см. таблицу).

На рисунке 2 отражены результаты сравнительной оценки прочности сцепления покрытия Ti-C-Mo-S с подложкой из стали 40X по характеру и площади разрушения покрытия вокруг отпечатков Виккерса.

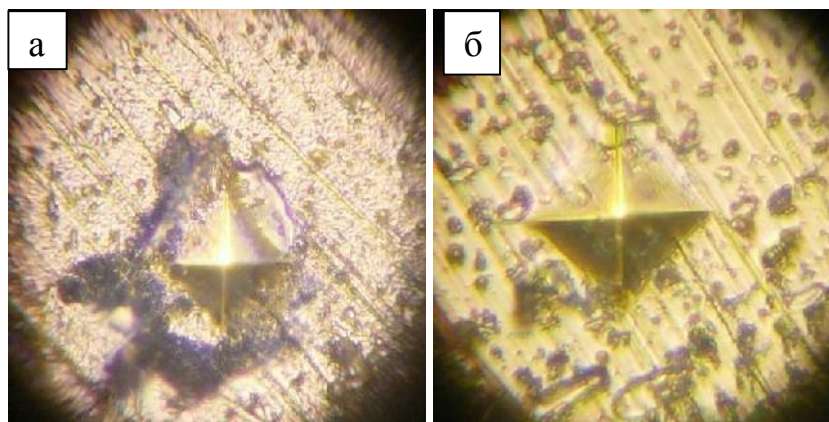


Рис. 2. Вид отпечатков по Виккерсу при нагрузке на индентор 2,0 Н для покрытий, нанесенных по варианту №1 (а) и варианту №2 (б).

Анализируя вид отпечатков, можно сделать вывод, что покрытие, осажденное на азотированный подслое в варианте №1, характеризуется меньшей прочностью сцепления с подложкой по сравнению с вариантом №2, о чем свидетельствует большая площадь отслоения покрытия вокруг отпечатка (см. рис. 2а и рис.2б). Данные, полученные из анализа отпечатков Роквелла, полностью согласуются с данными, полученными из анализа отпечатков Виккерса.

Результаты фрикционных испытаний при всех использованных нагрузках на индентор подтвердили данные исследования прочности сцепления покрытия Ti-C-Mo-S с подложкой для двух технологических вариантов предварительного модифицирования ее поверхностного слоя. Во всех случаях покрытие, сформированное по варианту №1 с предварительным азотированием, гораздо быстрее изнашивалось и теряло свои антифрикционные свойства по сравнению с покрытием, сформированным по варианту №2 с предварительным магнетронно-плазменным легированием поверхностного слоя. На рисунке 3 приведены характерные зависимости изменения коэффициента трения со временем для вариантов №1 и №2 при нагрузке на индентор 1,0 Н.

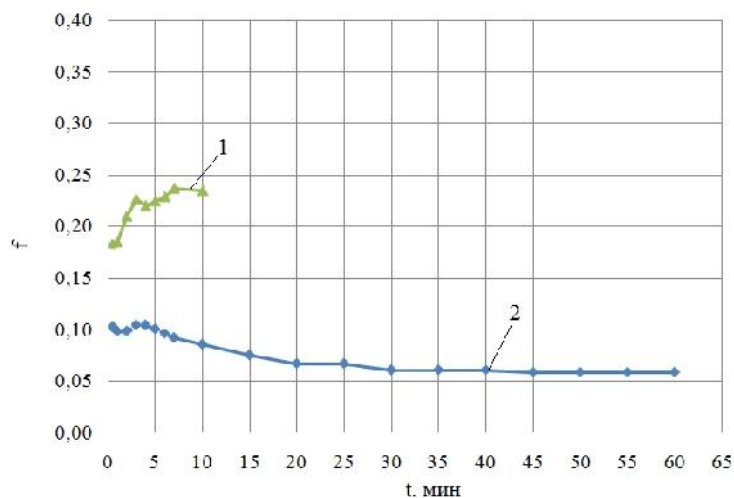


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от времени испытаний для покрытий, сформированных по варианту №1 и №2. Нагрузка на индентор P=1,0 Н.

Покрытие №1 уже на второй минуте показало увеличение коэффициента трения до значения 0,23, и далее его значение продолжало расти до возникновения на 10 минуте эффектов схватывания контртел и вибрации фрикционной системы. Покрытие, сформированное по варианту №2, обеспечило значение коэффициента трения ниже 0,2 (значение 0,2 – показатель антифрикционности покрытия) на всем использованном временном интервале испытаний. Его коэффициент трения достигает 0,06-0,07 на 20 минуте и сохраняется вплоть до прекращения испытаний на 60 минуте.

С целью изучения работоспособности покрытия в условиях, максимально приближенных к реальным, в дальнейшем будут проведены испытания на макетных образцах подшипников скольжения с нанесенным по оптимизированным режимам антифрикционным покрытием Ti-C-Mo-S. Для проведения испытаний сконструирован и изготовлен стенд, позволяющий оценить работоспособность двигателя по показаниям значения потребляемого тока, а также путем отслеживания его виброшумовых характеристик.

Выводы

1. Для проведения дальнейших работ по созданию подшипников скольжения с твердым антифрикционным покрытием выбран комбинированный магнетронно-плазменный способ осаждения композиции Ti-C-Mo-S с предварительным легированием основы изделия (рабочих элементов подшипника) сочетанием элементов, идентичных тем, что входят в состав покрытия.

2. Для создания подшипников специального назначения (например, эксплуатируемых в условиях химически активной среды или применяемых в аэрокосмической отрасли) в дальнейшем будут проведены физико-трибологические исследования покрытия на коррозионностойкой стали 20X13 и титановом сплаве ВТ6.

Список литературы

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
2. Coefficient of friction and wear of sputtered a-C thin coatings containing Mo / P. Novak, J. Musil, R. Cerstvy, A. Jager // Surface and Coating Technology. – 2010. – Vol. 205. – P. 1486–1490.
3. Relationship between mechanical properties and coefficient of friction of sputtered a-C/Cu composite thin films / J. Musil, M. Louda, Z. Soukup, M. Kubasek // Diamond and Related Materials. – 2008. – Vol. 18. – P. 1905–1911.
4. Steinmann M., Muller A., Meerkamm H. A new type of tribological coating for machine elements based on carbon, molybdenum disulphide and titanium diboride // Tribology International. – 2004. – Vol. 37. – P. 879–885.
5. Investigation of mechanical properties of TiN + MoS_x coating on plasma-nitrided substrate / M. Rahman, J. Haider, D.P. Dowling, P. Duggan, M.S.J. Hashmi // Surface and Coatings Technology. – 2005. – Vol. 200. – P. 1451–1457.
6. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. – М.: Техносфера, 2010. – 528 с.
7. Влияние ионнопучковой обработки на структуру и трибомеханические свойства покрытий TiN / В.П. Сергеев, М.В. Федорищева, О.В. Сергеев, А.В. Воронов, И.К. Зверев // Физика и химия обработки материалов. – 2008. – № 2. – С.10–13.
8. Савостиков В.М., Потеев А.И., Табаченко А.Н. Физико-технологические основы создания градиентно-слоистых поверхностей многокомпонентного состава совмещением методов ионно-диффузионного насыщения, магнетронного и вакуумно-дугового осаждения // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54, № 7. – С. 26–34.

9. Патент 2502828 Российская Федерация. Способ нанесения антифрикционного износостойкого покрытия на титановые сплавы / В.М. Савостиков, А.Н. Табаченко, А.И. Потекаев, Е.Ф. Дударев. – Оpubл. 27.12.2013, Бюл. № 36; приоритет 18.06.2012.

10. Патент 2392351 Российская Федерация. Способ нанесения антифрикционного износостойкого покрытия на изделие из металла или сплава / В.М. Савостиков, А.Н. Табаченко, С.М. Сергеев, В.А. Кудрявцев, А.И. Потекаев, В.М. Кузьмиченко, Н.Н. Ивченко. – Оpubл. 20.06.2010, Бюл. № 17; приоритет 13.08.2008.

PERSPECTIVES FOR THE CREATION OF SLIDE BEARINGS WITH ION-PLASMA ANTI-FRICTION COATING

Shubin A.Y.¹, Ph.D. student, e-mail: ayshubin@gmail.com

Dmitriev V.S.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: dmitriev@tpu.ru

Dammer V.H.¹, Ph.D. (Engineering), Scientific associate, e-mail: damm00@inbox.ru

Potekaev A.I.², D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: kanc@spti.tsu.ru

Savostikov V.M.², Ph.D. (Engineering), Advanced manufacturing engineer,
e-mail: svm.53@mail.ru

Tabachenko A.N.², Ph.D. (Physics and Mathematics), Head of Laboratory,
e-mail: tabachenko@spti.tsu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Prospect Lenina, Tomsk, 634050, Russian Federation

² National Research Tomsk State University, 36 Prospect Lenina, Tomsk, 634050, Russian Federation

Abstract

For vibronoise reduction and electric motors reliability improving the research on the replacement of rolling bearings by slide bearings with ion-plasma anti-friction coating is carried out. Ti-C-Mo-S composition is chosen as the coating material due to the fact it contains a hardware carbides and antifriction metal sulfides. The coating was formed using a KOMPOSIT-3 hybrid facility. The facility chamber contained a gas-plasma generator with a hot cathode, a duomagnetron with two planar sputter targets, and two electric arc evaporators. The need to combine magnetron sputtering and electric arc deposition of coatings was dictated by different functional capabilities of these methods and their deposition rates. Coating process uses the combined magnetron ion-plasma methods with surface layer pre-modification by nitriding or by ion-plasma doping by means of Ti-C-Mo-S atoms. The substrate material used was common structural steel of the 40X grade, which was hardened to 42–46 HRC. The coating hardness was measured with a PMT-3 instrument. The bond strength of the coating to the substrate using the prints Vickers and Rockwell is esteemed. When using the pre-doping the substrate a hardness of the composition modified underlayer - coating is slightly lower rather than during the nitriding. The bond strength coating with substrate using pre-doping method is much higher. Friction tests based on «pin-on-disk» scheme with an immobile indenter and a rotating disk showed that the magnetron ion-plasma pre-doping the substrate by means of Ti-C-Mo-S atoms provides a longer service life of the coating with a lower friction coefficient (0,06 ÷ 0,07). To release tests of slide bearings with anti-friction coating a special stand was designed and produced.

Keywords

slide bearing, ion-plasma coatings, nitriding, doping, bond strength, hardness, solid antifriction coatings, friction tests, friction coefficient

УДК 621.9.06:678.5

КОНСТРУКЦИИ ФРЕЗ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

*С.А. КАТАЕВА, магистрант
А.М. МАРКОВ, доктор тех. наук, профессор
П.О. ЧЕРДАНЦЕВ, канд. техн. наук, доцент
С.В. ГАЙСТ, аспирант
Е.Ю. ЛАПЕНКОВ, магистрант
(АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул)*

Катаева С.А. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: Kataeva.Sof@gmail.com

В данной статье рассматриваются проблемы, связанные с механической обработкой стеклопластиков, в частности операции фрезерования. Особое внимание уделено используемому инструменту, так как процесс фрезерования связан с рядом трудностей, одной из которых является интенсивный износ фрез. Вследствие этого повышается температура в зоне резания, снижается качество обработанной поверхности. Негативные последствия от повышенного износа инструмента могут быть снижены за счет использования фрез рациональной конструкции со специальными конструктивно-геометрическими параметрами, ориентированными на обработку конкретных марок стеклопластиков. Предложена оригинальная конструкция сборной фрезы, которая позволяет установить зависимости выходных параметров фрезерования (шероховатость обработанной поверхности, износ инструмента, температура в зоне резания и др.) от конструктивно-геометрических параметров инструмента, что позволит повысить стойкость инструмента и качество обработанной поверхности.

Ключевые слова: композиционные материалы, стеклопластики, фрезерование, конструктивно-геометрические параметры, фрезы.

Введение

Одним из наиболее распространённых видов механической обработки стеклопластиков является фрезерование. Выбор режущего инструмента для этих операций достаточно труден в силу специфичности обрабатываемого материала и наличия на рынке большого ассортимента конструкций, разработанных непосредственно для обработки данного композиционного материала.

В соответствии существующими рекомендациями по фрезерованию стеклопластиков необходимо использовать инструмент с острой режущей кромкой, большим задним углом и малым радиусом режущей кромки. Для улучшения отвода стружки и снижения сил трения между поверхностями инструмента и заготовки передняя и задние поверхности должны иметь низкую шероховатость. Кроме того, важно обеспечить высокую стойкость инструмента, поскольку армирующие волокна интенсивно изнашивают режущую кромку, что приводит к увеличению силы резания и тепловыделения, а также снижению качества обработанных поверхностей.

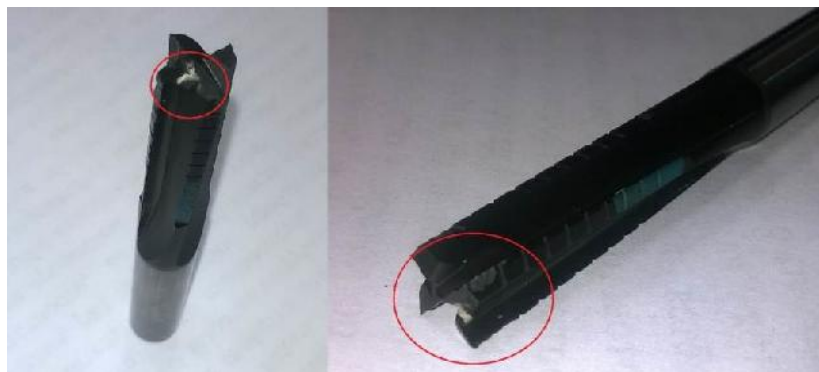


Рис. 1. Поломка зуба цельной фрезы (выделено) фирмы Iscar

Для обработки композиционных материалов применяются цельные и составные фрезы с затылованными и острозаточенными зубьями, а также сборные конструкции фрез. Основной недостаток цельных фрез состоит в том, что в случае поломки (рис. 1) или аварийного износа одного из зубьев вся фреза становится негодной к эксплуатации. Такой инструмент либо подлежит восстановлению и ремонту, а это процесс достаточно трудоёмкий, либо совсем не используется в дальнейшем, что тоже не выгодно с точки зрения экономии инструментальных материалов.

Теория

Одним из перспективных направлений повышения стойкости и работоспособности инструмента является переход на изготовление сборных конструкций, основное достоинство которых – экономия дорогостоящих инструментальных материалов. Данный тип фрез имеет недостатки: относительно более высокую трудоёмкость изготовления и эксплуатации, значительные габариты.

Основными дефектами, возникающими при механической обработке, являются: разрушение матрицы, выдергивание волокон, непрорез волокон, термическая деструкция матрицы. Происхождение этих дефектов обусловлено особенностями лезвийной обработки стеклопластика. В отличие от металлов, стеклопластики обладают низкой теплопроводностью и теплостойкостью. При температурах выше 300...350°C начинается термодеструкция связующего. Это приводит к резкому ухудшению качества обработанной поверхности, появлению прижогов, дефектного слоя (рис. 2).



Рис. 2. Расслоение, прижоги обработанной поверхности

Высокая температура негативно сказывается и на самом инструменте, приводя к его интенсивному износу и ухудшению режущих свойств (рис. 3).



Рис. 3. Двухзубая концевая фреза (инструментальный материал Р6М5) после работы при температуре свыше 300 °С.

Для устранения этих дефектов используют специальные конструкции инструментов, оптимизируют их геометрию, технологические режимы и условия обработки, используют специальные приспособления.

Следует отметить, что постоянно увеличиваются требования по точности и шероховатости обработанных поверхностей. Например, требования по шероховатости поверхности отверстий в ответственных конструкциях изделий достигают значения $R_a=1,6$ мкм. Для минимизации дефектов многие инструменталь-

ные фирмы предлагают специальные конструкции фрез [1].

Широко применяется обработка борфрезами с перекрестной насечкой образующей системы прерывистых режущих кромок, обеспечивающих обработку КМ при малых силах резания [2]. Для чистовой обработки контуров деталей используют однозубые фрезы. Контурную обработку сравнительно толстого листового материала выполняют фрезами с разнонаправленными спиральными канавками (рис. 4, в), которые позволяют избежать расслоения материала, поскольку осевые силы резания, возникающие при обработке, сжимают поверхностные слои сверху и снизу листа (рис. 5) [2].

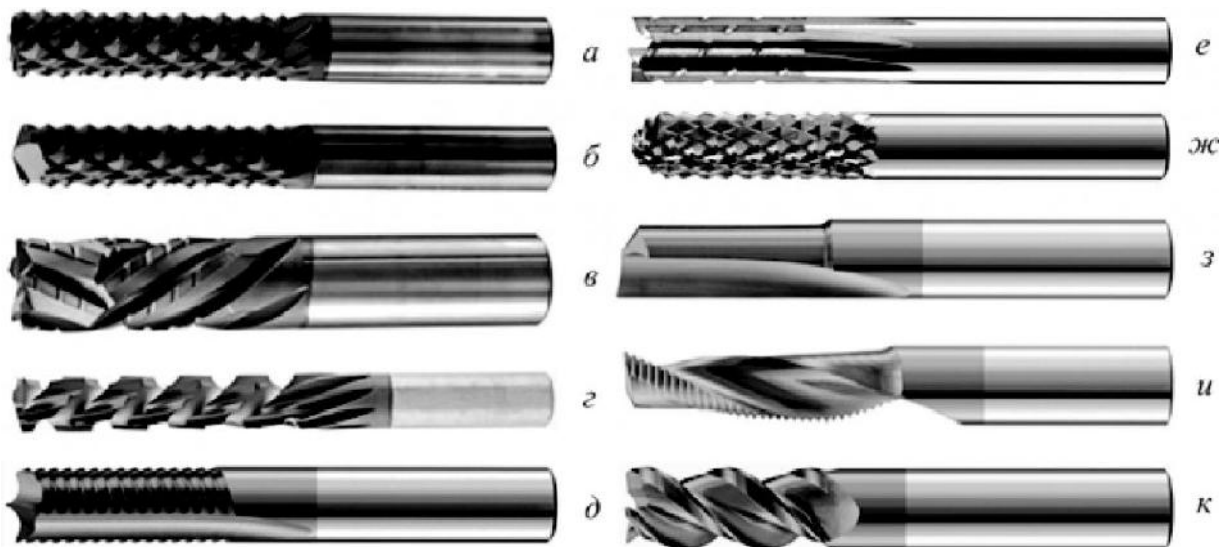


Рис. 4. Фрезы специальной конструкции для обработки стеклопластика. а – борфреза с перекрестной насечкой; б – борфреза с перекрестной насечкой и сверлом; в – фреза с разнонаправленными спиральными канавками; г – многозубая фреза с большим углом наклона стружечных канавок; д – борфреза с обратным режущим торцом; концевая фреза с прямым зубом и стружко-разделительными канавками; ж – сферическая концевая фреза с перекрестной насечкой (конструкция «кукуруза»); з – концевая фреза $z=1$, прямой зуб для высокоскоростной чистовой обработки; и – однозубая концевая фреза для высокоскоростной обработки, $z=1$, правая спираль, прерывистая режущая кромка; к – концевая фреза, $z=3$, спираль 45° , с неравномерным шагом режущих кромок.

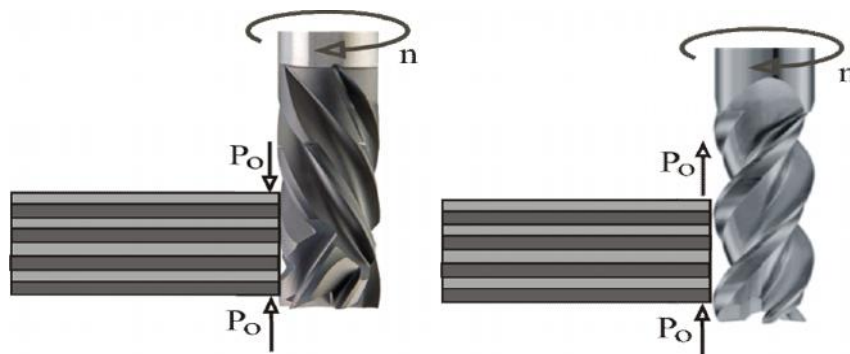


Рис. 5. Направления действия осевых сил резания при фрезеровании фрезами с разнонаправленными спиральными канавками (а) и при обработке обычной концевой фрезой (б).

В силу дороговизны данных инструментов имеет место использование стандартных твердосплавных фрез со специальными конструктивно-геометрическими параметрами. Рекомендации по назначению этих параметров, за исключением отдельных редких случаев, представлены в отраслевом стандарте ОСТ 5.9569-74. Этот стандарт так же не учитывает большое количество марок стеклопластика, которые появились более чем за четыре десятилетия [3].

Таким образом, технолог сталкивается с трудностями при выборе фрез для обработки стеклопластика с одной стороны из-за отсутствия рекомендаций по выбору фрез и назначению конструктивно-геометрических параметров, с другой – из-за дороговизны режущего инструмента. Это приводит к необходимости исследования процесса фрезерования различных марок стеклопластика фрезами со специальными конструктивно-геометрическими параметрами и инструментом специальной конструкции.

Эту проблему может решить использование фрезы оригинальной конструкции [4]. Предлагаемая фреза (рис. 6) представляет собой цельный цилиндрический корпус 1 диаметром 50мм из стали 40Х со специальными прямоугольными пазами определенной глубины, расположенными в шахматном порядке. В паз вставляется твердосплавная пластинка 2, которая ориентируется под определенным углом ω парой клиньев 3, после чего клинья фиксируются винтами 4. Меняя геометрию вставных клиньев и твердосплавной пластинки можно варьировать углы ω , α , γ . Кроме того, можно изменять число зубьев z .

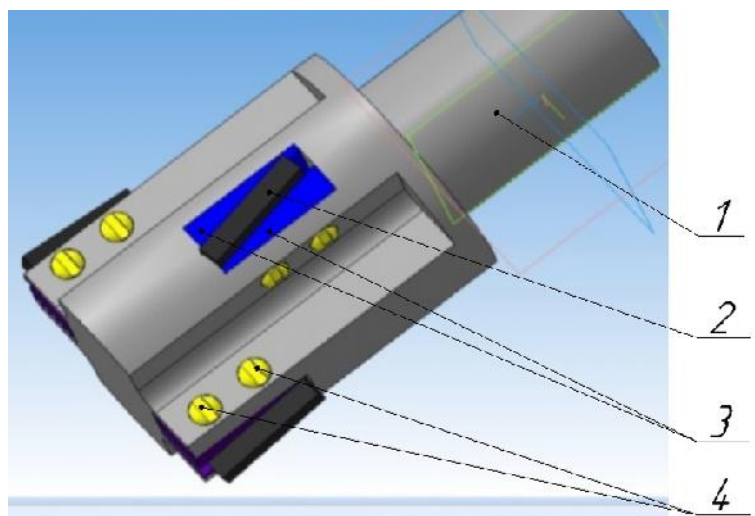


Рис. 6. Экспериментальная фреза

Результаты и обсуждение

Был проведен ряд исследований, направленных на определение рациональной конструкции фрез для обработки стеклопластика. На определенных режимах резания были исследованы выходные параметры фрезерования (шероховатость обработанной поверхности, температура в зоне резания, износ инструмента) после работы фрез конструкций: кукуруза (сферическая концевая фреза с перекрестной насечкой, рис. 7, б), стандартные твердосплавные трёхзубые фрезы с различным задним главным углом (рис. 7, а), цельная твердосплавная четырехзубая фреза с покрытием (рис. 1). Проведенные экспериментальные исследования показали, что:

1. Среди исследуемых конструкций фрез нет однозначно хороших, так как производители инструмента не дают рекомендаций по его применению для конкретных марок стеклопластика, т.е. фрезы специальной конструкции (кукуруза, четырехзубая с покрытием) дали неудовлетворительные результаты для одной марки стеклопластика, но хорошо себя зарекомендуют при работе с другой.

2. Определение рациональной геометрии (главный передний, главный задний углы, угол подъема стружечной канавки) у стандартных фрез затрудняется тем, что для каждого нового значения угла требуется новый инструмент. Эта проблема решается за счет использования экспериментальной фрезы (рис.7), в которой для изменения углов достаточно поменять фиксирующие клинья или твердосплавную пластинку.

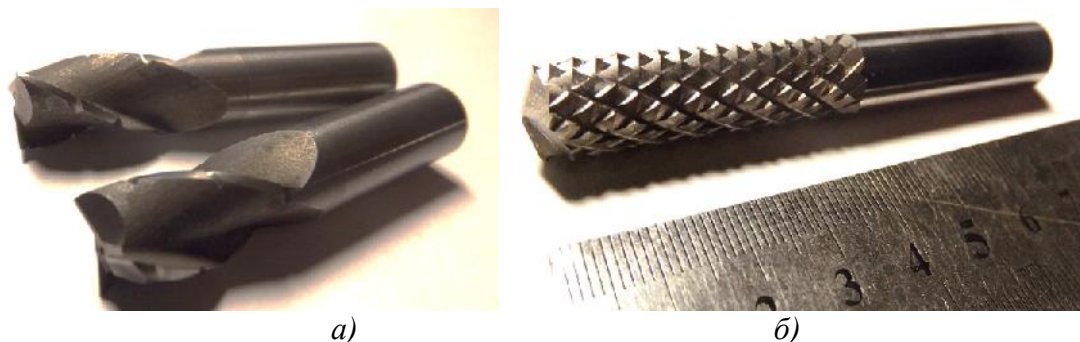


Рис. 7. Концевые фрезы:

а – стандартные твердосплавные ($z=3$), б – конструкции «кукуруза» ($z=10$)

3. Для каждого типа композиционного материала требуется проведение отдельных исследований по установлению зависимостей между выходными показателями процесса обработки и конструктивно-геометрическими и режимными параметрами операции фрезерования. Для таких исследований целесообразно применять автоматизированные системы на основе современных методик прогнозирования, например, с использованием искусственных нейронных сетей.

Выводы

1. Приводимые в литературе рекомендации по назначению конструктивно-геометрических параметров для фрез при механической обработке композитных материалов недостаточны и противоречивы и не позволяют обеспечивать требуемые показатели качества обработанной поверхности.

2. Фрезы специальных конструкций от производителей инструмента разработаны без учета различных физико-механических свойств различных марок стеклопластиков, что

затрудняет их применение для механической обработки деталей из конкретного композиционного материала.

3. Предложенная конструкция фрезы позволит моделировать фрезы с различными геометрическими параметрами и исследовать их влияние на выходные параметры фрезерования.

Список литературы

1. Катаева С.А., Гайст С.В., Марков А.М. Особенности выбора режущего инструмента для фрезерования стеклопластика // Молодежь – Барнаулу: материалы XVI научно-практической конференции молодых ученых, 17–25 ноября 2014 г. – Барнаул, 2014. – С. 432–435.
2. ВНИИАЛМАЗ. Новое в разработке композитов [Электронный ресурс]. – URL: <http://vniialmaz.ru/technology/45> (дата обращения: 22.03.2016).
3. Исследование процесса фрезерования стеклопластиков / Е.Ю. Лапенков, С.А. Катаева, С.В. Гайст, П.О. Черданцев, А.М. Марков, // Вестник алтайской науки. – 2015. – Вып. 3–4. – С. 39–44.
4. Экспериментальные исследования фрезерования композиционных материалов // А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.В. Гайст, С.А. Катаева // Инновации в машиностроении: сборник трудов VII Международной научно-практической конференции / под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2015. – С. 99–103.

DESIGN OF MILLING CUTTERS FOR THE PROCESSING OF FIBERGLASS

Kataeva S. A., Master's Degree student, e-mail: Kataeva.Sof@gmail.com

Markov A. M., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: andmarkov@inbox.ru

Cherdancev P. O., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: p004092@yandex.ru

Gayst S. V., Ph.D. student, e-mail: sergei_gaist@mail.ru

Lapenkov E. Y., Master's Degree student, e-mail: ewgenii018@mail.ru

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

Abstract

This article discusses the problems associated with machining of fiberglass, in particular milling operations. Particular attention is given to the tool used as the milling process involves a number of challenges, one of which is intensive wear of cutters. In consequence of this increased temperature in the cutting zone, reducing the quality of the machined surface. The negative effects of the high tool wear can be reduced through the use of rational design of milling cutters with special structural and geometric parameters, focused on processing specific brands of fiberglass. An original design team of cutters, which allows you to set the output depending on milling parameters (surface finish, tool wear in cutting zone temperature, etc.) from constructive - geometric parameters of the tool, which will increase tool life and surface finish.

Keywords

composite materials, fiberglass, milling, constructive and geometrical parameters, milling cutters

УДК 621.9

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СПОСОБОВ ПРАВКИ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ
МАГНИТНОГО ИНДУКТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОЛОГИИ
ПОИСКОВОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ**

*Е.Ю. ТАТАРКИН, доктор техн. наук, профессор
А.М. ИКОННИКОВ, канд. техн. наук, доцент
Р.В. ГРЕБЕНЬКОВ, магистрант
(АлтГТУ, г. Барнаул)*

Татаркин Е.Ю. - 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: etatarkin@mail.ru

Авторы излагают методику проектирования технических решений правки рабочей поверхности режущего инструмента для магнитно-абразивной обработки. Поиск нового технического решения включает 4 этапа. На первом этапе выделяется и анализируется проблема, связанная с отсутствием систем для обеспечения параметров качества обработанной поверхности в течение периода стойкости режущего инструмента. Второй этап выявляет актуальность проектирования устройств и способов правки режущего инструмента для магнитно-абразивной обработки. Третьим этапом поиска технического решения является получение набора решений при помощи комбинаторного метода матриц открытия А. Моля. В итоге, на четвертом этапе получены технические решения способов правки рабочей поверхности магнитного индуктора. Таким образом, с использованием методологии поискового конструирования спроектированы технологические системы для процесса правки рабочей поверхности режущего инструмента для магнитно-абразивной обработки.

Ключевые слова: Магнитно-абразивная обработка, поисковое конструирование, правка рабочей поверхности, стойкость режущего инструмента, качество обработки.

Введение

Поддержание конкурентоспособности машиностроительной продукции непрерывно требует решения задач, связанных с проектированием и внедрением новых технологий, сокращением временных и материальных затрат на всех этапах жизненного цикла изделия. Своевременное решение технологических задач в настоящее время в значительной мере замедляется из-за несовершенства методик проектирования технологических систем. Известные методики проектирования основаны, как правило, на прошлом опыте (базы данных известных решений). Не учитываются законы развития технических систем различных классов, не используются инженерного творчества.

Теория

Поиск нового технического решения включает следующие этапы:

- 1) Анализ проблемы;
- 2) Выявление недостатков, которые не позволяют с использованием прототипа обес-

печить заданные требования, предъявляемые к техническому решению и направленные на решение проблемы;

3) Получение набора решений;

4) Выбор рационального решения с учетом достижения заданных технических требований.

Существенной и малоизученной проблемой (первый этап) технологии магнитно-абразивной обработки является отсутствие технических решений для управления стойкостью абразивного инструмента, и, следовательно, невозможно обеспечить стабильность параметров качества обработанной поверхности в течение периода его стойкости.

Для выявления на втором этапе недостатков имеющихся прототипов был проведен патентный поиск глубиной в 35 лет. Анализ порядка 200 патентов и авторских свидетельств по технологии магнитно-абразивной обработки показал, что по технологическим системам наибольшее распространение получили патенты, разработанные с целью повышения качества обработанной поверхности и производительности обработки, а наименьшее распространение, практически нулевое, получили технические решения для восстановления режущих свойств абразивного инструмента. Это объясняет невозможность изучения и анализа прототипов, по причине их отсутствия. Поэтому является актуальным проектирование устройств и способов правки режущего инструмента для магнитно-абразивной обработки.

Наиболее сложным является третий этап, так как он носит творческий характер. На этом этапе проектирования обычно используют: собственные знания проектировщика, базы данных, известные технические системы и т.п. Выбор метода проектирования для совершенствования технологических систем определяется следующими факторами: требуемой характеристикой технической системы; временем, отведенным на поиск и реализацию решения; квалификацией проектировщиков и рядом другими технико-экономическими показателями.

К числу наиболее эффективных методов проектирования новых решений следует отнести комбинаторный «Метод матриц открытия А. Моля». Метод матриц открытия заключается в построении двумерной матрицы, имеющей два ряда признаков – вертикальный и горизонтальный. Эти ряды могут быть как упорядоченными, так и неупорядоченными, выражаться качественными и количественными параметрами. Часть признаков может относиться к внутренней среде, внешней среде, условиям функционирования и т.п. Данный метод не дает конкретных технических решений, но позволяет проанализировать варианты комбинаций признаков системы, формулировать проблемы, находить решения.

В квадратной матрице «Стойкость магнитно-абразивного инструмента» в качестве признаков взяты следующие 9 элементов: обламывание зерен (I), расщепление зерен (II), площадки износа (III), вырывание зерен (IV), внутреннее трение (V), рельеф режущей части (VI), поры в режущей части (VII), рабочий зазор (VIII) и зернистость порошка (IX). Ряд комбинаций предполагает наличие потенциальных решений. Поле для анализа составляет 81 комбинацию. Черным цветом выделены комбинации вариантов, которые не дают возможности нахождения новшеств. Бесцветные – комбинации вариантов, которые дают возможность нахождения новшеств (см. табл.).

В итоге на четвертом этапе получен ряд технических решений способов правки рабочей поверхности магнитного индуктора. Предлагается осуществлять правку тремя сгенерированными способами: воздействием металлическим карандашом, струи сжатого воздуха и металлической струной.

Предлагаемое решение поясняется рисунком 1, на котором изображена схема реализации способа правки рабочей поверхности магнитного индуктора воздействием металлического карандаша. На рисунке обозначено: 1 – шпиндель вертикально-фрезерного станка с ЧПУ, 2 – цилиндрический магнитный индуктор, 3 – стол станка, 4 – тиски, 5 – обрабатываемая деталь, 6 – металлический карандаш, S – подача стола станка, h – зазор между рабочей

поверхностью индуктора и металлическим карандашом, n – частота вращения шпинделя, δ – величина рабочего зазора.

Таблица

Стойкость магнитно-абразивного инструмента

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
I									
II									
III									
IV									
V									
VI									
VII									
VIII									
IX									

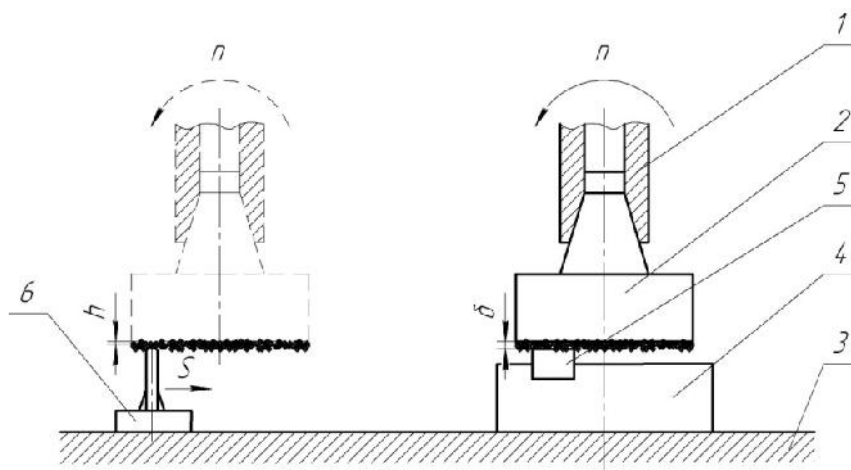


Рис. 1. Структурная схема установки для осуществления способа правки металлическим карандашом

В процессе обработки изделия с течением времени магнитный порошок изнашивается, вследствие чего необходима его правка. Правка рабочей поверхности абразивного инструмента происходит при вращении магнитного индуктора с частотой n и одновременном перемещении стола станка с величиной подачи S с необходимым зазором h между рабочей поверхностью инструмента и металлическим карандашом.

Предлагаемое решение поясняется рисунком 2, на котором изображена схема реализации способа правки рабочей поверхности магнитного индуктора воздействием струи сжатого воздуха. На рисунке обозначено: 1 – шпиндель вертикально-фрезерного станка с ЧПУ, 2 – цилиндрический магнитный индуктор, 3 – стол станка, 4 – тиски, 5 – обрабатываемая деталь, 6 – сопло для подачи воздуха под давлением, 7 – удерживающее сопло устройство, S – подача стола станка, h – зазор между рабочей поверхностью индуктора и соплом, n – частота вращения шпинделя, δ – величина рабочего зазора.

В процессе обработки изделия с течением времени магнитный порошок изнашивается, вследствие чего необходима его правка. Правка рабочей поверхности абразивного инструмента происходит при вращении магнитного индуктора с частотой n и одновременном перемещении стола станка с величиной подачи S с необходимым зазором h между рабочей поверхностью инструмента и соплом для подачи сжатого воздуха.

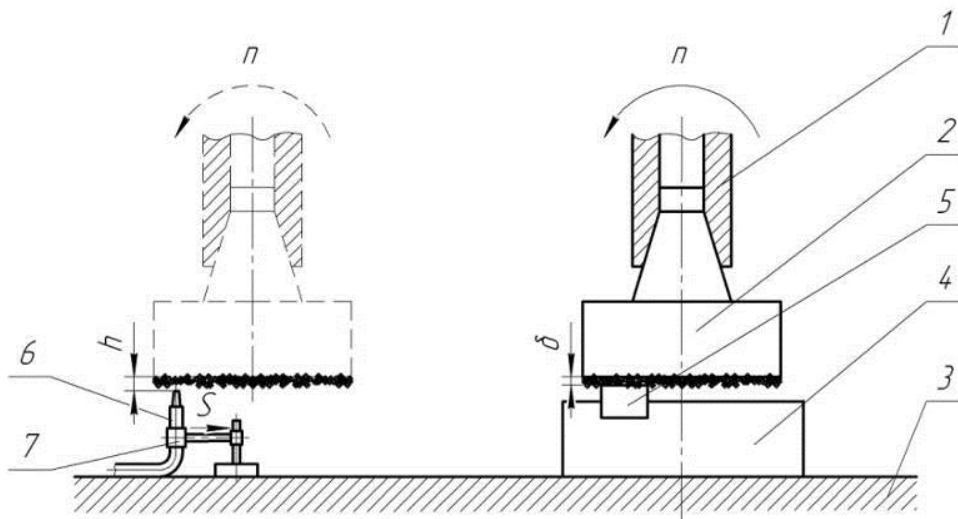


Рис. 2. Структурная схема установки для осуществления способа правки струей сжатого воздуха

Предлагаемое решение поясняется рисунком 3, на котором изображена схема реализации способа правки рабочей поверхности магнитного индуктора воздействием металлической струны. На рисунке обозначено: 1 – шпиндель вертикально-фрезерного станка с ЧПУ, 2 – цилиндрический магнитный индуктор, 3 – стол станка, 4 – тиски, 5 – обрабатываемая деталь, 6 – удерживающее струну устройство, 7 – металлическая струна, h – зазор между рабочей поверхностью индуктора и металлической струной, n – частота вращения шпинделя, δ – величина рабочего зазора.

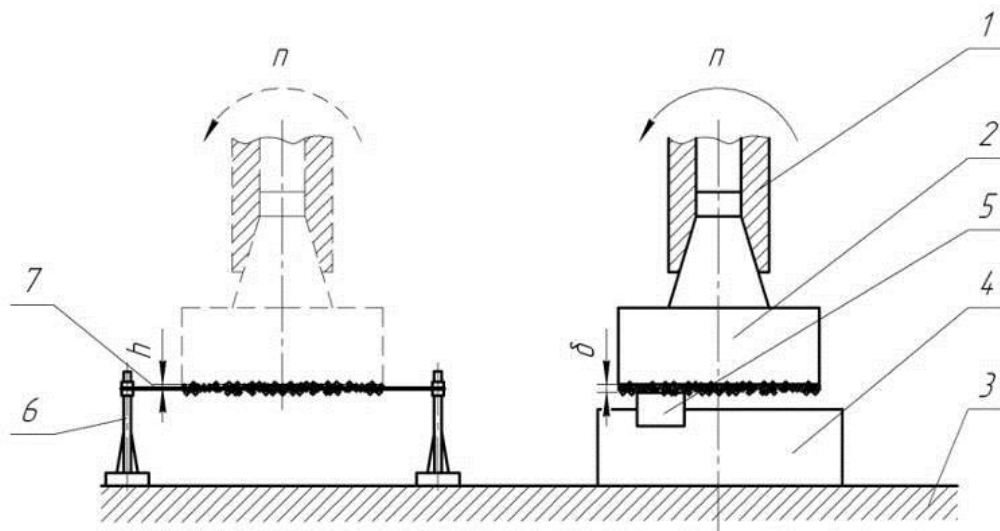


Рис. 3. Структурная схема установки для осуществления способа правки металлической струной

В процессе обработки изделия с течением времени магнитный порошок изнашивается, вследствие чего необходима его правка. Правка рабочей поверхности абразивного инструмента происходит при вращении магнитного индуктора с частотой n с необходимым зазором h между рабочей поверхностью инструмента и металлической струной.

Результаты и обсуждение

Таким образом, с использованием методологии поискового конструирования спроектированы технологические системы для процесса правки рабочей поверхности режущего инструмента для магнитно-абразивной обработки. Приведенная методика проектирования базируется на основных положениях системного подхода и элементах функционально-стоимостного анализа.

Выводы

В результате использования предлагаемых технических решений создается возможность управления состоянием и процессом правки рабочей поверхности магнитного индуктора. Достигается необходимая производительность и стабильность параметров качества обработки деталей, а также увеличивается стойкость абразивного инструмента.

Список литературы

1. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная обработка изделий и режущих инструментов. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
2. Татаркин Е.Ю., Татаркина Ю.Н. Поиск новых решений при проектировании технологических систем: учебное пособие. – Барнаул: Изд-во Алт. ГТУ им. И.И. Ползунова, 1999. – 168 с.
3. Хомич Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий: монография. – Минск: Изд-во БНТУ, 2006. – 217 с.

DESIGNING WAYS OF MODIFYING THE WORKING SURFACE OF THE MAGNETIC INDUCTOR USING THE METHODOLOGY SEARCH DESIGNING

Tatarkin E. Y., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: etatarkin@mail.ru

Ikonnikov A. M., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: iamagtu@mail.ru

Grebenkov R. V., Master's Degree student, e-mail: sigaset@yandex.ru

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

Abstract

The authors cover the methodology for designing technical solutions for the modifying of the working surface of the cutting tool for magnetic abrasive finishing. The search for a new technical solution consists of 4 phases. The first phase is allocated and analyzed the problem of the lack of systems to ensure quality parameters of the machined surface during the period of tool life. The second stage of the methodology identifies the relevance of the design of the devices and methods modifying cutting tools for magnetic abrasive finishing. The third phase of searching technical solutions is to obtain a set of solutions using a combinatorial method matrix opening A. Mol. In the end, in the fourth stage of designing the technical solutions of the methods of modifying the working surface of the magnetic inductor. Thus, using the methodology designed for search designing new technological systems for the process of modifying the working surface of the cutting tool for magnetic abrasive finishing.

Keywords

Magnetic-abrasive machining, designing the search, modifying the working surface, the durability of the cutting tool, the machining quality

УДК 621.9.02:539.4

РАСЧЁТ ПРОЧНОСТИ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН ПРИ ОБРАБОТКЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

*В.Н. КОЗЛОВ, канд. техн. наук, доцент
Х. ЧЖЭНЬДУН, магистрант
Ц. ЧЖАН, магистрант
Е.Г. ЛЕЩИНЕР, старший преподаватель
(НИ ТПУ, г. Томск)*

Козлов В.Н. – 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
e-mail: kozlov-viktor@bk.ru

Рассмотрено напряжённое состояние многогранных неперетачиваемых режущих пластин при токарной обработке титанового сплава ВТЗ-1. Нагрузка на рабочих поверхностях инструмента была задана исходя из результатов экспериментальных исследований распределения контактных нагрузок при обработке титанового сплава. Расчёт внутренних напряжений в режущей пластине из твёрдого сплава ВК8 был выполнен с использованием программного обеспечения ANSYS 14.0. Результаты расчётов показали, что при обработке титанового сплава режущими пластинами малой толщины у режущей кромки возникают большие сжимающие напряжения, превышающие предел прочности твёрдого сплава на сжатие. При этом на передней поверхности и нижней опорной поверхности пластины возникают растягивающие напряжения, приближающиеся к пределу прочности твёрдого сплава на растяжение, что увеличивает вероятность появления трещины. Это объясняет скол большого объёма инструментального материала в области, расположенной далеко от зоны действия силы резания. Увеличение толщины режущей пластины более 5 мм приводит к существенному уменьшению сжимающего напряжения у режущей кромки, а также к уменьшению растягивающих напряжений на передней и нижней поверхностях. В работе представлен график влияния толщины режущей пластины на величину наибольшего нормального напряжения у режущей кромки.

Ключевые слова: прочность инструмента, напряжения, износ инструмента, обработка титановых сплавов.

Введение

При черновой обработке титановых сплавов происходит интенсивное выкрашивание главной режущей кромки, а также велика вероятность скола режущей пластины. При сколе происходит хрупкое разрушение инструмента в области, удалённой от места действия силы резания, т.е. там, где нет внешних нагрузок на режущую пластину. Применение режущих пластин большой толщины уменьшает вероятность их хрупкого разрушения, но при этом возрастает и их стоимость.

Методика проведения исследований

Для определения оптимальной толщины режущей пластины были выполнены расчёты распределения главного нормального напряжения в режущей пластине из твёрдого сплава ВК8 при обработке труднообрабатываемого титанового сплава ВТ3-1. Расчёты выполнялись методом конечных элементов с использованием программного обеспечения ANSYS 14.0. Для увеличения точности расчётов в зоне контакта инструмента со стружкой и заготовкой внешние нагрузки рассматривались не как сосредоточенные, а как распределённые. Распределение этих внешних контактных нагрузок ранее было получено экспериментально с помощью метода разрезного реза и метода изменения ширины искусственной фаски на задней поверхности реза при свободном прямоугольном точении диска из титанового сплава ВТ3-1 [1]. Последний метод использовался при изучении распределения контактных нагрузок на фаске задней поверхности реза вблизи режущей кромки, т.к. составные пластины разрезного реза выкрашиваются, когда зазор, их разделяющий, приближается к режущей кромки на расстоянии менее 0,6 мм. При обработке титанового сплава ВТ3-1 на скоростях резания, используемых на производстве, возможно применение только твёрдого сплава для изготовления составных пластин, но его прочность недостаточна при больших контактных нагрузках на фаске задней поверхности у режущей кромки.

Расчёты внутренних напряжений в режущем клине выполнялись при неизменной геометрии режущей части и режиме резания: передний угол $\gamma=0^\circ$, главный задний угол $\alpha=10^\circ$; ширина искусственной фаски на задней поверхности, моделирующей износ по задней поверхности, $h_3=0,2$ мм, задний угол на этой фаске $\alpha_h=0^\circ$, скорость резания $v=1$ м\с, радиальная подача $s=0,21$ мм\об. Толщина h режущей пластины изменялась от 2 до 20 мм (рис. 1, 2).

Результаты и обсуждение

При резании титанового сплава резцом, оснащённым режущей пластиной малой толщины $h=2$ мм (рис. 1) рядом с режущей кромкой наблюдаются сжимающие главные нормальные напряжения очень большой величины ($\sigma_3 = -6866$ МПа), что превышает предел прочности твёрдого сплава ВК8 на сжатие ($\sigma_{\max} = -4200$ МПа). На практике это подтверждается разрушением режущих пластин толщиной менее 2 мм при обработке титанового сплава ВТ3-1.

На передней и нижней опорной поверхностях пластины возникает растягивающее напряжение ($\sigma_1 = +542$ МПа), приближающееся к пределу прочности твёрдого сплава ВК8 на растяжение ($\sigma_{\max} = +750$ МПа). Расположение этой зоны растягивающих напряжений на большом удалении от места приложения силы резания (около четырёх длин контакта стружки с передней поверхностью) объясняет скол большого объёма инструментального материала.

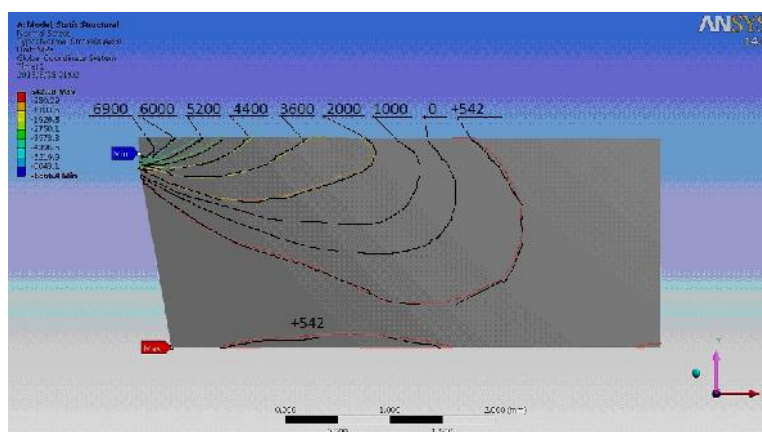


Рис. 1. Распределение главного нормального напряжения σ (МПа) в режущем клине при толщине пластины $h=2$ мм. ВТ3-1 – ВК8, $\gamma=0^\circ$, $v=1$ м\с, $s=0,21$ мм\об, $h_3=0,2$ мм

Большой градиент изменения главных нормальных внутренних напряжений сжатия в режущем клине от $\sigma_3 = -6900$ МПа до $\sigma_3 = -2000$ МПа наблюдается на фаске задней поверхности. Это приводит к разрушению участка соединения фаски износа с заточенной задней поверхностью инструмента. Результаты расчёта подтверждаются на практике ускоренным износом по задней поверхности инструмента во время приработки [7 - 10].

Увеличение толщины режущей пластины до 6 мм приводит к существенному уменьшению величины наибольшего главного нормального напряжения до $\sigma_3 = -3312$ МПа (рис. 2 а). На практике это подтверждается работоспособностью режущих пластин толщиной более 5 мм при обработке титанового сплава ВТ3-1 [2 - 6]. На рис. 2 а нижняя часть режущей пластины не показана, т.к. там отсутствуют существенные напряжения.

При черновой обработке титанового сплава иногда используются режущие пластины с толщиной 20 мм [9 - 14]. Применение таких пластин вызывает существенное уменьшение величины наибольшего сжимающего нормального напряжения до $\sigma_3 = -1100$ МПа вблизи режущей кромки (рис. 2 в).

При малой толщине режущей пластины наибольшая величина главного напряжения сдвига τ превышает предел прочности на сдвиг твёрдого сплава ВК8 ($\tau_{\max} = 2000$ МПа при $h = 2$ мм), а при её толщине более 6 мм существенно уменьшается (рис. 3), хотя кон-

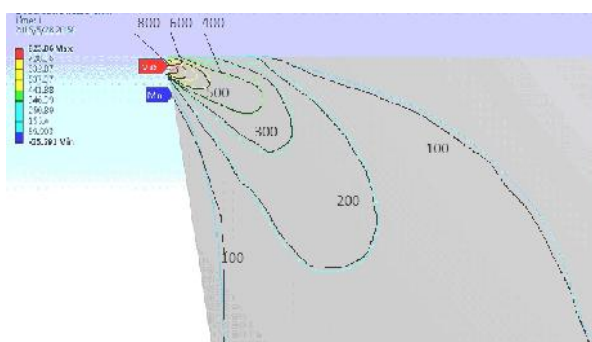
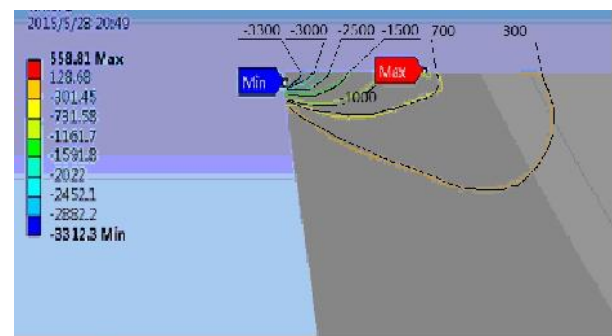
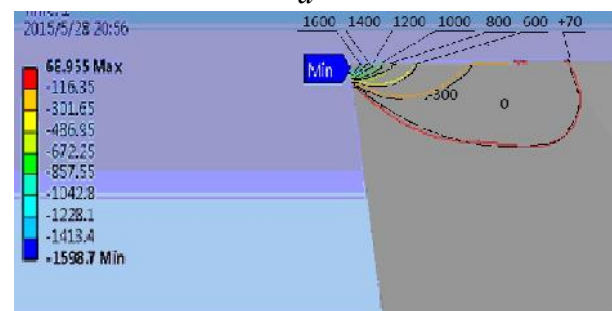


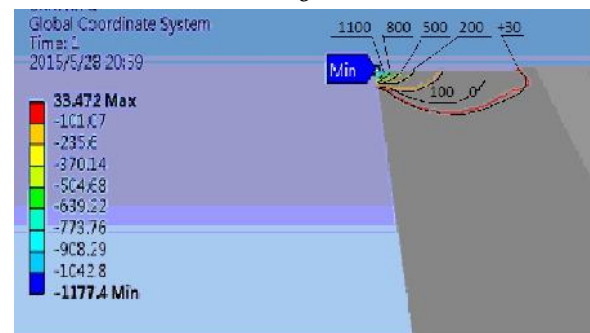
Рис. 3. Распределение главного напряжения сдвига τ (МПа) в режущем клине при толщине режущей пластины $h=6$ мм при обработке титанового сплава. ВТ3-1 – ВК8, $\gamma=0^\circ$, $v=1$ м/с, $s=0,21$ мм/об, $h_3=0,2$ мм



а



б



в

Рис. 2. Распределение главного нормального напряжения σ (МПа) в режущем клине при разной толщине режущей пластины h (мм) при обработке титанового сплава. ВТ3-1 – ВК8, $\gamma=0^\circ$, $v=1$ м/с, $s=0,21$ мм/об, $h_3=0,2$ мм.

а – $h=6$ мм; б – $h=12$ мм; в – $h=20$ мм

фигурация линий главных напряжений остаётся схожей.

В наибольшей степени толщина режущей пластины h влияет на величину наибольшего сжимающего напряжения в режущем клине при $h \leq 7$ мм (рис. 4). Дальнейшее увеличение толщины пластины существенно влияет на величину наибольшего сжимающего нормального напряжения, а при толщине режущей пластины более 12 мм изменений практически не происходит.

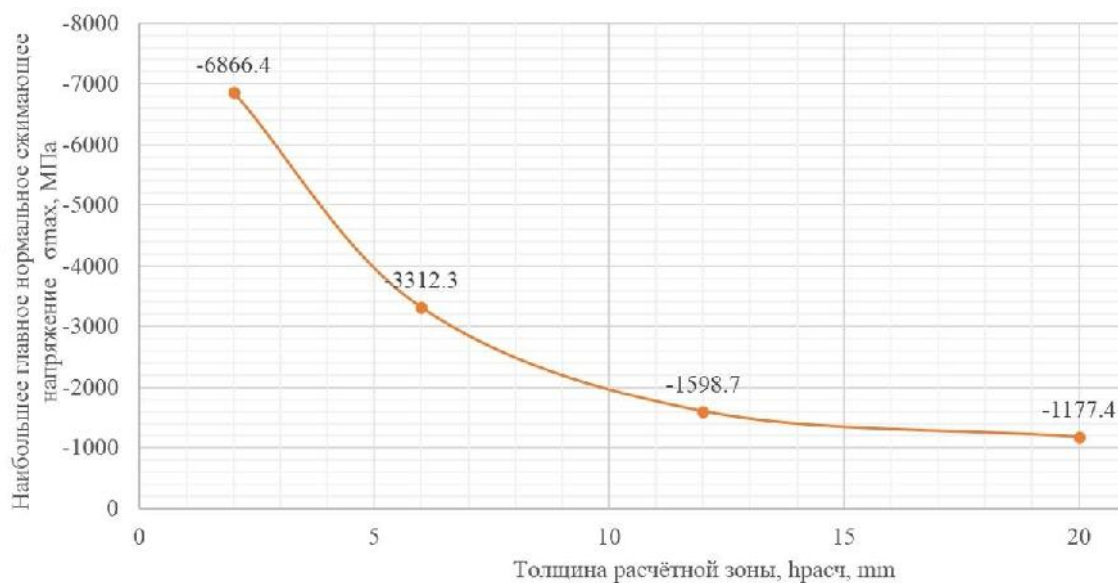


Рис. 4. Влияние толщины режущей пластины $h_{\text{расч}}$ (мм) на величину наибольшего сжимающего нормального напряжения в режущем клине $\sigma_{z \max}$ (МПа)

Выводы

1. Применение режущих пластин из твёрдого сплава ВК8 с толщиной менее 5 мм при черновой обработке титанового сплава ВТЗ-1 приводит к появлению у главной режущей кромки сжимающих напряжений, превышающих предел прочности твёрдого сплава на сжатие, что вызывает выкрашивание главной режущей кромки.
2. Применение режущих пластин из твёрдого сплава ВК8 с толщиной менее 5 мм приводит к появлению на передней поверхности на расстоянии четырёх длин контакта стружки с передней поверхностью растягивающих напряжений, приближающихся к пределу прочности твёрдого сплава на растяжение.
3. Применение режущих пластин из твёрдого сплава ВК8 с толщиной менее 5 мм приводит к появлению на нижней (опорной) поверхности режущих пластин растягивающих напряжений, приближающихся к пределу прочности твёрдого сплава на растяжение.
4. Наличие зон с большими растягивающими напряжениями на нижней опорной и передней поверхностях режущей пластины увеличивает вероятность развития трещины и скола большого объёма инструментального материала.
5. Толщина режущей пластины существенно влияет на величину наибольшего сжимающего напряжения у главной режущей кромки при толщине режущей пластины менее 7 мм.

Список литературы

1. Kozlov V.N., Li X. Influence of chip formation characteristics on flank contact load distribution in titanium alloy cutting // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 756: Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS2014). – P. 126–131.

2. *Афонасов А.И.* Обрабатываемость заготовок из титанового сплава ВТ22, прошедших горячую обработку с защитными покрытиями // Справочник. Инженерный журнал. – 2014. – № 8. – С. 18–21.
3. *Верещака А.С., Аникеев А.И., Дачева А.В.* Повышение эффективности резания труднообрабатываемых материалов // Технология машиностроения. – 2010. – № 3. – С. 17–22.
4. *Che-Haron C.H.* Tool life and surface integrity in turning titanium alloy // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – Vol. 118, iss. 1–3. – P. 231–237.
5. Study on machining of titanium alloys / N. Narutaki, A. Murakoshi, S. Motonishi, H. Takeyama // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1983. – Vol. 32 (1). – P. 65–69.
6. *Mohammadpour M., Razfar M.R., Jalili Saffar R.* Numerical investigating the effect of machining parameters on residual stresses in orthogonal cutting // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2010 – Vol. 18 – P. 378–389.
7. *Артамонов Е.В., Помигалова Т.У., Утешев М.Х.* Исследование напряжений, деформаций и прочности сменных режущих пластин методом конечных элементов / под общ. ред. М.Х. Утешева. – Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2002. – 147 с.
8. О взаимосвязи внутренних напряжений в инструментальных твердых сплавах с работоспособностью сборных инструментов / Е.В. Артамонов, Р.С. Чуйков, С.С. Чуйков, А.С. Ставышенко. – Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2014. – 161 с.
9. *Титов В.Б., Ревин Н.Н., Зубарев Ю.М.* Моделирование напряженно-деформированного состояния и оценка хрупкой прочности режущего инструмента // Инструменты и технологии. – 2004. – № 17–18. – С. 227–233.
10. *Shi B., Attia H.* Modeling the thermal and tribological processes at the tool-chip interface in machining // Machining Science and Technology. – 2009. – Vol. 13, iss. 2. – P. 210–226.
11. *Новиков Г.В., Снисаренко И.Н.* Повышение прочности и износостойкости режущего инструмента // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы 6 Международной научно-технической конференции, Курск, 18–20 декабря 2008. – Курск, 2008. – Ч. 1. – С. 218–224.
12. Сопротивление титановых сплавов резанию / С.В. Аршинов, В.А. Горелов, В.С. Кушнер, О.Ю. Бургонова // Вестник машиностроения. – 2015. – № 10. – С. 75–80.
13. *Vichev S., Kirov V., Hristov D.* Strength calculation of cutting tools // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1994. – Vol. 34, iss. 1. – P. 13–18.
14. *Oraby S.E., Hayburst D.R.* Tool life determination based on the measurement of wear and tool force ratio variation // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2004. – Vol. 44. – P. 1261–1269.
15. *Calamaz M., Coupard D., Girot F.* A new model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2008. – Vol. 48. – P. 275–288.

CALCULATION OF STRENGTH OF CUTTING INSERTS IN TITANIUM ALLOY MACHINING

Kozlov V.N., Ph.D. (Engineering), Associated professor, e-mail: kozlov-viktor@bk.ru

Huang Z., Master's Degree student, e-mail: hzd817@163.com

Zhang J., Master's Degree student, e-mail: 965075948@qq.com

Letshiner E.G., Senior Teacher, e-mail: letshiner@bk.ru

National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenina Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Abstract

Stressed state of cutting wedge in machining titanium alloy (Ti6Al2Mo2Cr) is considered. Distribution of contact loads on a face of a cutting tool was obtained experimentally with the use of a "split cutting tool". Calculation of internal stresses in indexable insert made from cemented carbide (WC8Co) was carried out with the help of ANSYS 14.0 software. It is shown that small thickness of a cutting insert leads to extremely high compressive stresses near the cutting edge, stresses that exceed ultimate compressive strength of cemented carbide. Face and base of the insert experience high tensile stresses, which approach to ultimate tensile strength of cemented carbide and increase probability of cutting insert destruction. If thickness of the cutting insert is bigger than 5 mm, compressive stresses near the cutting edge decrease, and tensile stresses on the face and base decrease to zero. Dependences of the greatest normal and tangential stresses on thickness of a cutting insert were found.

Keywords

strength of cutting tool, stresses, tool wear, tool flank, machining of titanium alloys

УДК 621.785:621.91

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РОТАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ,
РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ УДАРНЫХ НАГРУЗОК****Е.В. ПАВЛОВ, канд. техн. наук, доцент
(ЮЗГУ, г. Курск)****Павлов Е.В.** – 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94,
Юго-Западный государственный университет,
e-mail: evp.kstu@mail.ru

Ротационные детали, воспринимающие ударную знакопеременную нагрузку, должны обладать высоким уровнем твердости и пределом текучести. В значительной степени на механические свойства влияет структура и содержание легирующих элементов материалов ротационных деталей.

Также основополагающее значение оказывает выбор метода термической обработки, обеспечивающего наилучшее сочетание требуемых показателей прочности, твердости, ударной вязкости (трещиностойкости).

В стали твердостью 38...42 HRC, упрочненной по технологии изотермической закалки, трещины растут в два раза медленнее, чем в стали, упрочненной закалкой с отпуском. Для сталей твердостью менее 30 HRC, несмотря на высокие показатели ударной вязкости после изотермической закалки, характерно низкое сопротивление усталостному разрушению.

Ключевые слова: ротационные детали, механические свойства, термическая обработка, изотермическая закалка, ударная вязкость, усталостное разрушение

Введение

К материалам, используемым для изготовления соударяющихся деталей ударных машин (деталей погружных пневмоударников, породоразрушающего инструмента), предъявляются повышенные требования по обеспечению механических свойств. Для сохранения геометрических размеров при воздействии ударной нагрузки, наиболее нагруженные детали ударных механизмов (например, ударник или корпус коронки) должны обладать высоким уровнем твердости и пределом текучести. Высокие эксплуатационные показатели буровых машин зарубежных компаний являются результатом использования, в качестве материалов базовых деталей, сталей с большим сопротивлением усталостному разрушению [1, 2].

Как показали исследования, существенное влияние на показатели усталостной долговечности и работоспособность конструкции могут оказывать отклонения от стандартного содержания легирующих химических элементов материала деталей [1 - 5].

Кроме того, на уровень механических свойств ответственных ротационных деталей основополагающее значение оказывает выбор метода термической обработки. В зависимости от энергии удара и размеров деталей находят широкое применение два способа их термического упрочнения. Детали малых размеров обычно подвергают закалке с последующим низким отпуском [6]. Массивные детали, работающие при больших ударных нагрузках, упрочняют химико-термической обработкой – цементацией с последующей закалкой с низким отпуском.

Теория

Несмотря на схожесть химического состава, стали, применяемые для изготовления ротационных деталей буровых машин российскими и зарубежными производителями, существенно отличаются содержанием вредных примесей, распределением и формой присутствующих в них неметаллических включений.

Результаты работы по определению содержания состава материалов ротационных деталей, таких как букса, коробка клапана, седло клапана, трубка, ударник, цилиндр, показали, что в образцах деталей из стали 12ХН3А по ГОСТ 4543 содержится превышающее норму количество содержания серы, что в значительной степени соответствует результатам металлографических исследований (табл. 1), выполненных в работах [1, 2].

Таблица 1

Содержание легирующих химических элементов в исследуемой стали

Название элемента	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	Cu
Содержание легирующего элемента, %, в стали 12ХН3А по ГОСТ 4543	0,09...0,16	0,3...0,6	0,17...0,37	0,6...0,9	2,75...3,15	Не более 0,025	Не более 0,025	Не более 0,3
Фактическое содержание элемента, %	0,12	0,41	0,26	0,84	3,08	0,028	0,011	0,13

Данные микроструктурного анализа позволяют сделать вывод, что в используемых отечественными производителями сталях 45 и 12ХН3А имеет место наличие достаточно большого количества неметаллических включений. Загрязненность стали 45 неметаллическими включениями соответствует четвертому, а стали 12ХН3А – третьему баллу [2].

В местах неметаллических включений имеет место процесс возникновения усталостных трещин. Величина остаточных растягивающих напряжений увеличивается, трещины растут в размерах и распространяются в объеме металла с повышенной скоростью. Следовательно, увеличение количества неметаллических включений отрицательно влияет на показатели сопротивления усталостному разрушению сталей, как в низкопрочном, так и высокопрочном состоянии.

Неметаллические включения, присутствующие в стали, играют роль концентраторов напряжений, поэтому для изготовления качественных деталей нужно применять стали повышенной чистоты [7].

Из этого можно предположить, что, несмотря на близкий к норме химический состав сталей, в условиях многократного динамического нагружения, наличие в стали включений, нарушающих структуру, значительно снижает показатели усталостной долговечности и ресурса деталей.

Опыт изучения работы погружных пневмоударников показывает, что типичной причиной отказа их работы является усталостное разрушение детали «Ударник». Технология изготовления этой ответственной и нагруженной в конструкции машины детали предусматривает проведение перед финишным этапом термической обработки – закалки с отпуском. Как следует из статистических данных, традиционная технология не позволяет обеспечить соответствующие требованиям показатели состояния материала детали и приемлемый ресурс

работы погружных пневмударников, который при проходке скважин в грунтах средней крепости не превышает нескольких десятков часов.

В качестве альтернативной технологии упрочнения была применена изотермическая закалка: нагрев до температуры 860 °С, охлаждение в расплаве солей при температуре 350...450 °С, выдержка 40 мин.

Литературные данные свидетельствуют, что высокая надежность деталей ударных механизмов может быть обеспечена, если максимальная нагрузка в цикле не превышает половины предела текучести стали [8]. Таким образом, при термической обработке детали «Ударник» целесообразно использовать режимы, обеспечивающие предел текучести не менее 650 МПа.

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний показали, что необходимый уровень механических свойств стали может быть получен при температуре охлаждающего расплава соли равной 350 °С, табл. 2 [9].

Таблица 2

Показатели механических свойств стали после различных режимов термического упрочнения

Термообработка	Твердость HRC	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	KCV, Дж/с м ²	Долговечность при растяжении, мин	Долговечность при сжатии, мин
Закалка + отпуск 400 °С	43	1304	1501	8	46	27,3	3325
Закалка + отпуск 500 °С	40	870	1257	14	62	33,8	2675
Закалка + отпуск 600 °С	32	539	950	20	88	–	–
Изотермическая закалка при 350 °С	37	735	1160	24	50	41,5	4505
Изотермическая закалка при 450 °С	34	562	820	16	39	–	–

Сталь, упрочненная по технологии изотермической закалки, обладает более высокой усталостной трещиностойкостью, в полтора раза большей по сравнению со сталью в закаленном и отпущенном состоянии. Предлагаемая технология упрочнения материала деталей ударных машин может быть применена, если при их эксплуатации не возникают напряжения величиной более 400 МПа.

Один из возможных способов получения высоких прочностных свойств стали в сочетании с высоким уровнем трещиностойкости заключается в термической обработке с образованием смешанных структур. Формирования смешанной мартенсито-бейнитной структуры образуются при нагреве обрабатываемой детали до температуры аустенитизации, охлаждении в расплаве селитры до температуры, находящейся в диапазоне температур начала и окончания мартенситного превращения, с последующим нагревом до температуры соответствующей температурному интервалу бейнитного превращения, рис. 1 [1]. Время выдержки при каждой температуре должно быть достаточным, чтобы произошло выравнивание температуры в объеме детали.

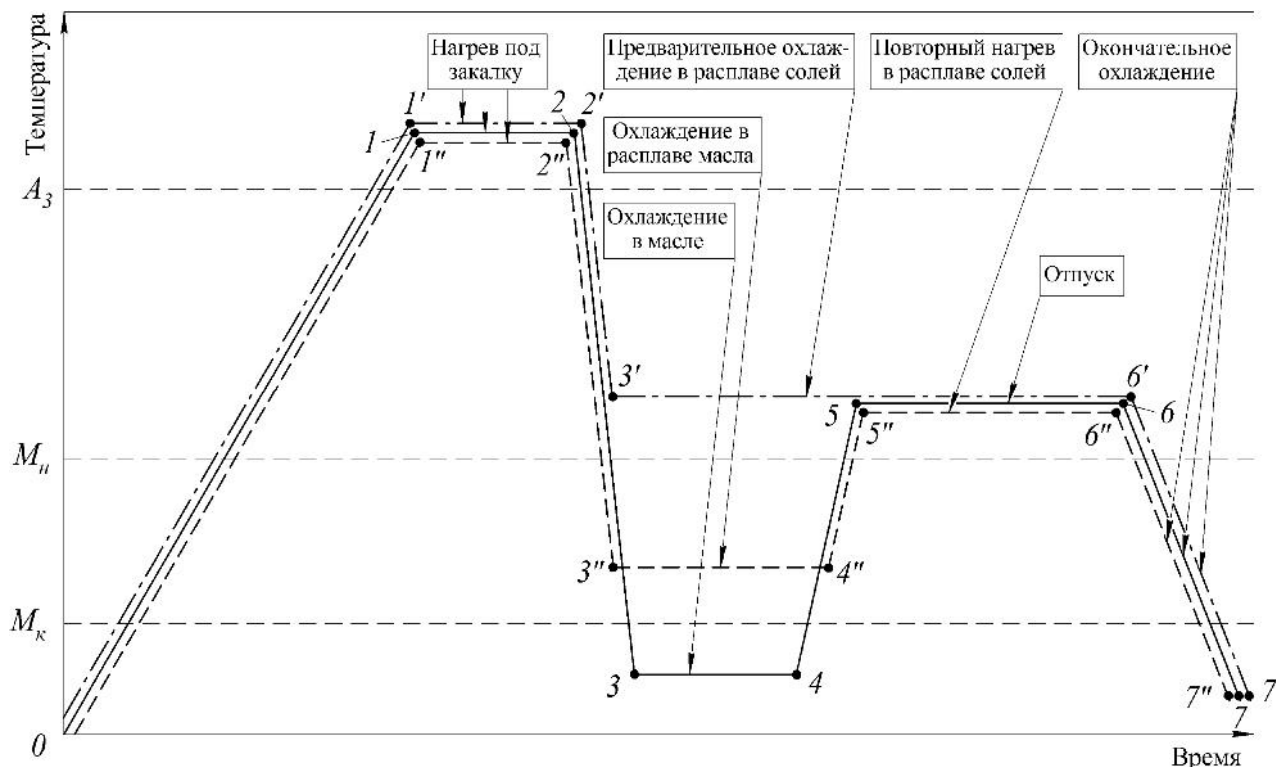


Рис. 1. Технологический процесс:

1) – закалка с отпуском 0-1-2-3-4-5-6-7; 2) – изотермическая закалка 0-1'-2'-3'-6'-7'; 3) – термическая обработка со смешанным мартенситно-бейнитным превращением аустенита 0-1''-2''-3''-4''-5''-6''-7''.

A_3 – температура полного аустенитного превращения; M_n и M_k – температуры начала и конца мартенситного превращения соответственно

Выбор определенного вида и режима термической обработки определяется балансом получаемых механических свойств материала. При изготовлении деталей буровых машин основными показателями, по которым производится оптимизация режимов термической обработки, являются прочность и твердость стали, ее сопротивление разрушению при воздействии динамических (ударная вязкость) и циклических нагрузок (трещиностойкость) [10-15].

Результаты проведенных исследований показывают, что в зависимости от требуемого уровня твердости и прочности целесообразно использовать различные виды термической обработки стали. Если сталь должна обладать высокой твердостью (более 52 HRC) единственным возможным видом термической обработки является закалка с низким отпуском. Для деталей, у которых необходимо обеспечить сочетание высокой твердости (42...52 HRC) с повышенной трещиностойкостью, наиболее рациональной является термическая обработка с получением смешанной структуры мартенситно-бейнитного типа [1, 2].

Выводы

В используемых отечественными производителями марках сталей содержится достаточно большое количество неметаллических включений, являющихся концентраторами напряжений и значительно снижающих сопротивление усталостному разрушению.

Работоспособность базовых деталей и ресурс буровых машин в значительной степени зависят от термического упрочнения материала деталей, обеспечивающего наилучшее сочетание требуемых показателей прочности, твердости, ударной вязкости (трещиностойкости).

Для обеспечения максимальных показателей трещиностойкости стали твердостью 38...42 HRC наиболее рациональной термической обработкой является изотермическая закалка. В стали, упрочненной по технологии изотермической закалки, трещины растут в два раза медленнее, чем в стали, упрочненной закалкой с отпуском. Следует отметить, что формирование в деталях, работающих в условиях ударно-циклического нагружения, структуры с низкой прочностью является нерациональным. Несмотря на высокие показатели ударной вязкости, сталь в низкопрочном состоянии (менее 30 HRC) обладает низким сопротивлением к усталостному разрушению.

Список литературы

1. Репин А.А., Алексеев С.Е., Попелюх А.И. Методы повышения надежности деталей ударных машин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 4. – С. 94–101.
2. Влияние неметаллических включений на долговечность ударных машин / А.А. Репин, С.Е. Алексеев, А.И. Попелюх, А.М. Теплых // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 6. – С. 74–83.
3. Репин А.А., Дружинин М.М. Резервы повышения предударной скорости в пневматических машинах ударного действия // Материалы конференции «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды». – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2009. – С. 273–280.
4. Доронин С.В., Косолапов Д.В. Расчеты деталей машин ударного действия для разрушения горных пород // Материалы конференции «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосферы». – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2009. – С. 188.
5. Косолапов Д.В. Напряженно-деформированное состояние инструмента и породы при их ударном взаимодействии // Материалы конференции «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды». – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2009. – С. 226–229.
6. Повышение конструктивной прочности деталей ударных машин термической обработкой / А.И. Попелюх, А.М. Теплых, Д.С. Терентьев, А.Ю. Огнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2009. – № 2. – С. 19–24.
7. Погружные пневмоударники высокого давления для открытых горных работ / А.А. Репин, Б.Н. Смоляницкий, С.Е. Алексеев, А.П. Попелюх, В.Н. Карпов, В.В. Тимонин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 5. – С. 157–167.
8. Соколинский В.Б. Машины ударного разрушения: (Основы комплексного проектирования). – М.: Машиностроение, 1982. – 184 с.
9. Попелюх А.И. Повышение надежности деталей ударных машин с помощью изотермической закалки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 4 (57). – С. 79–82.
10. Emel'yanov S.G. Influence of buildup in lathe processes on tool life and surface quality // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31, N 12. – P. 1276–1278.
11. Павлов Е.В. Исследование термомеханических процессов резания деталей погружных пневмоударников // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 5. – С. 150–158.
12. Павлов Е.В., Локтионова О.Г., Яцун С.Ф. Совершенствование технологии восстановления изделий с применением обработки инструментами, оснащенными сверхтвердыми материалами // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – № 1, ч. 1. – С. 120–127.

13. Технологическое оснащение процессов изготовления конструктивно сложных деталей: монография / Е.А. Кудряшов, С.Г. Емельянов, Е.И. Яцун, Е.В. Павлов. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 268 с.

14. *Kudryashov E.A.* Validated methods of parts machining for nonleaking hydraulic cylinders in drilling installations // *Journal of Mining Science*. – 2012. – Vol. 48, N 5. – P. 870–873.

15. *Pavlov E.V., Chervyakov L.M.* Some provisions of rational contact conditions for a composite cutting tool during turning operations on intermittent areas // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 788. – P. 102–107.

ENSURING MECHANICAL PROPERTIES OF THE ROTATIONAL PARTS WORKING IN THE CONDITIONS OF IMPACT LOADINGS

Pavlov E.V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: evp.kstu@mail.ru

Southwest State University, 94, 50 let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Russian Federation

Abstract

The rotational parts perceiving impact sign-variable loading have to possess the high level of hardness and a limit of fluidity. Substantially mechanical properties are influenced by structure and the maintenance of the alloying elements of materials of rotational parts.

The used steel brands contain rather large number of the nonmetallic inclusions which are concentrators of tension and considerably reducing resistance to fatigue failure. Besides, fundamental value renders a choice of a method of heat treatment. Operability of basic parts and a resource of boring machines substantially depend on thermal hardening of the material of parts providing the best combination of the demanded indicators of durability, hardness, impact strength.

For providing the maximum indicators of impact strength became with the hardness of 38 ... 42 HRC most rational heat treatment is isothermal training. In the steel strengthened on technology of isothermal quenching, cracks grow twice more slowly, than in the steel strengthened by quenching and tempering. It should be noted that formation in the parts working in the conditions of impact and cyclic loading, structures with a low durability is irrational. Despite high rates of impact strength, steel in a low-strength state (less than 30 HRC) possesses low resistance to fatigue failure.

Keywords

Rotational parts, mechanical properties, heat treatment, isothermal quenching, impact strength, fatigue failure

УДК 621.7.044

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ОБОДЬЕВ КОЛЕС

*Э.П. ГРИБКОВ*¹, канд. техн. наук, доцент
*Е.Ю. ГАВРИЛЬЧЕНКО*², начальник бюро
*Д.В. МЕРЕЖКО*², конструктор
(¹ ДГМА, г. Краматорск, Украина,
² ПАО НКМЗ, г. Краматорск, Украина)

Грибков Э.П. – 84313, Украина, Донецкая обл., г. Краматорск, ул. Шкадинова, 72,
Донбасская государственная машиностроительная академия,
e-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Рассмотрена математическая модель процесса профилирования ободьев колес, которая основана на разбиении очага деформации на множество элементарных объемов с последующим анализом упруго-пластического изгиба каждого сечения. На основе проведенных расчетов установлено качественное и количественное влияние толщины металла, радиуса обода и высоты профиля на энергосиловые параметры процесса. Для определения правомерности принятых допущений и точности расчета энергосиловых параметров была разработана конечно-элементная модель. В результате анализа полученных решений выявлены уровни деформаций и напряжений, а также характер нарастания нагрузок. Погрешность расчета силы профилирования не превысила 6,7%.

Ключевые слова: профилирование, обод, колесо, математическая модель, упруго-пластическая деформация, ротационная обкатка

Введение

Основным направлением производства ободьев колес автотранспортных средств из листового металла является технология профилирования, позволяющая изменять форму сварной пустотелой обечайки, придав ей геометрию и размеры готового изделия – автомобильного колеса. Данная технология осуществляется на профилировочных машинах. ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» была выполнена реконструкция такой машины, а именно – ИБО-130 ПАО «КрКЗ». Основная цель улучшения характеристик данной машины заключалась в повышении точности позиционирования рабочих роликов на основе единой АСУ, эффективная работа которой невозможна без точного математического аппарата, описывающего протекание технологического процесса.

Наиболее точным из методов исследования процессов является метод конечных элементов, который был рассмотрен в работах [1-5] применительно к гибке профилей. Наряду с этим, целый ряд вопросов, связанных с повышением эффективности промышленных условий реализации исследуемого процесса является неизученным или изученным недостаточно полно. Весьма немаловажным, помимо расчета энергосиловых параметров и проектирования собственно технологии [6], является дальнейшее совершенствование механического оборудования для профилирования ободьев колес.

Цель работы заключается в установлении степени влияния конструктивных параметров оборудования и характеристик заготовки на энергосиловые параметры профилирования

колес на основе развития математических моделей напряженно-деформированного состояния металла при реализации процесса.

Материалы исследования

В основу рассматриваемой математической модели процесса профилирования было положено численное рекуррентное решение конечно-разностной формы условия статического равновесия выделенного элементарного объема металла в очаге деформации.

Согласно принятой расчетной схеме полоса толщиной S подвергается поперечному упруго-пластическому изгибу на радиус R . Используя принцип суперпозиционного подхода и рассматривая с учетом этого только один участок полосы, характеризующийся наличием постоянного по величине внутреннего радиуса кривизны R , осуществим разбиение всего объема выделенного участка на конечное множество k_{Rh} элементарных объемов, имеющих порядковые номера верхних и нижних граничных поверхностей, соответственно j и $(j+1)$ (рис. 1). Толщина каждого отдельного элементарного объема Δh и геометрическая координата z_j для каждой отдельной j -ой граничной поверхности с учетом условия, что начало координаты принадлежит поверхности, являющейся средней по толщине всей полосы, определяется по методике, изложенной в работе [7].

Величины изгибающего момента M и растягивающих сил N можно определить по следующим зависимостям:

$$N = \int_{-S/2}^{S/2} \sigma_z dz = \sum_{j=2}^{k_{Rh}+1} \frac{\sigma_j + \sigma_{(j-1)}}{2} \Delta S; \tag{1}$$

$$M = \int_{-S/2}^{S/2} \sigma_z \cdot z \cdot dz = \sum_{j=2}^{k_{Rh}+1} \frac{\sigma_j + \sigma_{(j-1)}}{2} \left[\frac{\Delta S^2}{2} \sigma_j + \frac{2\Delta S^2}{3} \frac{\sigma_{(j-1)} + \sigma_j}{2} + z_j \right] \Delta S =$$

$$= \sum_{j=2}^{k_{Rh}+1} \frac{\sigma_j + \sigma_{(j-1)}}{2} \left[z_j + \frac{1}{3} \frac{2\sigma_{(j-1)} + \sigma_j}{\sigma_{(j-1)} + \sigma_j} \Delta S \right] \Delta S. \tag{2}$$

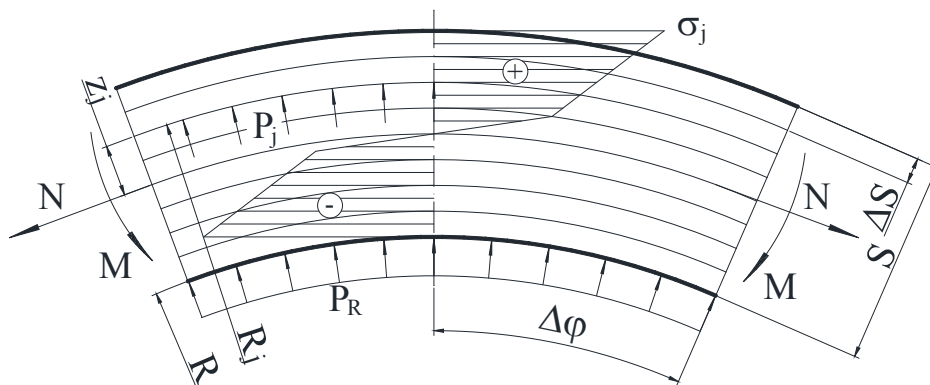


Рис. 1. Расчетная схема элементарного объема при реализации процесса гибки

В самом общем случае решение уравнений (1) и (2), сводится к определению нормальных тангенциальных напряжений σ_j , неразрывно связанных с соответствующими пока-

зателами деформации растяжения-сжатия ε_j , которые в свою очередь можно определить на основе зависимостей, изложенных в работе [7].

Определение нормальных радиальных напряжений P_j и нормальных контактных напряжений P_R , имеющих место на контакте деформирующего инструмента с полосой было осуществлено из условия статического равновесия выделенного элементарного объема в очаге деформации (рис. 1):

$$2 \int_0^{\Delta\varphi} P_j \cdot \cos\varphi \cdot R_j \cdot d\varphi = 2 \int_{j=2}^{k_{Rh+1}} \frac{\sigma_j + \sigma_{(j-1)}}{2} \Delta S \cdot \sin \Delta\varphi, \quad (3)$$

откуда величина нормальных радиальных напряжений:

$$P_j = \sum_{j=2}^{k_{Rh+1}} \frac{\sigma_j + \sigma_{(j-1)}}{2} \frac{\Delta S}{R_j}, \quad (4)$$

где $R_j = R + S/2 + z_j$ – текущий радиус рассматриваемой граничной поверхности.

Аналогично для нормальных контактных напряжений:

$$P_R = \sum_{j=2}^{k_{Rh+1}} \frac{\sigma_j + \sigma_{(j-1)}}{2} \frac{\Delta S}{R}. \quad (5)$$

Для определения интегральных характеристик процесса очаг деформации разбивался на конечное множество элементарных объемов по направлению движения заготовки с последующим анализом напряженно-деформированного состояния для каждого из них. Расчетная схема представлена на рис. 2.

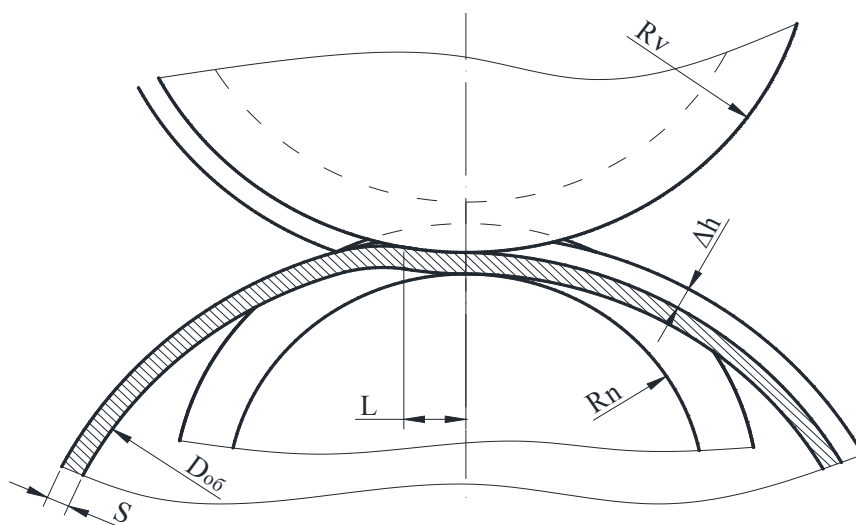


Рис. 2. Расчетная схема очага деформации

Протяженность очага деформации была определена по следующей итерационной процедуре:

$$L = R_{np} \sin \alpha = R_{об} \sin \beta; \quad \alpha = 1 \dots \pi/4; \quad \beta = \arcsin \left(\frac{R_{np}}{R_{об}} \sin \alpha \right), \quad (6)$$

где $R_{np} = 2R_v R_n / (R_v + R_n)$ – приведенный радиус роликов.

Степенная форма аналитического описания была использована при расчете текущего значения высоты прокатываемого профиля:

$$h_x = h(x/L)^{a_h}, \quad (7)$$

где a_h – степенной показатель формы очага деформации (для роликов принимается $a_h=2$); x – текущая координата рассматриваемого сечения.

Схема решения включала два внешних цикла.

На первом цикле была организована процедура расчета параметров процесса в зависимости от минимально необходимого числа оборотов обода:

$$n_{об} = \frac{\Delta h n_g R_{np}}{V_n 30 D_{об}}, \quad (8)$$

где Δh – суммарное обжатие профиля; V_n – скорость подачи верхнего ролика; n_g – частота вращения роликов (об/мин); $D_{об}$ – диаметр обода колеса.

На втором, внутреннем, цикле определялись параметры процесса в течение одного оборота обода, при этом обжатие на текущем i -ом шаге (например, 15°) определялось по следующей зависимости

$$\Delta h_{об_i} = \sum \frac{30 D_{об}}{n_g R_{np}} V_n. \quad (9)$$

В целом, представленные выше зависимости в сочетании с расчетом параметров сечения заготовки составили полный алгоритм по автоматизированному расчету энергосиловых параметров процесса профилировки ободьев колес.

Для проверки адекватности предложенной численной математической модели была разработана конечно-элементная модель процесса. При этом использовалась расчетная схема, которая представляла собой заготовку и два рабочих ролика с калиброванной бочкой. Непосредственно моделирование процесса было выполнено для заготовки диаметром 524 мм из стали 08сп. Модель имела следующие граничные условия: верхний ролик имел одну вращательную степень свободы и перемещения, нижний ролик – только одну вращательную степень свободы.

Результаты и обсуждение

В результате реализации численной модели были получены зависимости силы профилирования от толщины металла обода колеса (рис. 3,а). Из анализа видно, что с увеличением толщины листов сила увеличивается. Так, например, при увеличении толщины листа с 3 мм до 7 мм (в 2,3 раза) сила возрастает с 264 кН до 967 кН (в 3,7 раза). На рис. 3,б представлены расчетные зависимости силы профилирования от радиуса роликов, при этом видно, что с увеличением радиуса роликов сила возрастает. При увеличении радиуса ролика с 200 до 400 мм сила возросла в 2,5 раза.

Из проведенных расчетов была определена максимальная сила профилирования, которая составила 1,2 МН, при этом момент – 3400 Нм, а мощность – 9,7 кВт. Эти данные были использованы при реконструкции машины ИБО-130. Сила профилирования при конечно-элементом моделировании составила 1,12 МН, что ниже аналогичного значения, полученного при численном моделировании на 6,7%, что свидетельствует об адекватности предложенной модели и возможности её использования при проектировочных расчетах.

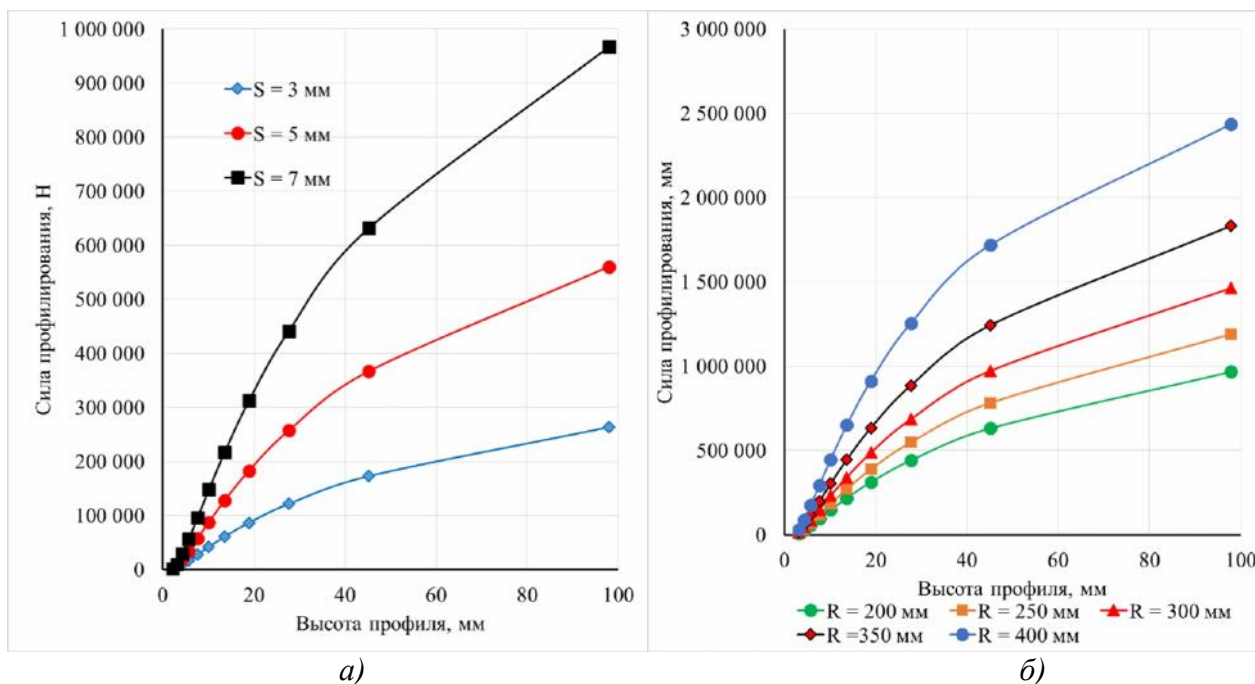


Рис. 3. Расчетные распределения силы профилирования от высоты профиля в зависимости от толщины металла (а) и радиуса формирующих роликов (б)

В результате расчетов были получены поля напряжений и деформаций, которые представлены на рис. 4. Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы: наибольшая деформация наблюдается в местах сгиба металла; уровень деформаций металла не превысил 3%, что позволяет с некоторым предположением пренебречь упрочением материала; напряжения при реализации процесса не превысили 285 МПа, что на 17% выше предела текучести; сила профилирования нарастает плавно и с протеканием процесса постепенно снижается.

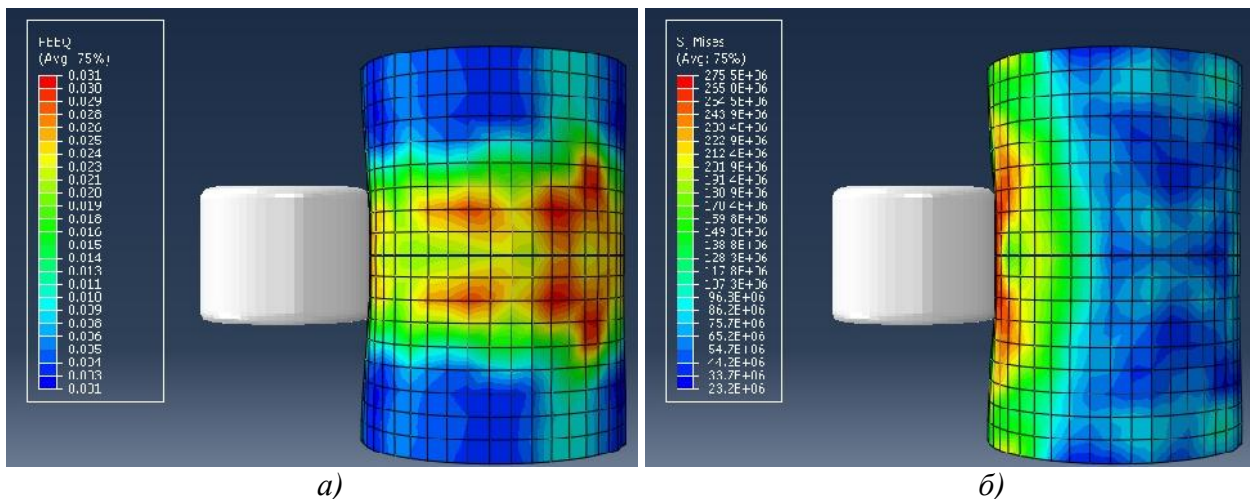


Рис. 4. Поле эквивалентных деформаций (а) и эквивалентных напряжений (б)

Выводы

Разработана численная математическая модель процесса профилирования колес, в результате которой установлено влияние толщины обода колеса и радиуса роликов на силу профилирования.

Список литературы

1. *Илюшкин М.В., Филимонов В.И., Марковцева В.В.* Моделирование контактных взаимодействий роликового инструмента с полкой профиля швеллерного типа при изготовлении гнутых профилей методом интенсивного деформирования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 1 (2). – С. 397–400.
2. Mathematical simulation of the forming of a round welded steel tube into a square profile in four-roll passes / К.Е. Akopyan, A.V. Kolobov, D.A. Rodichev, M.S. Seleznev, V.S. Trusov, E.S. Fedotov, V.S. Yusupov // Russian Metallurgy (Metally). – 2012. – N 5. – P. 375–379.
3. *Lindgren M., Edberg J., Lindgren L.-E.* Roll forming // Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. – London: Springer-Verlag, 2014. – P. 1–19. – doi: 10.1007/978-1-4471-4976-7_43-1.
4. *Paralikas J., Salonitis K., Chryssolouris G.* Robust optimization of the energy efficiency of the cold roll forming process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 69, iss. 1. – P. 461–481. – doi: 10.1007/s00170-013-5011-0.
5. *Park H.S., Nguyen T.T.* Optimization of roll forming process with evolutionary algorithm for green product // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2013. – Vol. 14, iss. 12. – P. 2127–2135. – doi: 10.1007/s12541-013-0288-3.
6. Методика расчета технологических параметров при профилировании / В.П. Шеногин, Н.В. Тепин, В.А. Храбров, А.С. Постнов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – № 4. – С. 35–37.
7. *Дунаевский В.И., Нотченко В.Д.* Машины для правки тонкого листового и полосового проката. – М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1986. – 36 с.

MATHEMATICAL MODELING OF WHEEL RIMS PROFILING

Gribkov E. P.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: amm@dgma.donetsk.ua
Gavril'chenko E. Yu.², Head of Design Bureau, e-mail: gavrilchenko@nkmz.donetsk.ua
Merezhko D. V.², Designer, e-mail: bhps@nkmz.donetsk.ua

¹ Donbass State Engineering Academy, 72 Shkadinova, Kramatorsk, Donetsk region, 84313, Ukraine

² PJSC "Novokramatorsky Mashinostroitelny Zavod", 5 Ordzhonykidze, Kramatorsk, Donetsk region, 84305, Ukraine

Abstract

A mathematical model of the profiling wheel rims, which is based on decomposition of the deformation zone on the set of elementary volumes, followed by analysis of elastic-plastic bending of each section are developed. On the basis of calculations the quantitative and qualitative effect of the sheet thickness, the radius of the rim and the height profile on the power parameters of the process are installed. Finite-element model was developed to determine the legitimacy of the assumptions and the accuracy of power parameters calculation. As a result of solutions analysis the identified levels of strain and stress, as well as the nature of the loads increase. Profiling force calculation error does not exceed 6.7%.

Keywords

profiling, rim wheels, mathematical model, elastic-plastic deformation, rotary running

УДК 621.922.02:621.928

**ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОИЗВОДСТВА ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ФОРМОЙ
И ОРИЕНТАЦИЕЙ ЗЁРЕН***

В.А. КОРОТКОВ^{1,2}, канд. техн. наук, доцент
Е.М. МИНКИН², инженер
(¹НИ ТПУ, г. Томск, ²КузГТУ, г. Кемерово)

Коротков В.А. – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28,
Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
e-mail: korotkov-va@mail.ru

Стандартные шлифовальные круги лишь частично используют свои эксплуатационные возможности и этот недостаток в значительной мере связан с отсутствием оптимальной геометрии режущих элементов кругов, то есть зёрен, которые имеют произвольную форму и хаотичное расположение в теле инструмента, а значит и произвольную геометрию. Рассматривается оборудование для изготовления принципиально новых конструкций шлифовальных кругов с контролируемой формой и ориентацией зёрен (приборов для сепарации зёрен по признаку формы, смесительных агрегатов, приборов для ориентации зёрен, оборудование для формования кругов, приборов для осуществления термообработки). В состав перечисленных приборов входит оборудование, которое позволяет добавить в стандартную технологию изготовления шлифовальных кругов два новых процесса – сепарацию шлифовальных зёрен по признаку формы и ориентацию зёрен в теле инструмента в заданном направлении. Благодаря этому шлифовальные зёрна с более полной отдачей начинают использовать свои потенциальные возможности, тем самым повышая работоспособность инструмента в целом.

Ключевые слова: шлифовальные круги, форма шлифовальных зёрен, сепарация зёрен, подготовка абразивных смесей, ориентирование зёрен, формование и термообработка кругов.

Введение

Проведенный патентно-литературный анализ показывает стремление многих фирм, компаний и научно-исследовательских учреждений создать новые высокоэффективные конструкции шлифовальных инструментов, поскольку существующие конструкции имеют низкий к.п.д. своего использования, колеблющийся от 10 до 20 % их потенциальных возможностей. В этом контексте перспективным направлением повышения работоспособности шлифовальных инструментов является упорядочение формы и расположения зёрен в теле шлифовальных инструментов. Такой подход позволяет сформировать для каждого зерна более благоприятные условия работы. В таких условиях каждое зерно более эффективно срезает обрабатываемый материал, повышая тем самым эффективность работы инструмента в целом. Известны попытки решить этот вопрос. Например, разработаны конструкции шлифовальных кругов, состоящих из зёрен изометрической формы

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта по программе «У.М.Н.И.К.» (400 тыс. руб. на два года)

(сферокорунда) или известны конструкции шлифовальных лент и шкур, у которых зёрна ориентированы специальным образом (перпендикулярно к гибкой основе). Однако инструменты, у которых целенаправленно контролируются одновременно два параметра (форма и ориентация зёрен) пока неизвестны ни в РФ, ни в зарубежных странах.

Такой работой в течение длительного времени занимаются на кафедре металлорежущих станков и инструментов КузГТУ. К настоящему времени разработаны технологии по производству шлифовальных кругов из зёрен с контролируемой формой и ориентацией и разработан комплекс оборудования и приборов для производства таких кругов. С помощью данного оборудования изготовлены опытные партии шлифовальных кругов новых конструкций, которые прошли лабораторные испытания и подтвердили свои преимущества перед стандартными инструментами.

Разработка технологии и конструирование оборудования для производства экспериментальных кругов

Технология производства новых кругов отличается от стандартной тем, что в неё добавлены две новых операции – сепарация зёрен с требуемой формой из общей массы абразива и ориентация зёрен в теле инструмента.

Для сепарации зёрен по признаку формы из общей массы абразива использованы конструкции сепараторов, основанных на использовании вибрационного и электростатического эффектов, на которые получены патенты на изобретения (см. [5, 6]).

Для подготовки формовочной массы (смеси зёрен со связкой) использована смешительная установка для приготовления абразивных масс, изготовленная по патенту на изобретение [9].

Ориентация шлифовальных зёрен в теле круга в процессе его формования осуществляется за счет специального способа и устройства [7, 8], основанных на применении электростатического поля.

Количественная оценка формы зёрен и оценка их ориентации осуществлялась на сконструированных приборах и с помощью разработанного программного обеспечения [2, 3, 10, 11, 12, 13].

Для окончательного формования шлифовальных кругов использован гидравлический пресс, а термообработка кругов осуществлялась по стандартной технологии в камерной электропечи.

Результаты и обсуждение

Изготовлены опытные партии отрезных шлифовальных кругов с разной формой зёрен и ориентацией в теле инструмента, которые прошли комплексные лабораторные испытания по оценке их режущей способности, износа, стойкости, качества обработки, тепловых явлений при отрезке деталей. Полученные результаты говорят о том, что режущая способность новых конституций инструментов (производительность обработки) – выше на 20 – 30%, чем у стандартных инструментов, а износ и шероховатость обрабатываемой поверхности ниже, соответственно на 10-15% и на 30-40%, чем при обработке типовыми инструментами.

Себестоимость при производстве новых инструментов на 5-10% выше, чем у аналогов, но она компенсируется их более высокими эксплуатационными свойствами.

Параллельно с испытаниями новых инструментов ведется модернизация оборудования по их производству (совершенствуется конструкция устройства для ориентации зёрен в круге под некоторым углом наклона к плоскости резания в направлении вращения круга;

рассматриваются варианты конструкций сепараторов с повышенной производительностью отсева и др.)

Ввиду актуальности описанной тематики под дальнейшие исследования по данному направлению выделено финансирование (выигран грант) по программе «У.М.Н.И.К» (400 тыс. руб. на два года).

Выводы

Разработана технология и предложено оборудование для изготовления шлифовальных кругов с контролируемой формой и ориентацией зёрен. Благодаря такому подходу удалось создать конструкции шлифовальных кругов, обладающих повышенными эксплуатационными возможностями.

Список литературы

1. *Коротков В.А.* Повышение эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов. – М.: Машиностроение, 2009. – 178 с.
2. *Коротков В.А., Видин Д.В., Рыжикова А.В.* Лабораторное оснащение и методика количественной оценки формы шлифовальных зёрен // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 3. – С. 71–76
3. *Коротков В.А., Минкин Е.М.* Взаимосвязь геометрии и напряжений в ориентированных шлифовальных зёрнах // Справочник. Инженерный журнал. – 2014. – № 8. – С. 46–49.
4. *Коротков В.А., Минкин Е.М.* Геометрия и напряжённое состояние ориентированных зёрен с контролируемой формой // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 2 (63). – С. 62–77.
5. Пат. 2236303 РФ, МПК7 В03С7/08. Устройство для сепарации шлифовальных зёрен по форме / Коротков А.Н., Костенков С.А., Люкшин В.С., Прокаев Н.В.; заявитель и патентообладатель Коротков А.Н., Костенков С.А., Люкшин В.С., Прокаев Н.В. – № 2003113373; заявл. 06.05.2003; опубл. 20.09.2004, Бюл. № 26.
6. Патент 2248851 Российская Федерация, МПК7 В 07 В 1/40, 13/00. Вибрационный сепаратор / А.Н. Коротков, Г.М. Дубов, В.Г. Баштанов. – № 2003129945; заявл. 08.10.2003; опубл. 27.03.2005, Бюл. № 9.
7. Патент 2369474 Российская Федерация, МПК7 В 24 Д 18/00. Способ изготовления шлифовальных кругов с ориентированными зёрнами / В.А. Коротков. – Опубл. 10.10.2009, Бюл. № 28.
8. Патент 2349446 Российская Федерация, МПК7 В 24 Д 18/00. Способ изготовления шлифовальных кругов повышенной прочности на бакелитовой связке / В.А. Коротков. – опубл. 20.03.2009, Бюл. № 8.
9. Патент 2221632 Российская Федерация, МПК7 С 1 В 01 F 9/12, В 28 С 5/32. Смесительная установка для приготовления абразивных масс / А.Н. Коротков, Д.Б. Шатко. – Заявл. 04.12.2002; опубл. 20.01.2004, Бюл. № 2.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011614263. Угол наклона шлифовальных зёрен / В.А. Коротков, Е.М. Минкин. – № 2011612443; заявл. 8.04.11; опубл. 30.05.11.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616506. Геометрические модели шлифовальных зёрен / В.А. Коротков, Е.М. Минкин. – № 2011616506; заявл. 07.05.2011; опубл. 27.06.2011.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615114. Передние углы ориентированных шлифовальных зерен / В.А. Коротков, Е.М. Минкин. – № 2011613167; заявл. 4.05.11; опубл. 29.07.11.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015619877. Графическое построение геометрических моделей шлифовальных зерен / В.А. Коротков, Е.М. Минкин. – № 2015619877; заявл. 16.07.15; опубл. 15.09.2015.

14. *Korotkov V.A., Minkin E.M.* Forecasting of operational indicators of grinding tools with the controlled form and orientation of abrasive grains // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 91. – P. 012041. – doi: 10.1088/1757-899X/91/1/012041.

15. *Korotkov V.A., Petrushin S.I.* Research of operational characterizations of cutting discs with oriented abrasive grains // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 224–230. – doi : 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.224.

EQUIPMENT FOR PRODUCING OF GRINDING WHEELS WITH CONTROLLED FORM AN ORIENTATION OF ABRASIVE GRAINS

Korotkov V. A. ^{1,2} Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: korotkov-va@mail.ru
Minkin E. M. ², Engineer, e-mail: minkin.e.m@gmail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

² Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 28 Vesennaya st., Kemerovo, 650000, Russian Federation

Abstract

Standard grinding wheels using their operational capabilities only partially and this deficiency is largely linked to a lack of optimum geometry of the cutting elements of circles, that is abrasive grains which have uncontrolled form and a chaotic orientation in a tool body. The equipment for production of essentially new designs of grinding wheels with a controlled form and orientation of abrasive grains is considered (devices for the form separation of abrasive grains, mixing units, devices for orientation of grains, the equipment for pressing of grinding wheels, devices for heat treatment implementation). Thanks to it abrasive grains with fuller return start using the potential opportunities, thereby increasing operability of the tool in general.

Keywords

Grinding wheels, form parameter of abrasive grains, separation of abrasive grains, preparation of abrasive mixture, orientation of abrasive grains, pressing and hardening of grinding wheels

УДК 621.9.02

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СВЕРЛ С СМП ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ
ПРОФИЛЯ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ ПЛАСТИНЫ****А.А. БАКАНОВ, канд. техн. наук
(КузГТУ, г. Кемерово)****Баканов А.А.** – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28,
Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
e-mail: alekbakanov@yandex.ru

При обработке отверстий в объемно-закаленных рельсах сборными сверлами со сменными многогранными пластинами из твердого сплава возникает проблема – низкая работоспособность данного типа инструмента. В статье представлена основная причина этого – наличие неуравновешенной радиальной составляющей силы резания. Предложена методика проектирования профиля режущей кромки пластины, основанная на компенсации неуравновешенной радиальной составляющей силы резания на каждом элементарном рабочем участке режущей кромки пластины за счет формирования угла наклона режущей кромки в плоскости резания, позволяющего минимизировать неуравновешенную радиальную составляющую силы резания на каждом этом участке. Представлена блок-схема для расчета профиля режущей кромки пластины. Данная методика позволяет повысить работоспособность сборных сверл в среднем на 30%.

Ключевые слова: сборное сверло, повышение работоспособности, сменная многогранная пластина, профиль режущей кромки, угол наклона режущей кромки, уравнивание радиальной составляющей силы резания.

Введение

В настоящее время срок службы ответственных деталей машин в большинстве случаев увеличивается за счет повышения их механических свойств: изгибной прочности; твердости; способности материала выдерживать длительные контактные нагрузки; стойкости к циклическому нагружению и др. При этом остро встает вопрос инструментального обеспечения производства. Для обработки изделий с такими свойствами применение инструмента из быстрорежущей стали нецелесообразно (ввиду его низкой стойкости), а зачастую и просто невозможно. Наиболее рациональным является применение сборного инструмента (фрезы, сверла, зенкеры, расточные блоки и т.п.) с механическим креплением сменных многогранных пластин (СМП) из твердого сплава. Но результаты использования такого инструмента (в частности, при сверлении объемно-закаленных рельсов) показали его невысокую работоспособность.

Анализ причин низкой работоспособности сборных сверл СМП при обработке отверстий в объемно-закаленных рельсах показал, что на режущих кромках пластин существуют участки с неблагоприятными, с точки зрения осуществления процесса резания, геометрическими параметрами [1, 2]. А анализ силового нагружения режущих пластин сверла [3 - 5] показал, что радиальные составляющие силы резания P_y от каждой из пластин не взаимно компенсируются (как у затачиваемых спиральных сверл), а складываются, что приводит (помимо наличия крутящего момента) к возникновению в процессе обработки неуравновешенной

радиальной составляющей силы резания. Наличие такой неуравновешенной составляющей силы резания отрицательно сказывается как на работоспособности сборного сверла, т.к. приводит к знакопеременным нагрузкам на твердосплавные пластины, так и на точности получаемого отверстия. Уменьшение этого отрицательного влияния возможно за счет изменения геометрических параметров как каждой из пластин, так и сверла в целом [6].

Способ усовершенствования геометрических параметров СМП

В данной работе рассмотрен способ усовершенствования геометрических параметров СМП с целью минимизации неуравновешенной радиальной составляющей и суммарной силы резания, действующей на сверло в диаметральной плоскости и, как следствие, – повышения работоспособности сборного сверла.

Для компенсации неуравновешенной радиальной составляющей силы резания P_y [6] необходимо на каждом элементарном рабочем участке режущей кромки (рис.1) (разбивка режущей кромки пластины произведена на участки равной длины – 0,2 мм) сформировать угол наклона режущей кромки $\lambda_{\pi i}$ в плоскости резания таким образом, чтобы выполнялось условие [7]:

$$P_{yi} + P_{zi} \cdot \sin \lambda_{\pi i} \cdot \cos \lambda_{\pi i} = 0, \tag{1}$$

отсюда

$$\lambda_{\pi i} = -\frac{1}{2} \cdot \arcsin \frac{2 \cdot P_{yi}}{P_{zi}} \tag{2}$$

Для определения угла наклона режущей кромки в диаметральной плоскости $\lambda_{p.k.i}$, использовано соотношение:

$$\sin \lambda_{p.k.i} = \sin \lambda_{\pi i} \cdot \sin \varphi_i \tag{3}$$

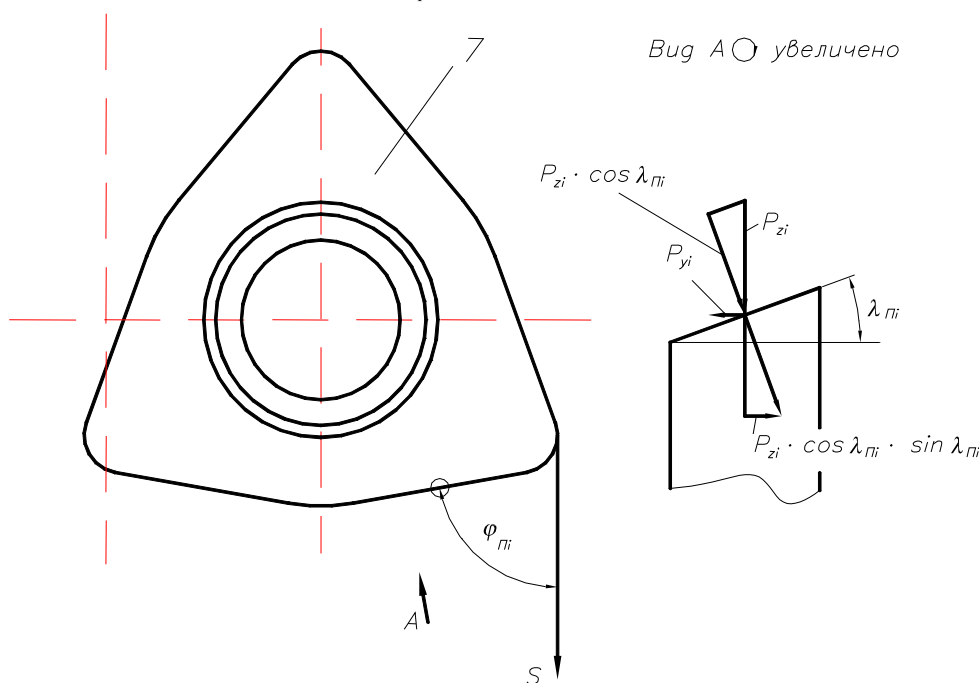


Рис. 1. Схема действия сил на элементарный участок режущей кромки, наклоненный под углом $\lambda_{\pi i}$

После определения на каждом элементарном участке режущей кромки угла $\lambda_{p.k.i}$, эти участки соединяются таким образом, чтобы начало следующего участка $i+1$ совпадало с кон-

цом предыдущего i -го участка. Начало отсчета выбирается либо в конце, либо в начале рабочего участка режущей кромки каждой из пластин.

Результаты и обсуждения

Формируемый таким образом профиль режущей кромки имеет вид, представленный на рис. 2.

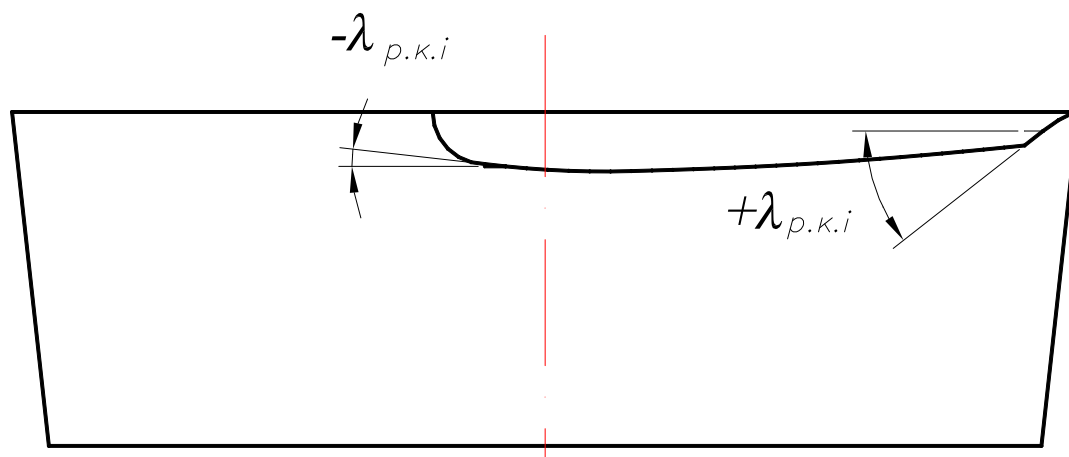


Рис. 2. Профиль режущей кромки периферийной пластины, компенсирующий составляющую силы резания P_y

Сложность расчета такого профиля рабочего участка режущей кромки заключается в том, что в результате режущая кромка в каждой точке меняет расстояние s от диаметральной плоскости и, согласно [2], меняются геометрические параметры (α , γ , λ). В связи с этим после получения профиля, необходимо пересчитывать геометрические параметры, после чего пересчитывать составляющие силы резания и, соответственно, пересчитывать углы наклона $\lambda_{p.k.i}$ в каждой точке профиля. Пересчет профиля продолжается до тех пор (рис.3), пока полученный профиль в каждой точке режущей кромки не будет отличаться от предыдущего на допустимую величину Δ , удовлетворяющую точности, предъявляемой к пластине. Блок-схема программы для расчета профиля режущей кромки представлена на рис. 4.

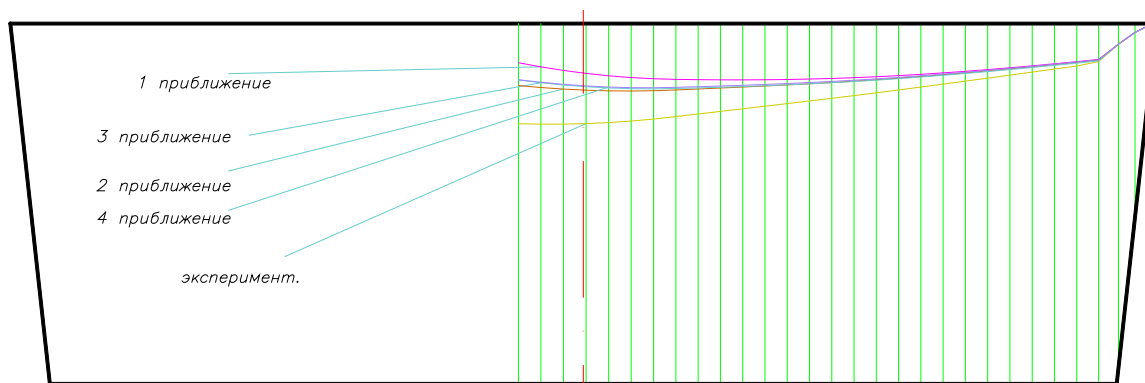


Рис. 3. Последовательный пересчет профиля режущей кромки периферийной пластины конструкции сверла производства Томского инструментального завода ($n=360$ об/мин, $V_S=32$ мм/мин)

В связи с тем, что λ_{pi} согласно формуле 2 не может быть больше 45° , при $P_y > 0,5P_z$ радиальную составляющую P_y компенсировать за счет P_z не удастся. При этом на рассматрива-

емом элементарном участке режущей кромки остается часть P_y , которая компенсируется на следующем элементарном участке.

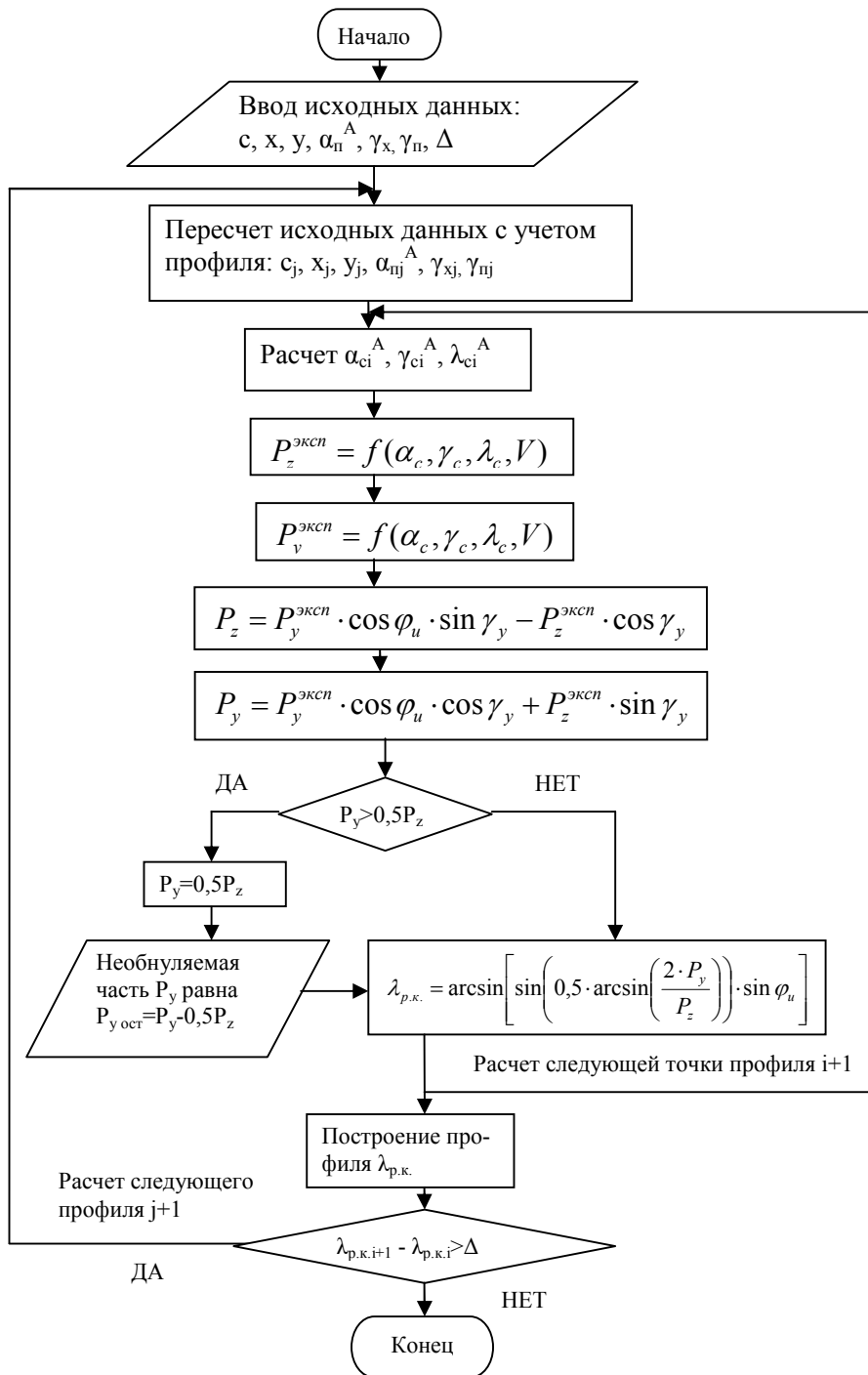


Рис. 4. Блок-схема для расчета профиля режущей кромки

Выводы

Таким образом, данный подход позволяет в каждой точке режущей кромки и на каждой глубине в процессе врезания либо свести к нулю, либо минимизировать неуравновешенную радиальную составляющую силы резания P_y , тем самым улучшить качество получаемых отверстий, уменьшить вибрации, возникающие в процессе обработки на станках с невысокой жесткостью технологической системы и повысить работоспособность режущих пластин и сверла в целом.

Результаты производственных испытаний конструкций режущих пластин, спроектированных по данной методике, показали увеличение работоспособности сборных сверл с СМП на 25-35% по сравнению со стандартными при сверлении объемно-закаленных рельсов.

Список литературы

1. *Баканов А.А., Петрушин С.И.* Работоспособность сверл с СМП при сверлении железнодорожных рельсов // Современные проблемы машиностроения: труды III Международной научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 186–189.
2. *Bakanov A.A.* The geometrical analysis of drills with RMP mechanical fastening works // International Journal of Advances in Machining and Forming Operations. – 2009. – Vol. 1, N 1. – P. 47–57.
3. *Баканов А.А.* Определение силы резания при сверлении сверлами с СМП // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 6. – С. 49.
4. *Петрушин С.И., Баканов А.А., Махов А.В.* Геометрический и силовой анализ сборных сверл со сменными многогранными пластинами // Технология машиностроения. – 2007. – № 10. – С. 27–30.
5. Geometric analysis of composite cutting tools with replaceable polyhedral plates / S.I. Petrushin, R.Kh. Gubaidulina, A.A. Bakanov, A.V. Makhov // Russian Engineering Research. – 2009. – Vol. 29, N 6. – P. 587–594.
6. *Баканов А.А.* Поиск оптимальной конструкции сборных сверл со сменными многогранными пластинами при сверлении железнодорожных рельсов // Известия ТПУ. – 2007. – Т. 311, № 2. – С. 23–26.
7. Патент 68394 Российская Федерация, МПК В 23 В 51/08. Сверло со сменными многогранными пластинами / С.И. Петрушин, А.А. Баканов, Г.И. Коровин. – Оpubл. 27.11.2007.

THE INCREASE OF DRILLS WITH RMP OPERABILITY DUE TO THE CUTTING PLATE EDGE PROFILE CHANGE

Bakanov A.A., Ph.D. (Engineering), Director, e-mail: alekbaknov@yandex.ru

Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Institute of Information Technology, Machine Building and Transport, 28 Vesennaya st., Kemerovo, 650000, Russian Federation

Abstract

When drillings in the volume tempered rails the problem – low operability of this type of the tool arises combined drills with replaceable multiface plates from a firm alloy. The main reason for it is presented in this article is existence of an unbalanced of cutting force radial component . The technique of design of a profile of cutting plate edge based on compensation of an unbalanced radial component of cutting force on each elementary working site of the cutting plate edge due to formation of cutting edge slope in the plane of the cutting allowing to minimize an unbalanced radial component of cutting force on each this site is offered. The flowchart for calculation of the cutting plate edge profile is submitted. This technique allows to increase operability of the composite drills on average for 30%.

Keywords

Composite drill, the increase of operability, replaceable multiface plate, the cutting edges profile, the cutting edge slope, an equilibration of the cutting forces radial component

621.9.06:518.4

**ПРОБЛЕМЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ЗЕМЛЕРОЙНЫХ
МАШИН**

*С.В. ПТИЦЫН, доцент
О.В. САХА, студентка
А.К. ЖИГУЛЕВ, студент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Саха О.В. - 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: olga-v205@rambler.ru

Существует общая проблема освоения территорий. Для их освоения требуется много строительных работ, в число которых входят земляные работы. Для малоэтажного строительства необходимо применять малую технику. Но при её внедрении возникает много проблем. В данной статье ставится задача рассмотреть существующие проблемы.

Ключевые слова: строительство, землеройные работы, землеройные машины, экскаваторы, механизация.

Введение

Российская Федерация является крупнейшей по площади страной мира, занимая при этом одну пятую часть суши. Из нее 30% приходится на территорию Сибирского Федерального Округа (плотность населения 3,9 чел. на 1 км²). Но большая часть этих территорий до сих пор не освоена. Учитывая малую плотность населения, необходимо решать проблему освоения этих территорий за счет малоэтажного строительства.

Малоэтажное строительство является наиболее перспективным направлением развития экономики страны в настоящее время. Чтобы поднять производительность труда в этой области необходимо повышать уровень механизации строительства.

Если речь идет об индивидуальной постройке с небольшим земельным участком, то возникает проблема ограниченной площади. Это приводит к потребности в мобильной технике, которую не сложно доставить на рабочий участок, представляющий собой, обычно, частный сектор. Для этих целей, в основном, используют небольшую импортную технику.

Чаще всего для возведения подобных и более крупных строений используются рабочие низкой квалификации из стран ближнего зарубежья, из-за чего создается необходимость в простой в управлении технике.

При строительстве в первую очередь следует обеспечить механизацию работ нулевого цикла. К работам по нулевому циклу относятся: планировка и зачистка территории, дренаж участков, разбивка и рытье траншей, канав, котлованов для устройства фундаментов и их гидроизоляция, прокладка трубопроводов и кабельной сети, обратная засыпка грунта, водотвод и водопонижение, и многое другое [1 - 3].

Работы этого типа являются неотъемлемой и очень важной частью строительства, т.к. как от качества выполненных на данном этапе работ зависит надежность, долговечность и качество возводимой конструкции.

Несмотря на то, что объем работ нулевого цикла в малоэтажном строительстве в разы меньше, чем в многоэтажном, потребность в механизации является выраженной для данного

вида строительства. Использование специальной техники позволяет повысить экономичность, производительность и сократить время работ по сравнению с ручным трудом, уменьшить трудозатраты, и повысить экономичность [4 - 14], т.к. использование техники рассчитанной на малоэтажное строительство намного дешевле использования крупногабаритных аналогов.

Основная проблема механизации земляных работ заключается в большом их разнообразии. Создать универсальную машину, выполняющую весь комплекс землеройных работ, практически невозможно. Поэтому следует идти по пути применения навесного оборудования на базе единой платформы и выпуска ряда модификаций машин в зависимости от запросов потребителей.

Широкое распространение на рынке малой строительной техники получили мини-экскаваторы, конструктивное исполнение которых разнообразно.

Постановка задачи

Основным узлом экскаватора являются стрела с ковшом. Поворот рабочего органа экскаватора может осуществляться стрелой или поворотом платформы. При этом привод поворотного устройства может представлять собой: рычажную систему, приводимую в движение гидроцилиндром, поворотный гидродвигатель или трансмиссию (цепную или зубчатую).

Трансмиссия является сложным механическим устройством с большим количеством подвижных механизмов, что приводит к трудоемкости в обслуживании и ремонте.

Рычажный привод поворота является самым распространенным, так как представляет собой самую простую конструкцию. Но стоит учитывать, что при необходимости увеличения угла поворота рабочий ход поршня гидроцилиндра также должен увеличиваться.

В качестве источников энергии экскаваторов могут быть использованы электрические, дизельные или бензиновые двигатели. Выбор источника энергии зависит от наличия или отсутствия подведенных коммуникаций.

По способу перемещения при эксплуатации экскаваторы могут быть: гусеничные (мини-экскаватор *JCB 8014 CTS*), колесные (мини-экскаватор *TD 1*), рычажные (шагающие) (мини-экскаватор *Mini Digger 2500*). В соответствии с названием, гусеничные мини-экскаваторы перемещаются за счет гусениц, у колесных ходовой частью являются колеса, а шаговые перемещаются за счет использования стрелы как опоры и последующего «перетаскивания» стрелой машины.

В зависимости от ходовой части техники, можно выделить две группы: 1) транспортируемые (с помощью тягово-сцепного устройства легкового автомобиля либо погрузкой на платформу, в грузовик и т.д.). Использование осложняется тем, что транспортируемая машина должна быть оборудована габаритными сигналами, зарегистрирована как транспортное средство с выдачей номеров, при значительной массе ее необходимо оборудовать тормозными устройствами; 2) самоходные (чаще всего максимальная скорость самостоятельного движения не превышает 10 км/ч, что весьма замедляет перемещение к рабочему участку при большом разбросе территории).

Обязательным к рассмотрению стоит проблема транспортирования машины к месту эксплуатации. Также необходимо гарантировать мобильность перемещения техники по участку в дальнейшем.

Путем расширения унификации и модульности конструкции можно повысить надежность и безопасность экскаватора.

Основное требование в создании мини-экскаватора - получение маленькой легкой машины, отсюда вытекает проблема устойчивости.

Решение проблемы устойчивости мини-экскаватора при транспортировании и эксплуатации обеспечивается снижением центра тяжести экскаватора и положением выносных опор. Значительно на устойчивость влияет количество опор. Опоры бывают поворотные, выдвижные и переставляемые, при этом приводимые в движение либо гидравликой, либо вручную.

Конструкции с высокой устойчивостью обладают значительным преимуществом, так как появляется возможность эксплуатации на склонах и косогорах, что расширяет спектр выполняемых работ. Например, мини-экскаватор НВР – 13 имеет 4 выдвижные опоры, которые позволяют работать на наклонной поверхности.

Для обеспечения комфортных условий труда при эксплуатации мини-экскаватора необходимо в конструкцию машины заложить один из основных показателей - эргономичность. Количество органов управления и их расположение должно быть оптимальным, иначе неудобное их использование может повлечь за собой быструю утомляемость рабочего. Также оператору для контролирования процесса необходим оптимальный угол обзора рабочей зоны, но зачастую он загораживается кабиной или конструктивными элементами оборудования (стрелой, рукоятью и ковшом). Конструкция и обустройство рабочего места должны обеспечивать оптимальную рабочую позу оператора, учитывающую и не препятствующую естественным физиологическим процессам его организма и обеспечивающую оптимальную возможность выполнения работы.

Выводы

Для выполнения поставленной задачи импортозамещения необходимо разработать конструкцию мини-экскаватора более высокого качества и наладить выпуск в соответствии с потребностями рынка. Но для создания конкурентоспособной техники необходимо искать решение существующих проблем. Это является одной из главных задач.

Список литературы

1. Теличенко В.И., Терентьев О.М., Липидус А.А. Технология возведения зданий и сооружений. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2004. – 446 с.
2. Скиба В.Ю. Актуальные проблемы в машиностроении: сборник материалов первой международной научно-практической конференции // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. – 2014. – № 11 (66). – С. 83.
3. Архипов П.В., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Совершенствование оборудования под процессы комбинированной обработки // Вестник Таджикского технического университета. – 2013. – Т. 2, № 2. – С. 32–37.
4. Надежность прогноза качества технологического оборудования / С.В. Птицын, В.Ю. Скиба, Ю.С. Чёсов, Е.В. Мережко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 2. – С. 33–38.
5. Actual Problems and Decisions in Machine Building / ed. by V.Yu. Skeebe. – Pfaffikon: Trans Tech Publ., 2015. – 344 p. – (Applied mechanics and materials; vol. 788). – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788. – ISBN 978-3-03835-551-9.
6. Актуальные проблемы в машиностроении / под ред. В.Ю.Скибы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 588 с. – ISBN 978-5-7782-2410-0.
7. Определение основных параметров технологического оборудования / Ю.И. Подгорный, Т.Г. Мартынова, В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, Н.В. Вахрушев, Д.Ю. Корнев, Е.К.

Зайцев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 3 (60). – С. 68–73.

8. Выбор конструктивных параметров несущих систем машин с учетом технологической нагрузки / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, О.В. Максимчук, Д.В. Лобанов, В.Р. Глейм, А.К. Жигулев, О.В. Саха // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 4 (69). – С. 51–60. – doi: 10.17212/1994-6309-2015-4-51-60.

9. Моделирование несущих систем технологических машин / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 2 (63). – С. 91–99.

10. Прогнозирование технических характеристик интегрального технологического оборудования / В.Н. Пушнин, Д.Ю. Корнев, Н.В. Вахрушев, В.Ю. Скиба, К.А. Парц // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2014. – Т. 2. – С. 97–101.

11. Совершенствование технологических процессов машиностроительных производств / А.С. Янюшкин, С.О. Сафонов, Д.В. Лобанов и др. – Братск: Изд-во БрГУ, 2006. – 302 с.

12. Станочное оборудование, основанное на комплексировании нескольких технологических операций / В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев, В.Ю. Скиба // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 245–255.

13. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeebea, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 30, iss. 12. – P. 1408–1411. – doi: 10.1080/10426914.2014.973595.

14. Применение конструктивных решений для повышения стойкости штока / Е.К. Зайцев, М.А. Зайцева, К.Г. Зайцев, В.Ю. Скиба // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 313–316.

PROBLEMS IMPORT SUBSTITUTION OF SMALL-SIZED EARTH-MOVING MACHINERY

Ptitsyn S.V., Associate Professor, e-mail: stanislav.pticzin@yandex.ru

Sakha O.V., Student, e-mail: olga-v205@rambler.ru

Zhigulev A.K., Student, e-mail: alexey-zhigulev@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

There is a general problem of land development. Territory development requires a lot of construction work including earthworks. Small-sized machinery should be used in the construction of low-rise building. But its implementation raises many problems. This article seeks to examine the existing problems.

Keywords

construction, earthworks, diggers, mechanization

УДК 621.9.02-229

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
СО ВСТРОЕННЫМ ИЗМЕРИТЕЛЕМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ**

*А.М. МАРКОВ¹, доктор техн. наук, профессор
А.Н. РОМАШЕВ², канд. техн. наук, доцент
(¹ АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул,
² БТИ АлтГТУ, г. Бийск)*

Ромашев А.Н. – 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27,
Бийский технологический институт
(филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова,
e-mail: alniro@yandex.ru

Обоснована возможность размещения в базовую деталь узла крепления модулей модульных систем инструментального обеспечения измерительных устройств для получения информации для диагностирования её режущих элементов.

Ключевые слова: модульная инструментальная оснастка, размещение измерительных преобразователей, чувствительные элементы измерителя

Введение

Применение модульной инструментальной системы в отличие от традиционной цельной оснастки позволяет: снизить вес инструмента в 3-4 раза, сократить его номенклатуру на 25...40 %, сократить затраты на приобретение оснастки в 1,5...3 раза, повысить эффективность работы оборудования, повысить производительность труда, сократить сроки подготовки производства, снизить себестоимость механической обработки. Использование модульной инструментальной системы эффективно даже при работе на одном станке.

Постановка задачи

В реальных условиях эксплуатации возможны различного рода нарушения работы металлорежущего оборудования, значительная доля которых связана с отказами режущего инструмента, она составляет 25-60% от общего числа нарушений работы станков [1]. Поэтому режущий инструмент является одним из основных элементов, определяющих работоспособность металлорежущего оборудования, а состояние режущего лезвия инструмента влияет на качество обрабатываемых деталей и характеризует работоспособность самого режущего инструмента. Применение автоматического контроля и технической диагностики режущего инструмента дает возможность:

- ✓ снизить себестоимость обработки за счет рационального использования инструмента и сокращения его расхода;
- ✓ повысить производительность обработки путем интенсификации режимов резания;

- ✓ увеличить надежность работы оборудования, вследствие защиты его узлов и механизмов от поломок и преждевременной потери точности;
- ✓ повысить точность обработки за счет исключения работы предельно изношенным инструментом.

Система модульного инструментального обеспечения открывает большие возможности для внедрения систем автоматического контроля состояния режущего инструмента, причем встраивание измерительных устройств в базовую деталь узла соединения модулей позволяет получать оперативную информацию для диагностирования режущих элементов, которая поступает из непосредственной близости к зоне резания.

Результаты и обсуждение

Технологическая гибкость инструментальной оснастки, обеспечивая возможность частой и быстрой переналадки оборудования на обработку партий различных деталей, ярко проявляется при замене инструмента, когда требуется определенное время не только на установку нового инструмента, но и на его «привязку» для формирования разнообразных наладок, чтобы достичь наибольшей производительности.

Немаловажное значение для повышения эффективности производства приобретает дальнейшее совершенствование существующих конструкций режущего инструмента, имеющих на машиностроительных предприятиях.

Одним из способов решения этих задач является использование модульных и многофункциональных конструкций инструмента и систем на их основе. Важным в разработке модульного инструмента является выбор конструкции соединительного элемента. При этом должны обеспечиваться достаточные жесткость, точность и повторяемость размеров инструмента. По данным фирмы Sandvik Coromant (Швеция) немногим более 35% времени работы оборудования можно использовать непосредственно для резания, применяя традиционную инструментальную оснастку.

Предлагаемое расположение (рис. 1) измерительных преобразователей с позиций обеспечения основных требований для выбора места встройки датчиков в технологическую систему, сформулированных в работе [2], является оптимальным, поскольку:

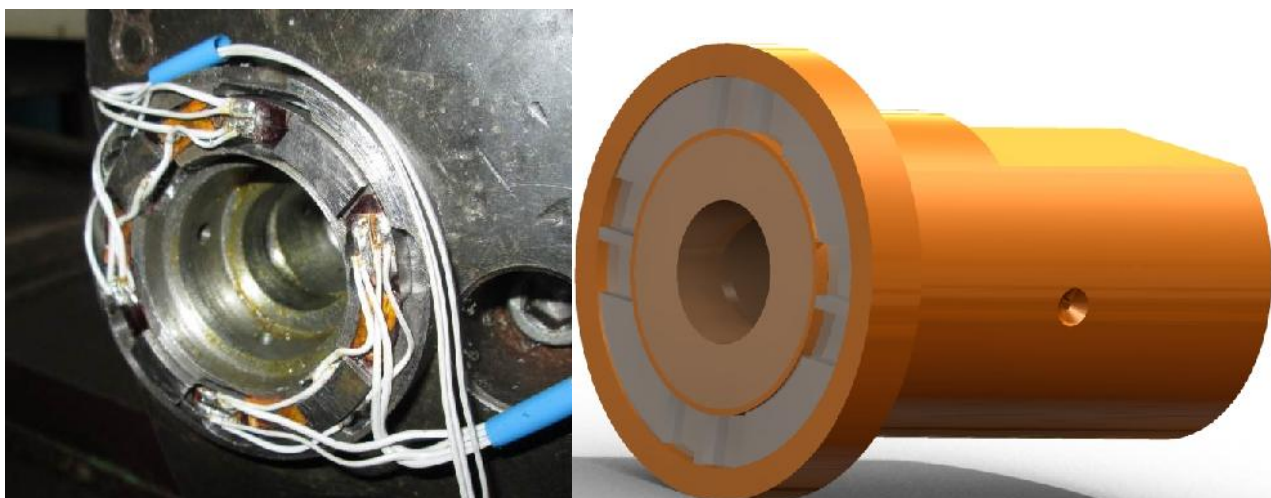


Рис. 1. Расположение чувствительных элементов в плоскости разъема узла крепления инструментальных модулей

во-первых, режущий инструмент непосредственно участвует в процессе резания и воспринимает все действующие при обработке факторы;

во-вторых, при резании место приложения нагрузки относительно тела инструмента остается неизменным;

в-третьих, ввиду быстросменности инструментальных модулей в системе инструментального обеспечения металлорежущего оборудования, удобство обслуживания измерительного устройства, размещенного в базовую деталь узла соединения модулей, будет обеспечено.

В сборной конструкции инструментальной оснастки чувствительные элементы располагаются в плоскости разъема узла крепления инструментальных модулей с различной формой и геометрией их режущих частей таким образом, чтобы центры сечений каждого элемента лежали на осях симметрии поперечного сечения (рисунок 1). При этом желательно, чтобы поперечное сечение по чувствительным элементам измерительного преобразователя (ИП) было центрально симметрично относительно центра поперечного сечения. Симметрия сечения необходима для того, чтобы возникающие механические напряжения в чувствительных элементах от измеряемой нагрузки, например, имели одинаковую величину. В этом случае будет иметь место минимальное взаимное влияние измеряемых составляющих силы резания, так как одинаковые по величине механические напряжения на элементах для измерения соответствующей составляющей от других составляющих будут компенсироваться при соответствующей схеме соединения ИП и, следовательно, чем симметричнее будет конструкция, тем более она скомпенсирована.

Следует отметить ряд преимуществ сборных конструкций (рисунок 2) по сравнению с цельным инструментом:

1. Возможность общего корпуса с чувствительными элементами для режущих модулей различной формы и геометрии режущей части.
2. Вследствие расположения торцов чувствительных элементов в одной плоскости не требуется увеличения вылета РИ.
3. Возможность встраивания различных измерительных преобразователей.
4. Упрощается изготовление и установка ИП, так как они могут быть выполнены отдельно.
5. Для улучшения измерительных характеристик ИП возможно применение (для изготовления чувствительных элементов) специальных материалов.



Рис. 2. Сборная конструкция инструментальной оснастки

Выводы

Модульная быстросменная оснастка дает возможность увеличить время, используемое непосредственно на резание, что позволяет окупить затраты на быстросменную оснастку всего за несколько месяцев.

Кроме того, дополнительный эффект может быть получен за счет оптимального использования ресурса режущего инструмента путем устранения замен еще работоспособных инструментов на основании оперативно получаемой диагностической информации.

Список литературы

1. Палей С.М. Некоторые особенности эксплуатации токарных станков с ЧПУ на участке АСВ-20 // автоматизированные участки из станков с ЧПУ, управляемые ЭВМ. – М.: ЭНИМС, 1981. – С. 27–31.
2. Адаптивное управление станками / под общ. ред. Б.С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1973. – 688 с.

TOOL SYSTEM OF PROCESSING EQUIPMENT WITH THE BUILT-IN MEASURING INSTRUMENT FOR OBTAINING DIAGNOSTIC INFORMATION

Markov A.M.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: andmarkov@inbox.ru

Romashev A.N.², Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: alniro@yandex.ru

¹ I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

² Biysk Technological Institute, Branch of Polzunov Altai State Technical University, 27 Trafimova st., Biysk, Altai region, 659305, Russian Federation

Abstract

Possibility of placement in a basic detail of knot of fastening of modules of modular systems of instrumental providing metering devices for obtaining information for diagnosing of its cutting elements is proved

Keywords

Modular tool system, seating of measuring converters, sensitive elements of the measuring instrument

УДК621.9.08

**ВИРТУАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ**

*А.М. МАРКОВ¹, доктор техн. наук, профессор
А.Н. РОМАШЕВ², канд. техн. наук, доцент
П.В. ПЕРЕПЕЛКИН², инженер
(¹АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул,
²БТИ АлтГТУ, г. Бийск)*

Ромашев А.Н. – 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27,
Бийский технологический институт
(филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова,
e-mail: alniro@yandex.ru

Работа посвящена актуальным вопросам создания средств в виде компьютерных виртуальных устройств для сбора и обработки диагностической информации, получаемой непосредственно от режущего инструмента в процессе резания. Для разработки приборов использована программная оболочка LabVIEW.

Ключевые слова: виртуальные приборы, сбор и обработки диагностической информации, интерфейс приборов, пьезокерамический датчик

Введение

Работы в области совершенствования конструкции и автоматизации модульных систем инструментальной техники в настоящее время остаются актуальными. Кафедра МРСиИ Бийского технологического института АлтГТУ активно выполняет работы в данном направлении. Результатом очередного этапа является конструкция модульной инструментальной оснастки, оснащённой многокомпонентным датчиком силы.

Несмотря на разносторонние исследования, проводимые в указанном направлении отечественными и зарубежными специалистами, проблема создания системы оперативной диагностики режущего инструмента остается актуальной.

Постановка задачи

Получение оперативной диагностической информации о ходе процесса резания является важной задачей при организации систем мониторинга и прогнозирования состояния режущих элементов инструментальной оснастки, но при разработке и создании таких систем технической диагностики не менее важная задача решается по выбору оборудования для сбора, анализа и обработки полученной информации.

Для проведения экспериментальных исследований и выявления информативных параметров, позволяющих контролировать процесс резания, в среде LabVIEW [1] было создано два виртуальных прибора (рис. 1). Один из приборов использовался для непосредственного получения сигнала с измерительного устройства, его визуализации и последующей записи в память компьютера. Второй прибор был создан для анализа полученного сигнала, визуализации, фильтрации и подавления шумов, а так же для получения непосредственно информа-

тивных данных, выделения нужного участка из всего записанного сигнала и ряда других манипуляций

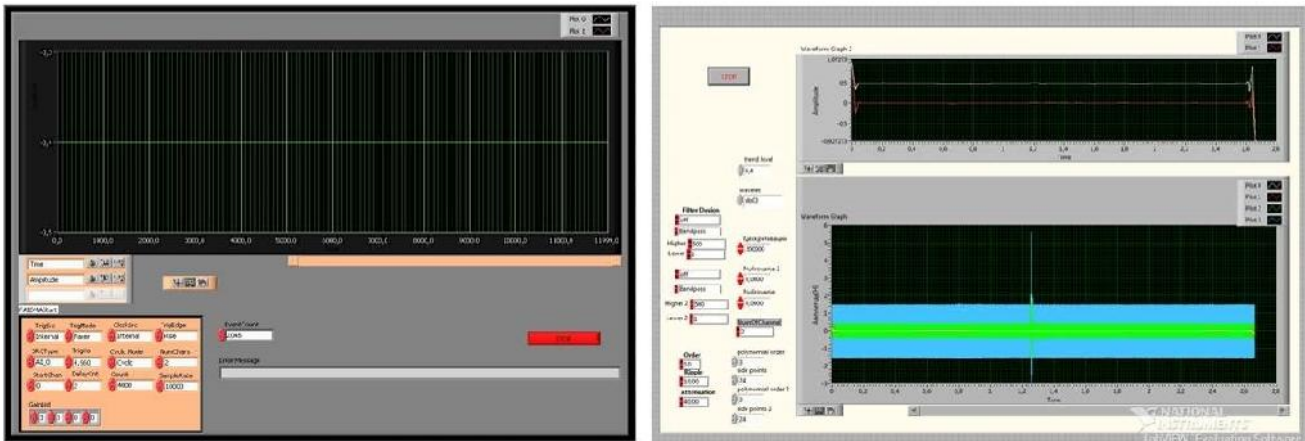


Рис. 1. Интерфейс виртуальных приборов

Результаты и обсуждение

Интерфейс приборов содержит наборы регуляторов настроек отображения и обработки сигналов (число каналов, порядок функции интерполяции, порядок усреднения данных и др.), а также окна визуализации сигналов, элементы управления курсорами, элементы выбора типа фильтров и др.

Разработка оригинальных виртуальных приборов была обусловлена необходимостью формирования нестандартных параметров, совмещенных критериев, а также обеспечением возможности корректировки функций прибора для получения наглядного представления об общих тенденциях изменений выходных сигналов при варьировании исследуемых технологических параметров обработки.

На рисунке 2 представлены показания приборов во время проведения эксперимента, в данном случае проводилось изменение угла приложения нагрузки (моделирующей действие силы резания). Угол приложения силы изменялся от 0 до 90 градусов (в работе находился один угловой сектор упруго-чувствительного элемента измерительного устройства). Анализируя результаты эксперимента можно сделать вывод о качественной оценке получаемого сигнала от многокомпонентного датчика силы. При приложении определенной нагрузки в середину сектора сигналы с обоих каналов получаются примерно одинаковыми, как только мы начинаем изменять угол приложения силы, т.е. смещать прикладываемую нагрузку от центра сектора, один из сигналов, в зависимости от того в какую сторону мы смещаем нагрузку начинает увеличиваться, а второй соответственно начинает уменьшаться.

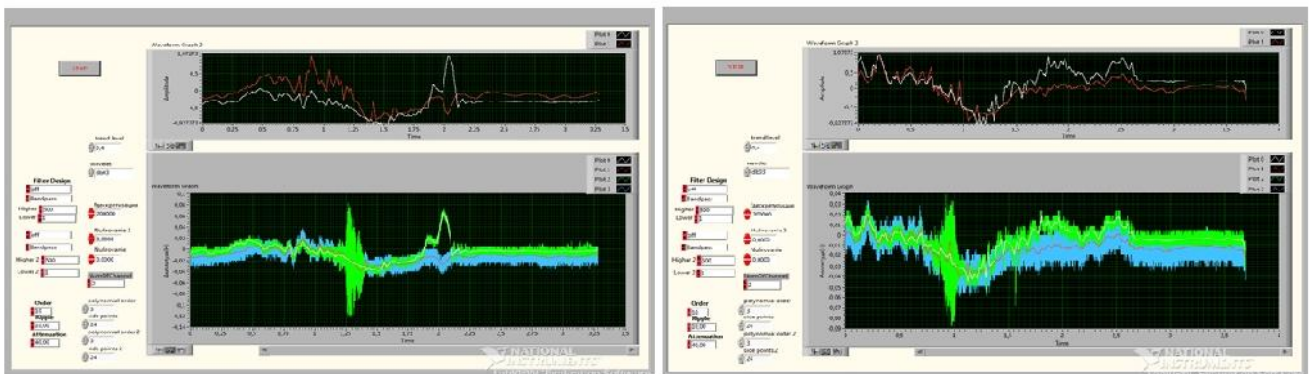


Рис. 2. Виртуальный прибор для обработки сигнала

Для проверки приборов использовался опытный образец модели инструментальной оснастки (рис. 3) со встроенным датчиком, позволяющим моделировать измерение составляющих силы резания. Конструкция содержит державку, служащую для установки модели на станке; две металлические шайбы, предназначенные для того чтобы пьезокольцо не раздавило резцом во время работы; две пластины, изготовленные из гетинакса, одна из которых разделена на 4 сектора, к каждому из которых припаян контакт; пьезокольцо устанавливается между пластинами, верхний электрод которого разделен на 4 равных сектора, каждой из которых совпадает с секторами одной из пластин; втулку из фторопласта, предназначенную для центрирования пьезокольца в оснастке и режущую головку, которая служит рабочей частью инструмента. Сигнал с датчика поступает на сетевую плату АЦП и оцифровывается. В персональный компьютер информация поступает через порт ввода и может быть занесена как в оперативную память, так и на внешнее запоминающее устройство. Далее сигнал преобразуется и обрабатывается виртуальными приборами, разработанными в программной среде LabVIEW.



Рис. 3. Опытный образец модели инструментальной оснастки со встроенным датчиком.

Данную модель оснастки применяли для точения цилиндра диаметром 40мм из алюминиевого сплава. Обработка проводилась с различными режимами, на рисунке 4а представлены, например, показания приборов при торцовке цилиндра, а на рисунке 4б - при продольном точении.

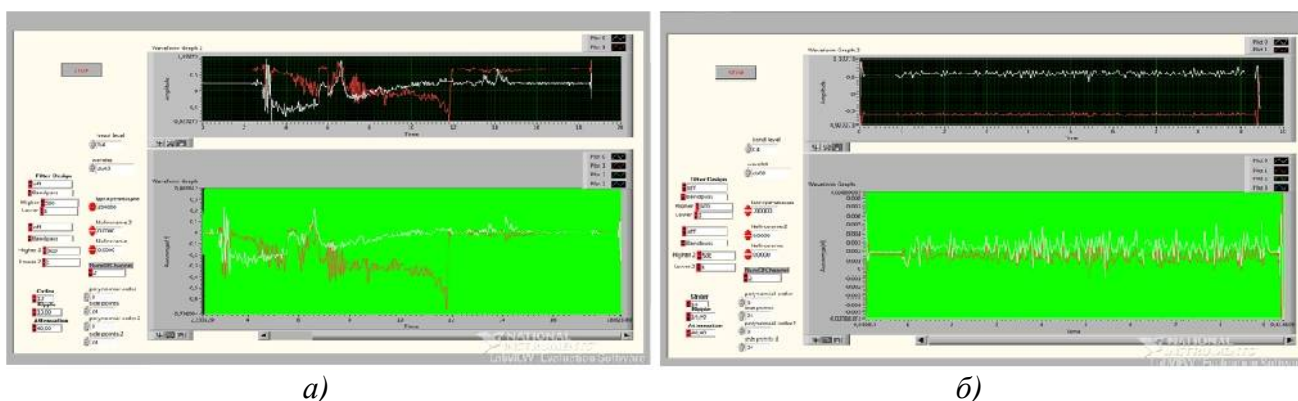


Рис. 4. Показания приборов при точении:
а) - $n=1000$ об/мин; $t=0,5$ мм; $s=0,05$ мм/об, б) - $n=1500$ об/мин; $t=0,03$; $s=0,05$ мм/об.

Выводы

Анализ представленных показаний свидетельствует о значительных качественных изменениях выходных сигналов, встроенного в инструментальную оснастку, пьезокерамического датчика.

Характер указанных изменений проявляет зависимость от условий приложения силовых параметров, что также отражается в характере поведения выходных сигналов. При этом указанные изменения имеют очень высокую чувствительность, т.к. для проведения замеров применение усилительных устройств для измерительных сигналов не требовалось.

Список литературы

1. Кудрин А.В. Использование программной среды LabVIEW для автоматизации проведения физических экспериментов: электронное учебно-методическое пособие [Электронный ресурс]. – Н. Новгород: Нижегород. гос. ун-т, 2014. – 68 с. – URL: http://www.unn.ru/books/met_files/Kudrin%20LabView.pdf (дата обращения: 22.03.2016).

VIRTUAL DEVICES FOR COLLECTING AND PROCESSING OF DIAGNOSTIC INFORMATION ON CUTTING PROCESS

Markov A. M.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: andmarkov@inbox.ru

Romashev A. N.², Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: alniro@yandex.ru

Perpelkin P. V.², Engineer, e-mail: mrsi@bti.secna.ru

¹ I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

² Biysk Technological Institute, Branch of Polzunov Altai State Technical University, 27 Trafimova st., Biysk, Altai region, 659305, Russian Federation

Abstract

Article is devoted to topical issues of creation of means in the form of computer virtual devices for collection and processing of the diagnostic information obtained directly from a cutting tool in the course of cutting. For development of instruments the shell program of LabVIEW is used.

Keywords

The virtual instruments, collection and processing of diagnostic information, interface of instruments, piezoceramic sensor

УДК 621.771.23.09

**ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ИЗГИБОМ НА ВЯЗКОСТЬ
И ПЛАСТИЧНОСТЬ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ***А.Б. МАКСИМОВ, канд. техн. наук, доцент**М.В. ГУЛЯЕВ, канд. воен. наук, доцент**И.С. ЕРОХИНА, преподаватель**(КГМТУ, г. Керчь)*

Максимов А.Б. – 298309, Россия, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82,
Керченский государственный морской технологический университет,
e-mail: aleksandrmsk@yandex.ru

В работе предложено объяснение изменения ударной вязкости и относительного удлинения при холодной деформации циклическим пластическим изгибом толстолистовой стали 10Г2С1. Известно, что при деформации циклическим изгибом упрочнение сопровождается вначале снижением вязкости и пластичности стали, затем происходит частичное восстановление, а при суммарной деформации более (30-40)% дальнейшее снижение. При циклической деформации изгибом в поверхностном слое (толщиной $(1-1,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$) широкого бруса возникают остаточные напряжения сжатия, а в центральной части – остаточные напряжения растяжения. Напряжения сжатия способствуют повышению пластичности и вязкости стали. Напряжения растяжения – понижают пластичность и вязкость. Увеличение плотности отдельных дислокаций приводит к снижению пластичности и вязкости. Затем, возникает ячеистая дислокационная структура, которая способствует повышению вязкости и пластичности. Сочетание факторов повышающих и понижающих пластичность и вязкость стали обуславливает указанное изменение ударной вязкости и относительного удлинения при циклическом изгибе.

Ключевые слова: низколегированная сталь, циклический изгиб, упрочнение, вязкость, относительное удлинение, широкий брус.

Введение

Применение циклического пластического изгиба, как элемента термомеханической обработки стали рассмотрено в ряде работ [1-3]. При холодной деформации циклическим изгибом упрочнение стали сопровождается снижением вязкости и пластичности. При холодной деформации растяжением прочностные характеристики возрастают, а пластичность и вязкость монотонно снижаются. При пластическом циклическом изгибе монотонное возрастание упрочнения сопровождается сложным характером изменения ударной вязкости и относительного удлинения. С увеличением суммарной деформации после первичного снижения пластичности и вязкости происходит частичного их восстановления. В литературе не обнаружено объяснения этому факту.

Целью настоящей работы было проанализировать влияние различных факторов на изменение вязкости и пластичности стали при циклическом изгибе и объяснить обнаруженную закономерность.

Материал и методика исследования

В работе использовалась толстолистовая сталь 10Г2С1. От горячекатаных листов толщиной $8 \cdot 10^{-3}$ м промышленного производства отбирали пробы $(300 \times 200) \cdot 10^{-3}$ м). Пробы подвергали нормализации при температуре 950°C с охлаждением на воздухе. Из проб вырезали образцы $(300 \times 25 \times 8) \cdot 10^{-3}$ м вдоль направления прокатки и деформировали циклическим чистым изгибом по симметричному циклу по жесткой схеме нагружения с амплитудой деформации 1, 2 и 5%. Амплитуду деформации ($\varepsilon_{\text{д}}$) рассчитывали по формуле [4]:

$$\varepsilon_{\text{д}} = \frac{h}{R} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где h – толщина образца, м; R – радиус изгиба, м.

Так как отношение ширины образца к его толщине превышает значение (2,5-3), то такой образец является широким бруском [4]. При деформации изгибом в этом случае возникают только нормальные напряжения и справедлива гипотеза плоских сечений.

Величину суммарной деформации при циклическом изгибе рассчитывали по формуле [1]:

$$\varepsilon_{\text{сум}} = \varepsilon_{\text{д}} \cdot N, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\text{д}}$ – амплитуда деформации; N – число циклов.

Анализ полученных результатов

На рис.1 представлено изменение предела текучести стали 10Г2С1 в зависимости от величины суммарной деформации при изгибе при разных амплитудах деформации. Интенсивность упрочнения стали на первом этапе деформирования возрастает, а затем уменьшается. С увеличением амплитуды деформации величина упрочнения возрастает.

Ударная вязкость и относительное удлинение (рис.2, 3) при циклическом изгибе вначале уменьшаются, затем повышаются с последующим снижением. С увеличением амплитуды деформации величина первичного снижения возрастает.

С увеличением степени деформации (при циклической деформации – числа циклов) возрастает плотность дислокаций [5,6,7]. Вначале одиночные дислокации равномерно распределены в объеме металла. Дальнейшее деформирование приводит к образованию дислокационных стенок, которые соединяясь, образуют ячейки.

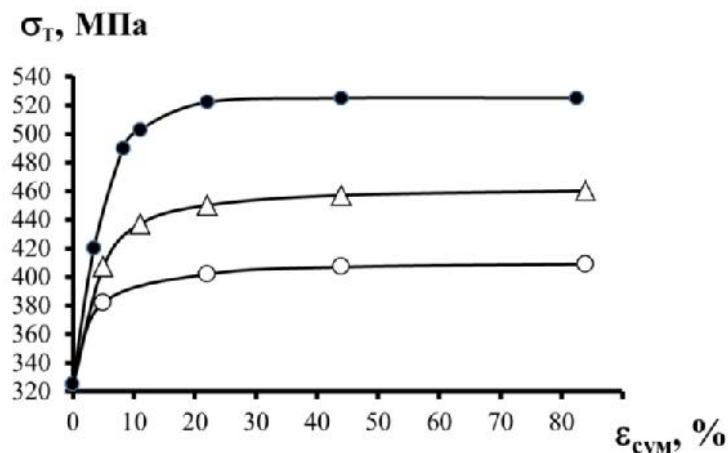


Рис. 1. Изменение предела текучести от величины суммарной деформации.

Амплитуда деформации: • - 5,5%; Δ- 2%; ○ □- 1%.

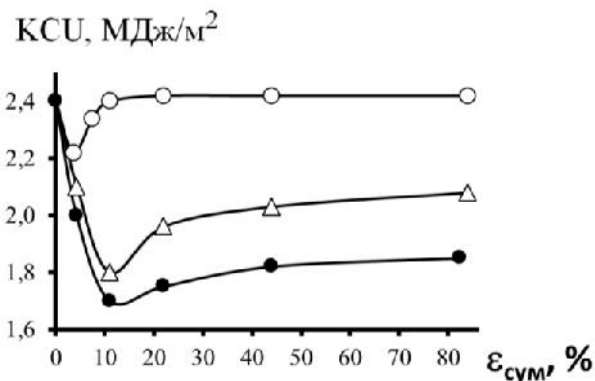


Рис. 2 а. Изменение ударной вязкости от величины суммарной деформации. Обозначения на рис. 1. Температура испытания 20°C

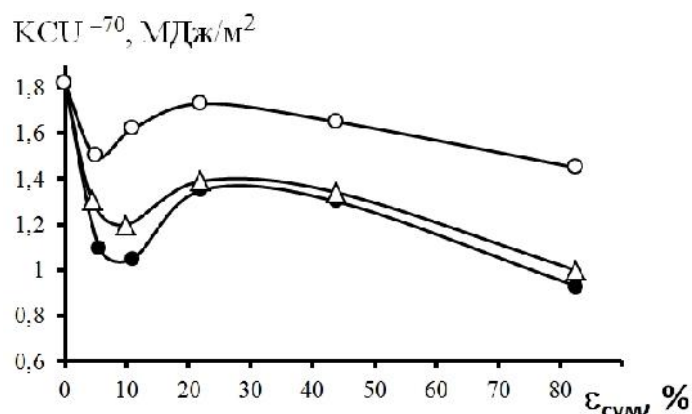


Рис. 2 б. Изменение ударной вязкости от величины суммарной деформации. Обозначения на рис. 1. Температура испытания -70°C.

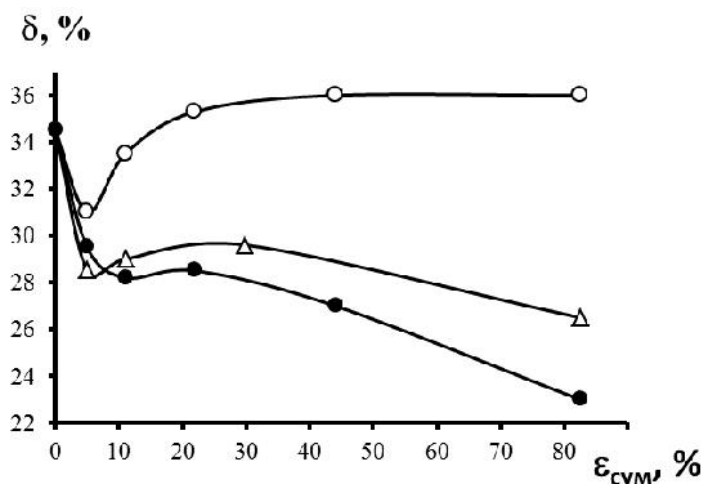


Рис. 3. Изменение относительного удлинения от величины суммарной деформации. Обозначения на рис. 1.

Ячеистая дислокационная структура при дальнейшем деформировании трансформируется в полосовую. Полосовая дислокационная структура считается основой для формирования микротрещин. Образование полосовой дислокационной структуры является началом стадии необратимой повреждаемости.

Дислокационная структура в форме отдельных дислокаций или их скоплений повышает прочность стали, но снижает пластичность и вязкость. Наличие ячеистой

дислокационной структуры способствует частичному восстановлению пластичности и вязкости стали, но снижает интенсивность возрастания упрочнения [2].

При деформации растяжением (в области равномерной деформации) упрочнение возрастает по затухающей кривой, а пластичность и вязкость также монотонно снижаются по затухающей кривой [7].

При циклической деформации, в отличие от односторонней, пластичность и вязкость после первичного снижения частично восстанавливаются.

Послойный электронно-микроскопический анализ по толщине широкого бруса показал [2], что в каждом слое металла идет процесс увеличения плотности дислокаций, образование ячеистой дислокационной структуры, а затем полосовой. При пластическом изгибе, так как деформация по сечению бруса возрастает от нейтральной линии, деформации к поверхности в каждом слое металла протекает указанная эволюция дислокационной структуры. Чем ближе к поверхности, тем деформация больше и процессы протекают при меньшем числе циклов изгиба.

При односторонней деформации растяжением развитие ячеистой дислокационной структуры протекает равномерно по всему сечению образца. Несмотря на сходный характер развития дислокационной структуры, при циклической деформации наблюдается частичное восстановление пластичности и вязкости стали.

Следует отметить, что наибольшее снижение пластичности и вязкости наблюдается вначале деформирования до 10-12% суммарной деформации. Это соответствует увеличению плотности отдельных дислокаций [8]. Частичное восстановление пластичности и вязкости происходит в интервале (12-25)% суммарной деформации. В этом интервале суммарной деформации происходит формирование ячеистой дислокационной структуры.

Таким образом, полученные данные показывают, что наличие ячеистой дислокационной структуры не объясняет частичное восстановление пластичности и вязкости стали.

В работе [10] показано, что при циклическом пластическом изгибе в поверхностном слое (толщиной около $(1-1,5) \cdot 10^{-2}$ м) возникают остаточные напряжения сжатия, а в центральном слое – остаточные напряжения растяжения. Известно [11,12], что остаточные напряжения сжатия способствуют «залечиванию» микротрещин и повышают вязкость стали. По теории Давиденкова-Фридмана [13,14] пластическая деформация обусловлена касательными напряжениями. Области сжатия способствуют деформации сдвига, т.е. касательным напряжениям.

Таким образом, при циклическом изгибе действуют два фактора повышающие вязкость и пластичность: ячеистая дислокационная структура и остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое. Вместе с этим действуют факторы снижающие вязкость и пластичность: увеличение плотности отдельных дислокаций и их скоплений и наличие остаточных напряжений растяжения в центральной части бруса.

Заключение

При циклическом пластическом изгибе широкого бруса из низколегированной стали 10Г2С1 ударная вязкость при комнатной температуре и при минус 70°C с увеличением суммарной деформации вначале уменьшается, а затем при суммарной деформации (11-22)%, частично восстанавливается. При суммарной деформации более (30-40)% ударная вязкость снижается. Аналогичное изменение претерпевает относительное удлинение.

На основании проведенных исследований и литературных данных проанализированы факторы, влияющие на вязкость и пластичность стали. При циклическом изгибе широкого бруса в поверхностном слое толщиной $(1-1,5) \cdot 10^{-2}$ м возникают остаточные напряжения

сжатия, а в центральной части – остаточные напряжения растяжения. По всему сечению бруса при деформации вначале увеличивается плотность отдельно расположенных дислокаций, затем образуется ячеистая дислокационная структура, переходящая в полосовую. Напряжения сжатия и ячеистая дислокационная структура способствуют повышению пластичности и вязкости стали. Отдельные дислокации и их скопления, полосовая структура, а также остаточные напряжения растяжения приводят к снижению вязкости и пластичности. Наличие тех или иных факторов на различных стадиях циклической деформации приводит вначале к снижению вязкости и пластичности, а потом к частичному их восстановлению.

Список литературы

1. *Подгайский М.С., Максимов А.Б.* Влияние циклической деформации знакопеременным изгибом на механические свойства низколегированных сталей в зависимости от исходного структурного состояния // Термическая и термомеханическая обработка проката. – М.: Металлургия, 1981. – С. 25–27.
2. Влияние деформации циклическим изгибом на дислокационную структуру стали 10Г2С1 / М.С. Подгайский, А.Б. Максимов, Ю.П. Нескуб, В.И. Новик // Известия АН СССР. Металлы. – 1985. – № 5. – С. 131–133.
3. *Подгайский М.С., Максимов А.Б., Белик А.В.* Влияние циклического пластического изгиба на склонность стали Ст3сп к хрупкому разрушению // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1982. – № 7. – С. 43–44.
4. *Феодосьев В.И.* Сопротивление материалов: учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ. – 2000. – 592 с.
5. *Иванова В.С., Терентьев В.Ф.* Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
6. *Кацаньда С.* Усталостное разрушение металлов: пер. с пол. – М.: Металлургия, 1976. – 456 с.
7. *Бернштейн М.Л.* Структура деформированных металлов. – М.: Металлургия, 1977. – 431 с.
8. *Кроха В.А.* Кривые упрочнения металлов при холодной деформации. – М.: Машиностроение, 1968. – 131 с.
9. *Хоникомб Р.* Пластическая деформация металлов: пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
10. *Максимов А.Б., Гуляев М.В.* Распределение прочности по толщине бруса при пластическом изгибе // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2015. – № 2. – С. 39–43.
11. *Финкель В.М.* Физические основы торможения разрушения. – М.: Металлургия, 1977. – 359 с.
12. *Биргер И.А.* Остаточные напряжения. – М.: Машиностроение, 1963. – 232 с.
13. *Фридман Я.Б.* Механические свойства металлов. Ч. 2. Механические испытания. Конструкционная прочность. – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с.
14. *Канн Р.У., Хаазен П.Т.* Физическое материаловедение. Т3: пер. с англ. – М.: Металлургия, 1987. – 330 с.

**THE INFLUENCE OF CYCLIC DEFORMATION ON THE BENDING STRENGTH
AND THE DUCTILITY OF LOW-ALLOY STEELS**

Maksimov A. B., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: aleksandrmks@yandex.ru

Gulyaev M. V., Ph.D. (Military), Associate Professor, e-mail: aladin58@mail.ru

Erokhina I. S., Senior Lecturer, e-mail: irina-kerchanka@yandex.ru

Kerch State Maritime Technological University, 82 Ordzhonikidze str., Kerch, 298309, Republic of
Crimea, Russian Federation

Abstract

In this paper we propose the explanation of the change of the impact toughness and elongation during cold deformation of cyclic plastic bending of plate steel 10Г2С1. It is known that when the cyclic strain curve the hardening is accompanied initially by a decrease in the viscosity and plasticity of steel, then there is a partial recovery, and in total strain more than (30-40)% further reduction. Under cyclic deformation by bending in the surface layer (thickness $(1-1,5) \cdot 10^{-3}$ m. wide beam there are residual compressive stress, and the tensile residual stresses. Compressive stresses increase ductility and toughness of steel. Tensile stress – lower ductility and toughness. The increase in the density of individual dislocations leads to decrease of ductility and toughness. Then there is a cellular dislocation, which increases the viscosity and plasticity. The combination of the factors of increasing and decreasing the ductility and toughness of the steel makes this change in impact strength and elongation

Keywords

low alloy steel, cyclic bending, hardening, viscosity, elongation, wide beam.

УДК 669.715.046.516.2

**ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НА ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ
СПЛАВА Al-11% Si**

*В.К. АФАНАСЬЕВ, доктор техн. наук, профессор
М.В. ПОПОВА, доктор техн. наук, профессор
М.А. МАЛЮХ, соискатель
(СибГИУ, г. Новокузнецк)*

Попова М.В. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: m.popova@rdtc.ru

В работе представлены результаты исследований влияния комплексного легирования и скорости кристаллизации на температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) сплава Al-11%Si в интервале температур испытания 50–450 °С. Установлено, что легирование магнием в количестве 2,5% приводит к снижению ТКЛР сплава Al-11% Si в низко- и высокотемпературном интервалах испытания. При подборе легирующего комплекса выбирали металлы с ТКЛР меньшим, чем у алюминия. Последующее легирование такими элементами, как Be, Cu, Zr способствует дальнейшему уменьшению величины ТКЛР в низкотемпературном интервале испытания. Показано, что наиболее значительное снижение значений ТКЛР наблюдается при введении меди в сплав Al-11%Si-2,5%Mg-0,1%Be в случае кристаллизации сплава со скоростью ~ 20 °С/с. Установлено, что комплексное легирование обеспечивает снижение средних значений ТКЛР в интервале 50–150 °С с 19,5 до $18,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Ключевые слова: алюминий, сплавы алюминий-кремний, температурный коэффициент линейного расширения, кристаллизация, легирование.

Введение

Современные отрасли промышленности, прежде всего точное приборостроение и авиастроение, испытывают потребность в легких материалах, имеющих малый удельный вес в сочетании с низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР, α), поскольку это обеспечивает большую весовую отдачу материала и малую изменчивость размеров деталей [1]. Среди всех легких сплавов, которые могут иметь низкие значения ТКЛР, особое место занимают сплавы алюминия с кремнием. Это объясняется тем, что кремний имеет малую плотность и его ТКЛР много меньше, чем у других легирующих элементов ($\alpha_{20-300} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [2, 3]. С целью улучшения физико-механических свойств в силумины вводят легирующие элементы. В этом отношении сплавы системы Al-Si-Mg представляют интерес для исследователей, так как кремний и магний имеют удельный вес меньше, чем у алюминия в 1,2 и 1,5 раза соответственно [4]. Магний повышает прочностные свойства алюминия, особенно после пластической деформации, и увеличивает восприимчивость к упрочняющей термической обработке [5-8]. Однако магний имеет ТКЛР выше, чем у алюминия, в связи с чем его редко используют в качестве легирующего элемента в сплавах специального назначения [9, 10].

Проведенные нами ранее исследования позволили установить, что при введении магния совместно с кремнием ТКЛР сплавов не только не увеличивается, но наблюдается его

уменьшение. Так, введение больших количеств Mg (5÷30 %) в сплав Al-11% Si приводит к снижению теплового расширения в средне- и высокотемпературном интервале испытания. Однако для приборостроения, обслуживающего, среди прочих, такие наукоемкие отрасли машиностроения как космическая и авиационная техника, рабочим интервалом температур является низкотемпературный интервал [11].

В связи с этим, целью настоящей работы являлось исследование возможности уменьшения ТКЛР сплава Al-11% Si за счет комплексного воздействия, предусматривающего введение магния и последующее легирование элементами, ТКЛР которых меньше, чем у алюминия, такими как бериллий, медь, цирконий (в интервале 0–200 °С $\alpha_{\text{Be}} = 12,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{\text{Cu}} = 16,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{\text{Zr}} = 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Учитывались также условия приготовления сплавов, а именно – скорость кристаллизации.

Методика экспериментального исследования

Для исследования вышеуказанных параметров осуществляли выплавку сплавов в закрытой лабораторной печи сопротивления в алундовом тигле. После расплавления алюминия вводили Si и Mg, затем в расплав поэтапно добавляли такие легирующие элементы, как Be, Cu, Zr. В ходе экспериментов варьировали количество компонентов. После растворения легирующих элементов проводили заливку металла с разной скоростью кристаллизации: в алюминиевый кокиль (~ 20 °С/с) и между двумя медными плитами – имитация жидкой штамповки (~ 100 °С/с). Из полученных слитков изготавливали образцы для дилатометрического исследования. ТКЛР определяли с помощью дифференциального оптического фоторегистрирующего дилатометра системы Шевенара в интервале температур испытания 50–450 °С, погрешность определения составляла $\pm 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Результаты и обсуждение

Ранее нами было установлено [2, 12], что способ кристаллизации сплава имеет большое значение, так как скорость охлаждения при кристаллизации определяет степень пересыщения твердого раствора легирующих элементов в алюминии. В связи с этим было изучено влияние скорости охлаждения на тепловое расширение сплава Al-11%Si-2,5% Mg, легированного различными элементами. Выбор легирующих элементов и их содержание в сплаве были определены на основании ранее выявленных авторами закономерностей [3].

Результаты исследования влияния легирования на тепловое расширение сплава Al-11%Si-2,5%Mg, залитого в кокиль, представлены на рис.1. Из представленных данных видно, что добавка 0,1% Be способствует снижению ТКЛР в низкотемпературном интервале испытания. Введение в легирующий комплекс 4% Cu дает значительное уменьшение теплового расширения сплава Al-11%Si-2,5%Mg-0,1%Be во всем интервале испытания. Последующая присадка 0,5 % Zr дополнительно снижает ТКЛР в высокотемпературном интервале испытания. Установлено, что максимальное снижение ТКЛР сплава Al-11%Si в низко- и среднетемпературном интервалах испытаний (50–300 °С) наблюдается после совместного легирования магнием, бериллием и медью в указанных количествах (см. рис. 1).

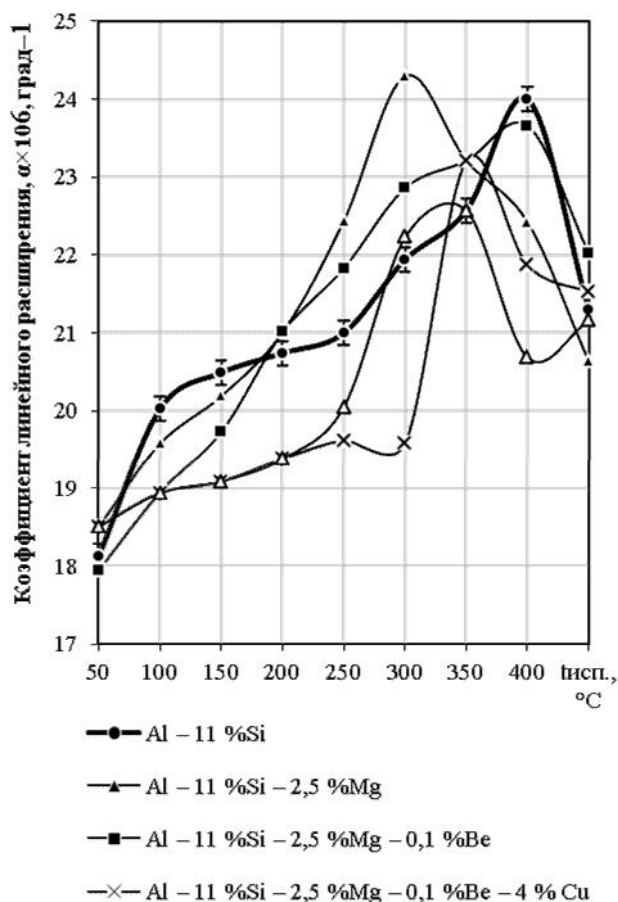


Рис. 1. Влияние легирования на линейное расширение сплава Al-11%Si (литье в кокиль)

На рис. 2 представлены результаты исследования влияния легирования на тепловое расширение сплава Al-11%Si-2,5%Mg, закристаллизованного с высокой скоростью (имитация жидкой штамповки). Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что в данном случае наиболее существенное снижение ТКЛР в низкотемпературном интервале испытания происходит после совместного легирования Mg и Be, а дополнительное введение Cu и Zr несколько повышает ТКЛР. Важным является тот факт, что в интервале 250–300°C наблюдается аномалия теплового расширения, заключающаяся в скачкообразном увеличении значений ТКЛР. Существование аномалии линейного расширения силуминов, содержащих до 30%Si, в интервале 200–300°C было установлено ранее в работах В.К. Афанасьева. Природа этой аномалии связана с увеличением диффузионной активности и перераспределением водорода и азота, находящихся в твердом растворе и выделениях промежуточных фаз. В данном случае появление ярко выраженной аномалии можно объяснить увеличением степени пересыщения твердого раствора водородом, растворенным в жидком металле, после кристаллизации сплавов с высокой скоростью.

Сравнение средних значений ТКЛР исходного сплава Al-11%Si и легированного сплава Al-11%Si-2,5%Mg – показатель возможности снижения ТКЛР за счет подбора легирующего комплекса и скорости кристаллизации сплавов.

В таблице представлены данные дилатометрических измерений в виде средних значений ТКЛР исследованных сплавов, залитых с разной скоростью кристаллизации, в низко-, средне и высокотемпературном интервалах испытаний.

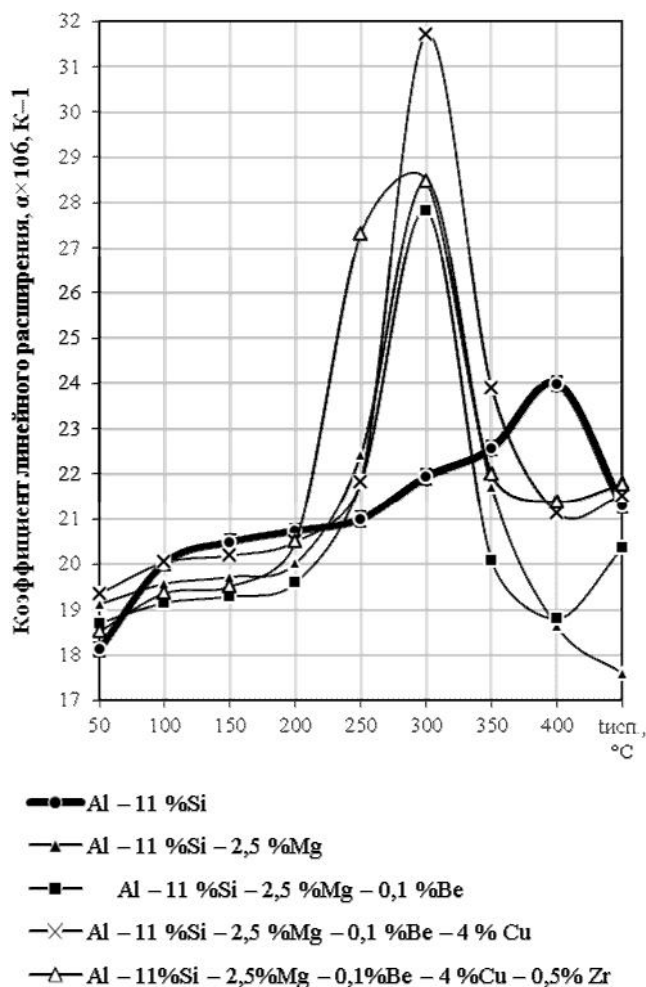


Рис. 2. Влияние легирования на линейное расширение сплава Al-11%Si (имитация жидкой штамповки)

Таблица

Средние значения ТКЛР сплавов Al-Si-Mg, легированных различными элементами

Состав сплава	Средний ТКЛР $\alpha \times 10^6 \text{ K}^{-1}$ в интервале температур, °C		
	50 - 150	200 - 300	350 - 450
<i>Заливка в алюминиевый кокиль</i>			
Al-11%Si	19,5	21,2	22,6
Al-11%Si-2,5%Mg	19,4	22,6	22,0
Al-11%Si-2,5%Mg-0,1%Be	18,9	21,9	22,9
Al-11%Si-2,5%Mg-0,1%Be-4%Cu	18,8	19,5	22,2
Al-11%Si-2,5%Mg-0,1%Be-4%Cu-0,5%Zr	18,8	20,5	21,5
<i>Имитация жидкой штамповки</i>			
Al-11%Si-2,5%Mg	19,5	23,6	19,3
Al-11%Si-2,5%Mg-0,1%Be	19,0	23,0	19,7
Al-11%Si-2,5%Mg-0,1%Be-4%Cu	19,8	24,7	22,2
Al-11%Si-2,5%Mg-0,1%Be-4%Cu-0,5%Zr	19,1	25,4	21,7

Выводы

Показано, что для получения легких сплавов с требуемым ТКЛР возможно использовать сплавы системы Al-Si-Mg после дополнительного легирования. Установлено, что значительное снижение значений ТКЛР наблюдается после введения Cu в сплав Al-11%Si-2,5 %Mg-0,1 %Be и кристаллизации в кокиль. Комплексное легирование обеспечивает снижение средних значений ТКЛР в интервале 50–150 °С с 19,5 до $18,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о возможности снижения значений ТКЛР сплава Al-11%Si за счет подбора легирующего комплекса в сочетании с технологическими параметрами выплавки сплава, в частности, скоростью кристаллизации.

Список литературы

1. *Polmear I.J.* Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals. – Amsterdam: Elsevier Ltd, 2005.
2. О влиянии кремния на тепловое расширение алюминия А7 / В.К. Афанасьев, А.В. Горшенин, М.В. Попова, А.Н. Прудников, М.А. Старостина (М.А. Малюх) // *Металлургия машиностроения*. – 2010. – № 6. – С. 23–26.
3. Effect of alloying on the thermal expansion of aluminum / V.K. Afanas'ev, M.V. Popova, A.A. Ruzhilo, V.F. Frolov // *Russian metallurgy (Metally)*. – 2002. – № 6. – P. 539–544.
4. Свойства элементов: справочник / под ред. М.Е. Дрица. – М.: *Металлургия*, 1985. – 672 с.
5. *Напалков В.И., Махов С.В.* Легирование и модифицирование алюминия и магния. – М.: МИСИС, 2002. – 376 с.
6. Development of the as-cast microstructure in magnesium-aluminium alloys / A.K. Dahle, Y.C. Lee, M.D. Nave, P.L. Schaffer, D.H. StJohn // *Journal of Light Metals*. – 2001. – Vol. 1, iss. 1. – P. 61–72.
7. *Toros S., Ozturk F., Kacar I.* Review of warm forming of aluminum–magnesium alloys // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – Vol. 207, iss. 1–3. – P. 1–12.
8. *Milkereita B., Starinka M.J.* Quench sensitivity of Al–Mg–Si alloys: a model for linear cooling and strengthening // *Materials & Design*. – 2015. – Vol. 76. – P. 117–129.
9. Спеченные материалы из алюминиевых порошков / В.Г. Гопиенко, М.Е. Смагоринский, А.А. Григорьев, А.Д. Беллавин. – М.: *Металлургия*, 1993. – 320 с.
10. Промышленные алюминиевые сплавы: справочное издание / С.Г. Алиева, М.Б. Альтман, С.М. Амбарцумян [и др.]. – М.: *Металлургия*, 1984. – 528 с.
11. *Афанасьев В.К., Попова М.В.* Перспективы развития легких сплавов с малым тепловым расширением для космической техники // *Металлургия машиностроения*. – 2012. – № 6. – С. 8–13.
12. *Попова М.В., Малюх М.А.* Влияние модифицирования на тепловое расширение алюминия и его сплавов // *Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XIX Международной научно-практической конференции / Сибирский государственный индустриальный университет; под ред. Е.В. Протопопова*. – Новокузнецк, 2015. – Ч. 2. – С. 58–61.

EFFECT OF COMPLEX ALLOYING ON THERMAL EXPANSION OF Al-11% Si

Afanas'ev V. K., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: in_afanaseva@mail.ru

Popova M. V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: m.popova@rdtc.ru

Malyuh M. A., Applicant, e-mail: malyuh_ma@umu.sibsiu.ru

Siberian State Industrial University, 42 Kirov str., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Abstract

This paper analyzes effect of complex alloying on the coefficient of linear thermal expansion (CLTE) of alloys Al-Si. In addition, the role of crystallization conditions of ingots (i.e. crystallization speed) is discussed.

It was found that alloying with magnesium induces reduction of the CLTE of Al-11% Si in low and high temperature intervals considered during experiments. Moreover, further alloying with such elements as Be, Cu and Zr causes even a stronger reduction of the coefficient of linear expansion in the temperature intervals considered. When alloying ingots of Al-Si-Mg-Be with Cu and then pouring them into a metal mould the observed reduction of CTLE was the largest.

Keywords

aluminium, alloys are aluminium-silicon, temperature coefficient of linear expansion, crystallization, alloying

УДК 621.793.71

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКОВОГО ПОКРЫТИЯ
ПРИ ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ С КОЛЬЦЕВОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ ПОРОШКА**

*А.О. ТОКАРЕВ, доктор техн. наук, доцент
В.И. КУЗЬМИН, канд. техн. наук, доцент
Я.К. МАЛЫГИНА, аспирант
(СГУВТ, г. Новосибирск)*

Токарев А.О. - 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
Сибирский государственный университет водного транспорта,
e-mail: aot51@ngs.ru

Рассмотрено влияние параметров запылённого плазменного потока на структуру порошковых металлических покрытий. Показано, что дефекты покрытия, такие как: поры, несплошности, отслоения по контактной поверхности, связаны с неоднородностью запылённого потока. Для улучшения качества покрытий, получаемых воздушно-плазменным напылением, усовершенствована конструкция плазмотрона. Наличие секционированной межэлектродной вставки и узла кольцевой инжекции порошка позволяет существенно увеличить эффективность нагрева частиц в потоке плазмы. В результате удаётся напылять покрытия с пористостью менее 1 %. Это увеличивает твёрдость слоя покрытия и позволяет исключить из технологического процесса нанесения износостойких покрытий операцию оплавления.

Ключевые слова: плазменное напыление, кольцевая инжекция, самофлюсующиеся порошки, износостойкие покрытия

Введение

Нанесение металлических порошковых сплавов в потоке термической плазмы является эффективным и экономичным методом создания на поверхностях деталей машин, долговечных износостойких и защитных покрытий. Большое внимание при выборе технологии и параметров напыления уделяют получаемой структуре покрытия, особенно в зоне его взаимодействия с основой, а также пористости нанесённого слоя. Именно эти показатели во многом определяют служебные характеристики детали с упрочнённой поверхностью: износостойкость, жаростойкость, контактную выносливость и др. Для большинства применяемых технологий газотермического порошкового напыления пористость полученного покрытия составляет от 5 до 15%. Причём, контактный слой является зоной с наибольшим количеством дефектов. Это связано с технологией напыления и с особенностью взаимодействия частиц, транспортируемых плазменным потоком, с поверхностью деталей.

Технологический процесс нанесения металлического самофлюсующегося сплава при газотермическом напылении можно представить схемой на рисунке 1, а процесс взаимодействия частиц запылённого потока с основой - схемой на рисунке 2.

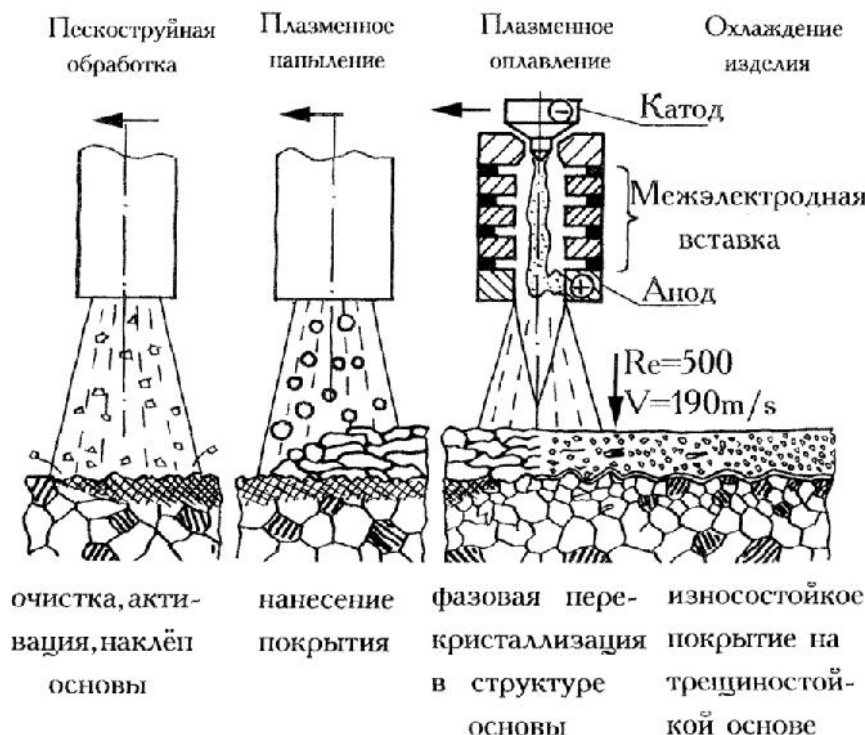


Рис. 1. Технологическая схема процесса газотермического напыления металлических самофлюсующихся сплавов

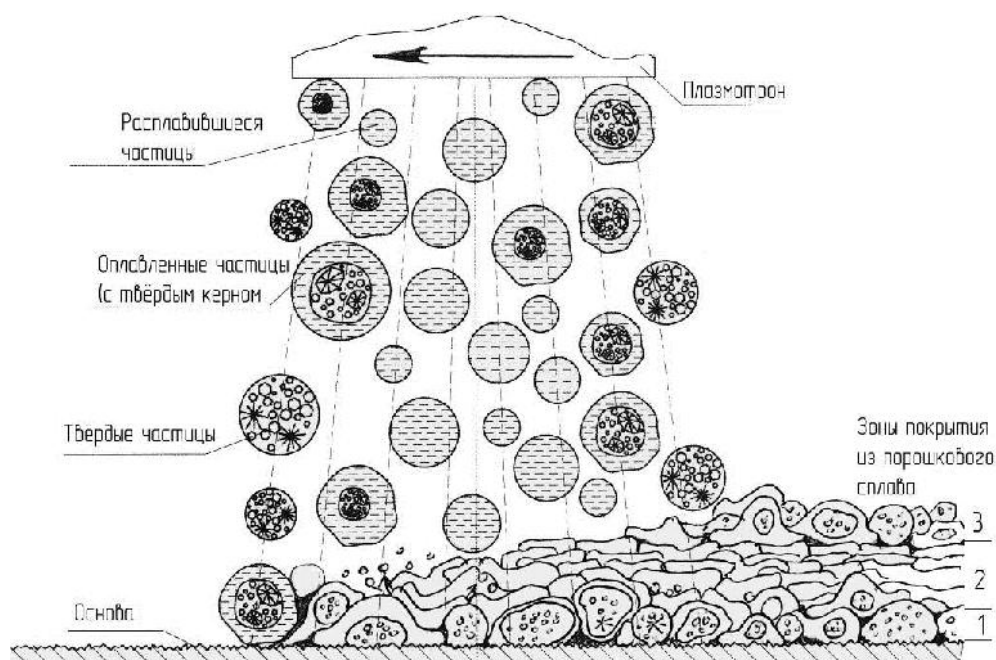


Рис. 2. Схема процесса формирования металлического порошкового покрытия при газотермическом напылении

При подготовке поверхности под напыление производится нанесение "рваной резьбы" [1], иглофрезерование [2], пескоструйная, дробеструйная или иные подобные обработки для её активации, получения развитого микрорельефа, удаления оксидной плёнки [3].

Процессу напыления предшествует операция предварительного подогрева основы, производящаяся напылительным плазмотроном без подачи порошка.

При газотермических методах напыления порошковых покрытий имеет место неравномерное распределение температуры и скорости по сечению потока [4, 5]. Вследствие этого транспортируемые плазменным потоком частицы взаимодействуют с основой, находясь в различных сложных агрегатных состояниях [6]. Об агрегатном состоянии частиц потока и о характере их взаимодействия с основой судили по структуре частиц покрытия.

Микроструктура покрытия неоднородна по своему строению (рис. 3). Во внешних областях потока располагаются преимущественно частицы, находящиеся в твёрдом состоянии и частицы с оплавленной поверхностью (с твёрдым керном). Эти частицы имеют твёрдую сердцевину с выделениями мелких наследственных первичных карбоборидов размером 0,5 – 1,0 мкм (рис. 3,а). При взаимодействии с предварительно активированной основой первые прибывающие частицы внешней зоны потока закрепляются на ней, благодаря механическому зацеплению, заклиниванию, удерживаются слабыми невалентными силами взаимодействия (силами Ван-дер-Ваальса), химическими силами связи и на отдельных участках происходит сваривание их с основой [7]. Твёрдые частицы, сохранившие исходное строение, участвуют в формировании контактного слоя покрытия, будучи захваченными жидкими расплавленными частицами. С основой и между собой частицы свариваются лишь на отдельных участках поверхности там, где при соударении разрушается их оксидная плёнка. На относительно холодной основе частицы быстро охлаждаются и затвердевают. В дальнейшем напорное давление потока не в состоянии «закрыть» несплошности между частицами за счёт их деформирования. Пористость в контактном слое составляет 16-18%. Поры имеют различную форму: разветвленные, с острыми краями, скруглённые, сжатые в плоскости покрытия. Характер связей частиц в контактной зоне покрытия обуславливает его низкую адгезионную и когезионную прочность, которая при определении её штифтовым методом составила 30...40 МПа.

Среднее сечение потока содержит частицы, находящиеся в основном, в расплавленном состоянии. Эти частицы при кристаллизации после закрепления на обрабатываемой поверхности получают структуру твёрдого раствора, что обусловлено достаточно высокой скоростью их охлаждения на основе (рис. 3,б). Отдельные частицы имеют выделения вторичной дисперсной твёрдой фазы. Очевидно, это следствие теплообмена с расплавленными частицами потока. Частицы со структурой твёрдого раствора имеют наиболее высокую микротвёрдость (H_{20} 14-18 ГПа), что объясняется структурными изменениями, происходящими во время их закалки из жидкого состояния. При выделении из твёрдого раствора вторичных частиц его микротвёрдость снижается до H_{20} 6,6 - 9,2 ГПа.

Внешние слои покрытия формируются частицами тыльной периферийной части потока, обладающими, как и частицы фронтальной части, меньшей скоростью и температурой. Поверхность покрытия не подвергается воздействию "напорного давления" потока. Частицы с невысокой скоростью закрепляются на активированных участках с развитым рельефом, образуя рыхлую шероховатую поверхность. Здесь наблюдаются как частицы с формой близкой к сферической, так и деформированные частицы с признаками подплавления (рис. 3,в).

Из приведённых данных видно, что покрытие неоднородно и имеет строение в поперечном сечении в виде трёх характерных зон.

При наращивании толщины покрытия более 300 мкм под действием увеличивающихся внутренних напряжений появляются несплошности между основой и покрытием. Для прочного сцепления покрытия с основой производится дополнительная его термическая обработка. В технологическом цикле плазменного напыления целесообразно оплавление напылённого покрытия плазменным методом. Однако это, как и любая другая дополнительная обработка, усложняет и удорожает технологию.

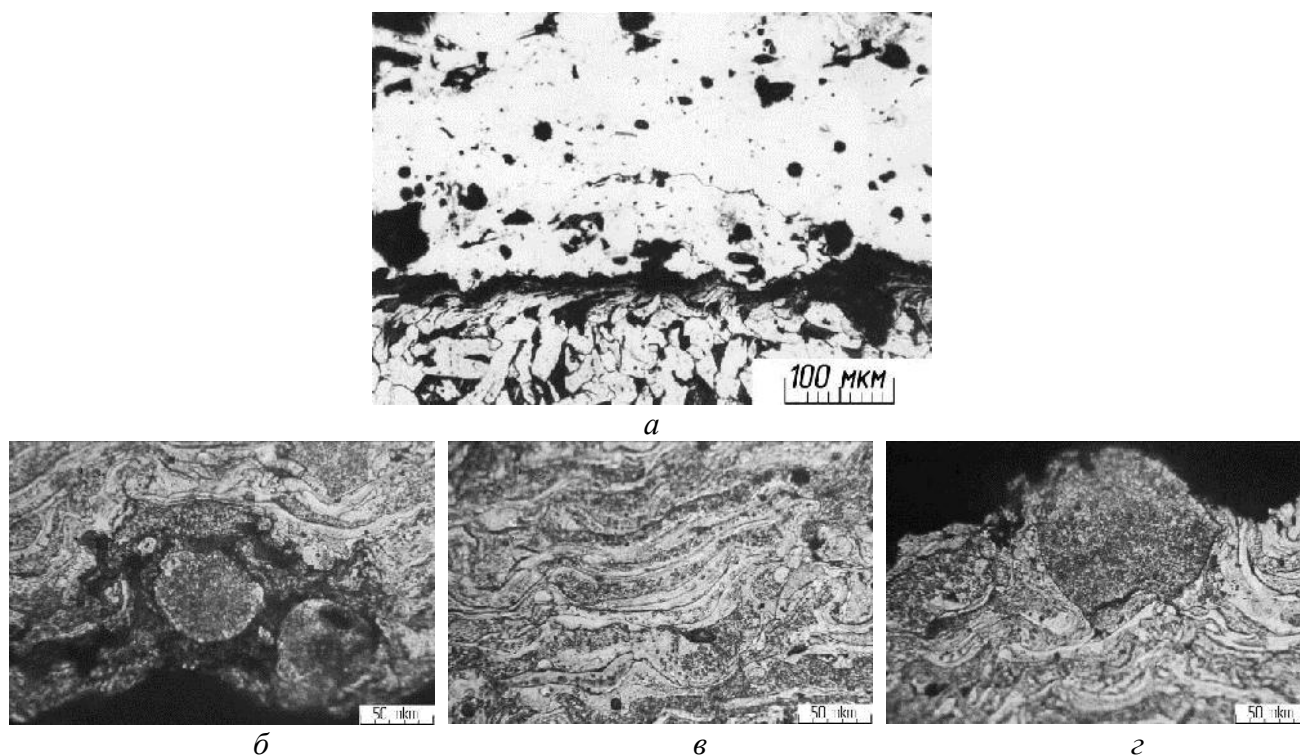


Рис. 3. Микроструктура порошкового покрытия в целом и особенности строения его характерных зон (обозначение зон цифрами - то же, что на рис. 2) при газотермическом напылении: *а* - покрытие в целом (травление 5% HNO_3), *б* - зона 1 сцепления с основой, *в* - средняя зона 2, *г* - внешняя зона покрытия – 3 (*б, в, г* - термоокислительное травление)

Из приведённых данных следует, что неоднородность полей температуры и скорости в потоке плазмы способствует одновременному существованию в его сечении частиц, имеющих значительные отличия по тепловой и кинетической энергии и даже находящихся в различных агрегатных состояниях. Это, а также наличие на поверхности частиц оксидных плёнок, выделение адсорбированного частицами газа приводит к пористости покрытия (14—18%), то есть снижает качество покрытий при плазменном напылении.

Материалы и методики исследований

В стремлении повысить качество напылённого покрытия усовершенствована конструкция плазмотронов. Наиболее перспективным, с точки зрения получения осесимметричного высокотемпературного гетерогенного потока, является использование узла кольцевого ввода порошка. Использование узла кольцевого ввода способствует более эффективному нагреву частиц и увеличению производительности обработки по сравнению с односторонним точечным вводом (рис. 4) [8,9].

Повысить эффективность работы плазмотрона позволила также небольшая добавка пропана (в смеси с воздухом) перед анодом (завеса анода). Пропан связывает кислород в пограничном слое плазменного потока и, таким образом, резко снижает эрозию анода, т.к. основной механизм эрозии на воздухе - окислительный. Снижение эрозии – это не только повышенный ресурс работы плазмотрона, но и получение чистой плазмы (практически без продуктов эрозии).

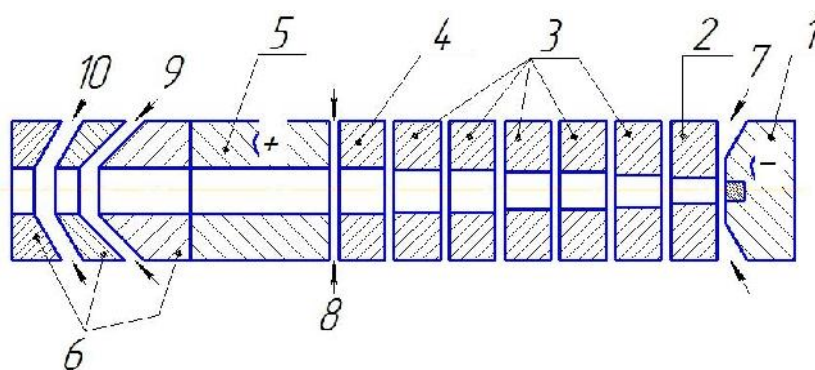


Рис. 4. Схема плазматрона ПНК-50: 1- катод; 2 – пусковая секция; 3 - секции межэлектродной вставки; 4 - переходная секция; 5 – анод; 6 - узел кольцевого ввода порошка с газодинамической фокусировкой; 7 – плазмообразующий газ; 8 – защитный газ (завеса анода); 9 – порошок с транспортирующим газом; 10 – фокусирующий газ.

Добавка пропана в транспортирующий и фокусирующий газы (воздух) так же обусловлена желанием связать кислород и, таким образом, снизить окисление порошка. Кроме того, в узле кольцевого ввода порошка с газодинамической фокусировкой большие расходы транспортирующего и фокусирующего воздуха и добавка пропана, за счёт его сгорания, исключает существенное захлаживание плазмы.

Параметры процесса напыления покрытия в потоке плазмы с использованием радиально-кольцевой инжекции дисперсного порошкового сплава на никелевой основе ПР-Н77Х15СЗР2-3 дисперсностью 40/100 мкм, и полученная при этом пористость покрытия приведены в таблице.

Таблица

Параметры режима напыления и пористость полученного покрытия				
№ режима	Напряжение, В	Сила тока, А	Средняя температура частиц порошка	Пористость, %
1	265	140	2189 ± 199	9,0
2	258	170	2249 ± 220	5,4
3	250	200	2292 ± 236	6,1
4	243	230	2383 ± 250	5,6

Перед напылением поверхность образцов подверглась пескоструйной обработке. Дистанция напыления составляла 170 мм. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газов использовали смесь воздуха и пропан-бутана, в качестве завесы анода – пропан-бутан. Расход плазмообразующего газа – 3 г/с, расход как транспортирующего, так и фокусирующего газов составлял 0,9 г/с.

Для снятия внутренних напряжений, возникающих в покрытиях после напыления, выполняли отжиг при температуре 350 °С в течение 4 часов.

Анализ температур нагрева частиц в плазменной струе был выполнен при помощи аппаратуры и методики, разработанной в ИТПМ СО РАН [10].

Металлографические исследования полученных покрытий проводились на микроскопе МИМ-8М. Микротвёрдость частиц покрытия измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 20 г.

Результаты и обсуждение

Толщина полученных покрытий составляет 350...400 мкм. Пористость напыляемого покрытия определяли микроскопическим методом на микрошлифах в поперечном сечении покрытия после травления в нитале. Установлено, что при увеличении силы тока до 170 А и повышении вследствие этого энергии потока пористость снижается до 5...6 % . Улучшается строение зоны сцепления покрытия с основой – строение частиц становится более однородным (рис. 5). По-видимому, большего эффекта в улучшении строения покрытия можно добиться, отсекая внешние участки запылённого потока экранами.

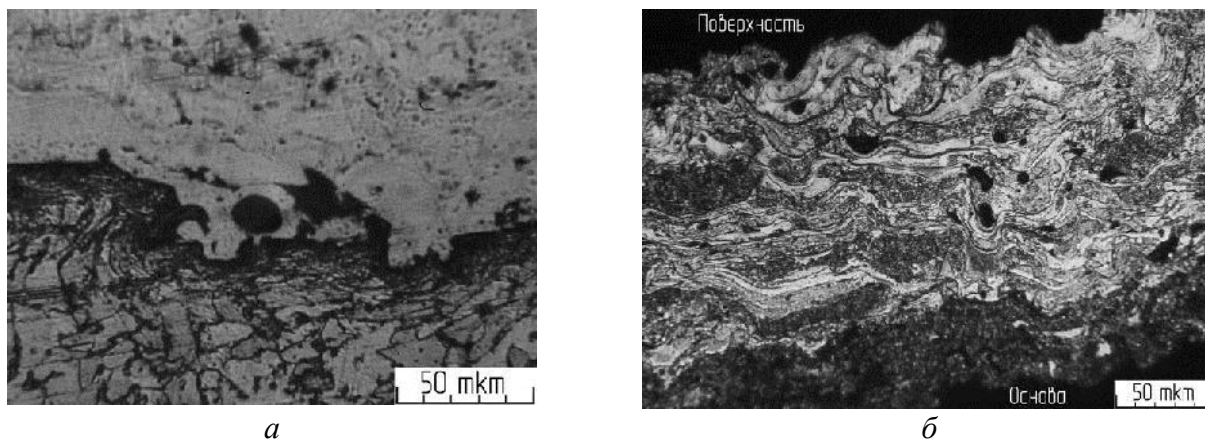


Рис. 5. Микроструктура покрытия, полученного при радиально-кольцевой инжекции порошка, ток дуги - 170 А: а – травление 5% HNO₃ ; б – термоокислительное травление

Наиболее убедительный эффект от совершенствования конструкции плазмотрона выявлен при измерении твёрдости получаемых покрытий по методу Роквелла. При тех же средних значениях микротвёрдости отдельных частиц, что и в покрытиях, напылённых в турбулентном плазменном потоке, твёрдость покрытия, напылённого с использованием распределённого кольцевого ввода порошка, в целом увеличилась до HRC 55-60. Это является следствием снижения пористости, улучшению сцепления покрытия с основой и частиц между собой (рис. 6, 7).

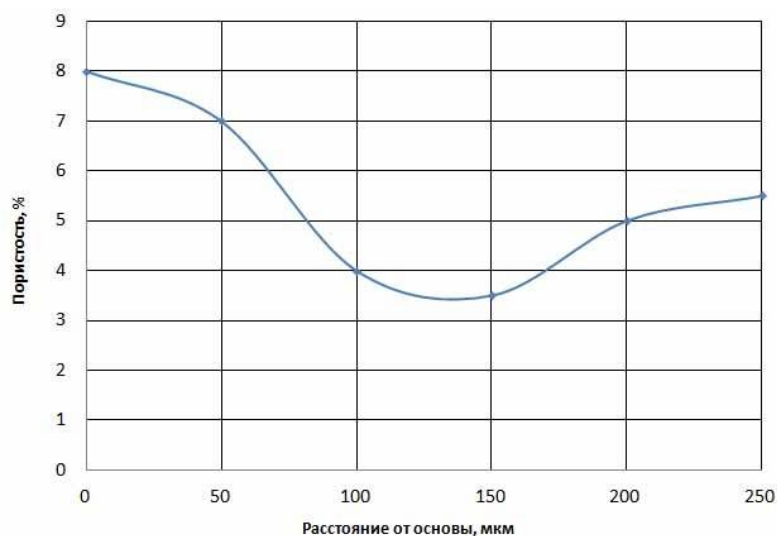


Рис. 6. Изменение пористости порошкового покрытия по глубине

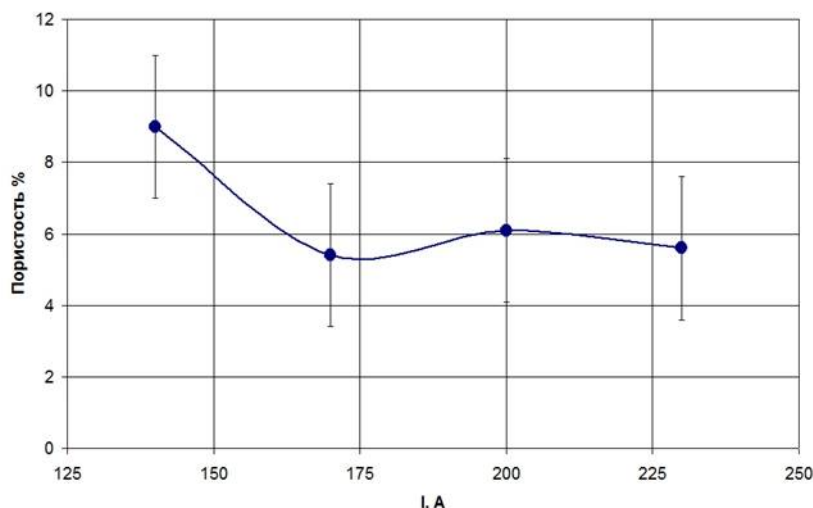


Рис. 7. Зависимость средней величины пористости напылённого покрытия от силы тока

Выводы

- Использование распределённого кольцевого ввода порошка в плазменный поток позволяет существенно увеличить эффективность взаимодействия напыляемого порошка с потоком термической плазмы и сформировать покрытия с повышенными физико-механическими характеристиками.

- Добавка пропан-бутана в качестве завесы анода дополнительно повышает эффективность работы плазмотрона.

- Улучшение структуры покрытий позволит применить технологию восстановления и упрочнения поверхностей деталей машин плазменным напылением порошковыми сплавами без дополнительного оплавления.

Список литературы

1. Методы исследования материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев, В.И. Синдеев. – М.: Мир, 2004. – 384 с.

2. Вороненко В.П., Седых М.И. Параметры резания при иглофрезеровании // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2009. – Т. 1, № 2. – С. 192–195.

3. Токарев А.О. Упрочнение деталей машин износостойкими покрытиями. – Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2000. – 200 с.

4. Газотермические покрытия / В.Н. Анциферов, А.М. Шмаков, С.С. Агеев, В.Я. Буланов. – Екатеринбург: Наука, 1994. – 318 с.

5. Харламов Ю.А. Классификация видов взаимодействия порошка с подложкой при нанесении покрытий // Порошковая металлургия. – 1988. – № 1. – С. 18–22.

6. Kuzmin V.I., Tokarev A.O. Thermal treatment of plasma-spraying coating // Plasma Jets in the Development of New Materials Technology: Proceedings of the International Workshop, 3–9 September 1990, Frunze, USSR. – Utrecht, the Netherlands; Tokyo, Japan: VSP, 1990. – P. 375–382.

7. Плазменное напыление порошковых покрытий при газодинамической фокусировке дисперсной фазы / В.И. Кузьмин, Е.В. Каратаев, Д.В. Сергачев, Е.Е. Корниенко, Е.Ю. Лапушкина, А.О. Токарев // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 482–488.

8. Солоненко О.П., Сорокин А.Л. Межфазный обмен теплом в условиях радиально-кольцевой инжекции дисперсного материала в поток плазмы // Известия СО АН СССР. Серия технических наук. – 1990. – Вып. 5. – С. 75–82.

9. Патент WO 90/12123. Способ плазменной обработки и плазмотрон / С.А. Ермаков, М.В. Карасев, В.С. Клубникин, В.М. Масленников, П.А. Тополянский, С.Ю. Федоров. 1990.

10. Методы контроля температуры и скорости частиц конденсированной фазы в процессе плазменно-дугового напыления / М.П. Бороненко, И.П. Гуляев, П.Ю. Гуляев и др. // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-6. – С. 1194–1199.

IMPROVING THE QUALITY OF POWDERED METAL COATING BY PLASMA SPRAYING WITH ANNULAR INJECTION POWDER

Tokarev A.O., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: aot51@ngs.ru

Kuzmin V.I., Ph.D. (Engineering), e-mail: vikuzmin57@mail.ru

Malygina Ya.K., Post-graduate Student, e-mail: 1402_2010@mail.ru

Siberian State University of Water Transport, 33 Schetinkina st., Novosibirsk, 630099, Russian Federation

Abstract

View influence of parameters of dusty plasma flow on the structure of metal powder coatings. It is shown that coating defects such as pores and discontinuities, delamination at the contact surface, associated with the heterogeneity of dusty flow. To improve the quality of coatings produced by plasma spraying air, improved design of the plasma torch. The device interelectrode inserts and ring powder injection allows to significantly increase the efficiency of heating the particles in the quasi-plasma stream. As a result received sprayed coating having a porosity of less than 5%. This increases the hardness of the coating layer and eliminates of technologic process of infliction wear-resistant coating reflow operation

Keywords

plasma spraying, the annular injection, self-fluxing powders, wear-resistant coating

УДК 621.793.184:621.762.8

СВЕРХТВЕРДОЕ ПОКРЫТИЕ НА ТВЕРДОМ СПЛАВЕ ВК8*

*Т.Н. ОСКОЛКОВА*¹, канд. техн. наук, доцент
*А.Г. ТЮРИН*², канд. техн. наук, доцент
*А.П. СТРАХОВ*², магистрант
(¹ СибГИУ, г. Новокузнецк,
² НГТУ, г. Новосибирск)

Осколкова Т.Н. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: oskolkova@kuz.ru

В работе проведено исследование сверхтвёрдого ионно-плазменного покрытия (TiN, ZrN), полученного на поверхности твёрдого сплава ВК8. Полученное покрытие имеет толщину 15 мкм, отличается высокой нанотвёрдостью 34450 МПа и хорошей адгезионной прочностью с основным материалом. Экспериментально установлено, что сформированное покрытие имеет слоистое строение и состоит из нитридов титана TiN и циркония ZrN, что способствует повышению износостойкости и эксплуатационной надёжности твёрдого сплава. Применение сверхтвёрдых покрытий позволяет сочетать высокую твердость и износостойкость поверхности с высокой прочностью основного материала, что способствует повышению скорости резания при механической обработке.

Ключевые слова: Твёрдый сплав, нанотвёрдость, износостойкость, шероховатость, адгезия, структура, ионно-плазменное покрытие.

Введение

Низкокобальтовые карбидовольфрамовые твёрдые сплавы (ВК8, ВК6) обычно используют при механической обработке труднообрабатываемых металлов и сплавов при низкой скорости резания, где влияние температуры исключено. При более высокой температуре карбидовольфрамовый инструмент изнашивается из-за адгезии между режущим и обрабатываемым материалом, поэтому при высоких скоростях резания применяют режущий инструмент с добавлением карбида титана [1, 2]. Карбид титана отличается низкой растворимостью в кобальте по сравнению с карбидом вольфрама и в меньшей степени склонен к диффузии, поэтому даже при высоких температурах затрудняется его сваривание со стальной движущейся стружкой. Вместе с тем, наличие частиц карбида титана в твердом сплаве приводит к снижению прочностных свойств при сжатии, изгибе, уменьшению вязкости твёрдого сплава в целом и самой режущей кромки [1].

Повышение работоспособности режущих инструментов – одна из главных проблем металлообрабатывающей промышленности. Одним из эффективных путей решения этой задачи является создание износостойких покрытий на неперетачиваемых режущих пластинах из твердых сплавов [3–9].

*Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки России № 11.153.2014/К

Как показали результаты работ [10–13], применение ионно-плазменных покрытий на твёрдом сплаве ВК10КС, которым оснащают буровой и горно-режущий инструмент, приводит к повышению поверхностной твёрдости. В этой связи целью настоящего исследования явилось изучение структуры и свойств ионно-плазменного покрытия состава TiN и ZrN на твёрдом сплаве ВК8.

Методика экспериментального исследования

В настоящей работе объектами исследования служили твёрдосплавные пластины ВК8 производства ОАО «Кировоградский завод твёрдых сплавов» (Россия). Ионно-плазменные TiN, ZrN покрытия наносили в вакуумной камере установки «Квант-6» из отдельных катодов титана и циркония при соотношении компонентов 50 % Ti + 50 % Zr (рис.1). В качестве реакционного газа использовали азот с энергией ионов 100 эВ [14, 15].

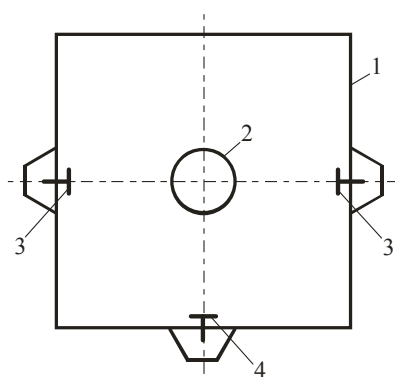


Рис. 1. Схема установки для нанесения ионно-плазменного покрытия из отдельных катодов: 1 – корпус; 2 – стол; 3 – катоды из титана; 4 – катод из циркония

Исследование структуры твёрдого сплава с ионно-плазменным покрытием осуществлялось с помощью растрового электронного микроскопа «Philips XL-30».

Рентгеноструктурные исследования производились с помощью дифрактометра ДРОН-2,0 в $Fe_{K\alpha}$ -излучении.

Для определения поверхностной твёрдости сплавов с ионно-плазменным покрытием применялся метод наноиндентирования на приборе «Nano Hardness Tester».

Трибологические испытания исходных образцов и с покрытием при комнатной температуре проводились с помощью высокотемпературного трибометра «PC-Operated High Temperature Tribometer». Износ образцов определялся путем измерения глубины и площади трека износа после испытаний, образованного в результате действия неподвижного алмазного индентора на вращающийся образец при нагрузке 3 Н, линейной скорости движения 2,5 см/с. Количество оборотов для образцов без покрытия составляло 4000 и 12000 для образцов с покрытиями.

Микрогеометрия поверхности твёрдого сплава до и после нанесения ионно-плазменного покрытия изучалась на установке «Micro Measure 3D station».

Адгезионные характеристики ионно-плазменного покрытия на твёрдом сплаве определялись с помощью установки Micro Scratch Tester (MST) с использованием методики «царапания» алмазным индентором, на который действует линейно-возрастающая сила нагружения. Характеристикой адгезионной прочности выступала сила при которой начинается отслаивание покрытия.

Результаты и обсуждение

Исследование особенностей строения твёрдого сплава ВК8 с ионно-плазменным покрытием показало, что сформированное покрытие толщиной 15 мкм имеет слоистое строение (рис. 2). Результаты рентгенографических исследований свидетельствуют о наличии в покрытии двух фаз: TiN и ZrN имеющих ГЦК решётки.

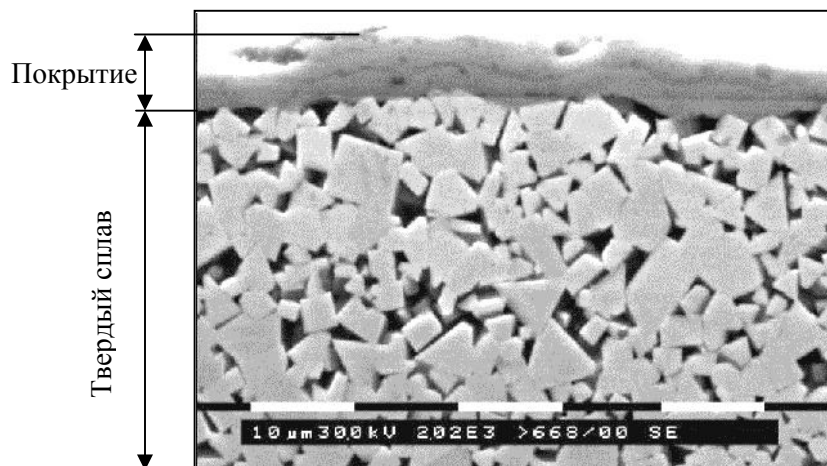


Рис. 2. Микроструктура сплава ВК8 с ионно-плазменным покрытием

Нанотвёрдость покрытия составляет 34448 МПа (рис. 3). Помимо высокой нанотвёрдости выявлено и высокое значение модуля Юнга E (524,36 ГПа), которые свидетельствуют о повышении энергии связей между атомами, а, следовательно, и жесткости материала покрытия.

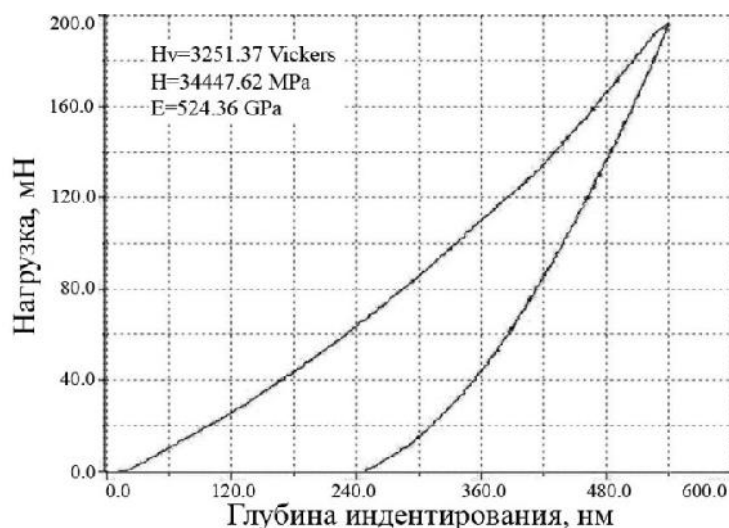


Рис. 3. Кривая нагрузки – разгрузки при nanoиндентировании ионно-плазменного покрытия TiN, ZrN на сплаве ВК8

Трибологические испытания образцов с ионно-плазменным покрытием показали, что площадь сечения трека изношенных образцов с покрытием на сплаве ВК8 составляет $4,4 \text{ мкм}^2$, на сплаве без покрытия – 12334 мкм^2 . Глубина трека износа у твёрдого сплава с покрытием составляет 97 нм, а у исходного образца – 57,8 мкм (рис. 4). Высокая

износостойкость ионно-плазменного покрытия (TiN, ZrN) на твёрдом сплаве ВК8 хорошо согласуется с атомно-энергетической концепцией В.Ф. Моисеева [1].

Гладкие поверхности лучше сопротивляются износу, чем шероховатые [16, 17]. В этой связи, была исследована микрогеометрия поверхности твёрдого сплава до и после нанесения ионно-плазменного покрытия. Шероховатость поверхности исходного образца без покрытия составляет $R_a = 1,30$ мкм, а после нанесения ионно-плазменного покрытия снижается до 0,90 мкм (рис. 4).

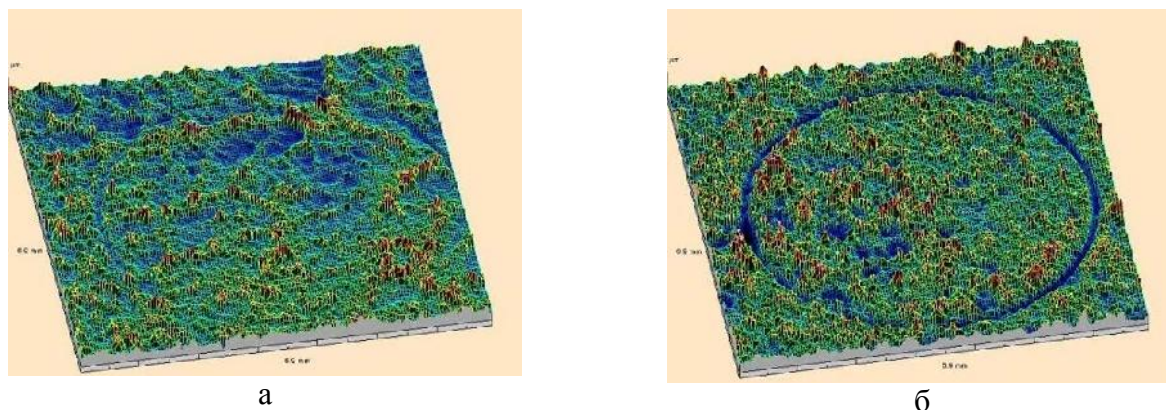


Рис. 4. Внешний вид треков при трибологических испытаниях сплава ВК8 с ионно-плазменными покрытиями (а) и в исходном состоянии (б)

Одной из важных характеристик для образцов с тонкими сверхтвёрдыми покрытиями является адгезионная прочность покрытия с основным металлом. Адгезия характеризует прочность контакта образовавшегося соединения покрытия с подложкой. Предполагается, что она во многом зависит от энергии, падающей на подложку частицы: чем выше энергия, тем лучше адгезия. Ионно-плазменные покрытия характеризуются более высокой энергией падающих частиц, чем, например, при методе термического вакуумного напыления [14], что может способствовать повышению адгезионной прочности с основным материалом.

По данным скретч-теста ионно-плазменного покрытия, нанесённого на твердый сплав ВК8, установлено, что критическая нагрузка, при которой происходит частичное разрушение покрытия, составляет 57 Н. Высокая адгезия ионно-плазменного покрытия с твёрдым сплавом ВК8 объясняется наличием в покрытии микрослоистости, что способствует повышению адгезионной прочности и трещиностойкости [3].

Выводы

1. На поверхности твёрдого сплава ВК8 получено сверхтвёрдое ионно-плазменное покрытие состава TiN, ZrN с нанотвёрдостью 34450 МПа и толщиной 15 мкм с хорошей адгезионной прочностью с основой. Применение сверхтвёрдых покрытий позволяет сочетать высокую твердость и износостойкость поверхности с высокой прочностью сердцевины, что способствует повышению скорости резания при механической обработке.

2. Экспериментально установлено, что сформированное покрытие имеет слоистое строение, что способствует повышению износостойкости и эксплуатационной надежности твёрдого сплава.

Список литературы

1. Панов В.С., Чувилин А.М., Фальковский В.А. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. – М.: МИСиС, 2004. – 464 с.
2. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 272 с.
3. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 2008. – 311 с.
4. Патент 2004116008 Российская Федерация, МПК С 23 С 14/06, С 23 С 14/48. Режущий инструмент с многослойным покрытием / В.П. Табаков, А.В. Циркин, А.В. Чихранов; Ульяновский государственный технический университет. – № 2004116008/02; заявл. 25.05.2004; опубл. 27.02.2006.
5. Патент 6756111 США, МПК, В 32 В 9/00. Покрытый твердый сплав / Okada Yoshin, Moriguchi Hideki, Ikegaya Akihiko; Sumitomo Electric Ind. Ltd. – № 09/980820; заявл. 15.06.2000; опубл. 29.06.2004.
6. Патент 2004116008 Российская Федерация, МПК С 23 С 14/06, С 23 С 14/48. Режущий инструмент с многослойным покрытием / В.П. Табаков, А.В. Циркин, А.В. Чихранов; Ульяновский государственный технический университет. – № 2004116008/02; заявл. 25.05.2004; опубл. 27.02.2006.
7. Патент 2004119467 Российская Федерация, МПК В 23 В 27/04, С 23 С 14/46, С 23 С 14/58. Режущий инструмент с покрытием / В.П. Табаков, А.В. Циркин, А.В. Чихранов, С.Н. Власов, М.Ю. Смирнов; Ульяновский государственный технический университет. – № 2004119467/02; заявл. 25.06.2004; опубл. 10.01.2006.
8. Тюрин А.Г. Исследование особенностей формирования твердосплавных покрытий на поверхности технического железа // Физическая мезомеханика. – Т. 7, ч. 2. – 2004. – С. 209–211.
9. Повышение износостойкости стального инструмента с твердосплавными покрытиями / А.А. Батаев, С.В. Буров, А.Г. Тюрин, И.А. Батаев, С.В. Веселов, В.Г. Буров // СТИН. – 2006. – № 7. – С. 20–21
10. Oskolkova T.N. Wear-resistant coating on hard alloy // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 281–285.
11. Oskolkova T.N. Wear resistant coating on tungsten carbide hard alloy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 91. – P. 012020.
12. Oskolkova T.N. Improving the wear resistance of tungsten – carbide hard alloys // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 45, N 5. – P. 318–321.
13. Осколкова Т.Н. Способ повышения износостойкости карбидовольфрамовых твердых сплавов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 5. – С. 341–345.
14. Марголин В.И., Жабреев В.А., Тупик В.А. Физические основы микроэлектроники. – М.: Академия, 2008. – 400 с.
15. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий (теория, технология, оборудование). – М.: Интернет Инжиниринг, 2004. – 624 с.
16. Блинова Т.А., Погонин А.А., Бойко А.Ф. Зависимость шероховатости поверхности малых отверстий от типа рабочей среды и режимов электроэрозионной обработки // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. – Т. 12, № 1 (2). – С. 301–303.
17. Осколкова Т.Н. Влияние способов нанесения покрытий на шероховатость WC-Co твердого сплава // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 10. – С. 15–19.

SUPER HARD COATING ON THE HARD ALLOY VK8

Oskolkova T.N.¹, Ph.D.(Engineering), Associate Professor, e-mail: oskolkova@ruz.ru
Tyurin A.G.², Ph.D.(Engineering), Associate Professor, e-mail: tyurin78@mail.ru
Strahov A.P.², Master's Degree student, strahov90@mail.ru

¹ Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

In this research a super hard with nanohardness 34450 MPa ionic plazma coating on the surface of a hard alloy VK8 is got. This coating consists of (Ti, Zr)N and has the thickness of 15 μm. The coating has very good adhesive strength. During the experiment it was established that the even distribution of TiN and ZrN in the coating despite the micro layering of the covering itself leads to the increase of the anti-friction ability and, in general, increases service features of the hard alloy. There is an opportunity to allow the required compromise between the properties of the surface layer and the material of the cutting tools which will let the tool-cutting speed to be increased when mechanical treatment takes place.

Key words

Hard alloy, nanohardness, antifriction ability, roughness, adhesion, structure, ionic-plasma coating

Funding

The work within the project of the state order of the Ministry of Education and Science of Russia № 11.153.2014 / K

УДК 620.18

ОСОБЕННОСТИ МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ПРЯМЫМ ЛАЗЕРНЫМ ВЫРАЩИВАНИЕМ СПЛАВА НА ОСНОВЕ Ni

*М.В. РАШКОВЕЦ¹, магистрант
А.А. НИКУЛИНА¹, канд. техн. наук, доцент
О.Г. КЛИМОВА², канд. техн. наук, ассистент
(¹ НГТУ, г. Новосибирск,
² СПбПУ, г. Санкт-Петербург)*

Рашковец М. В. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: lipa_04@mail.ru

В статье рассмотрены химический состав и особенности структуры образцов, полученных прямым лазерным выращиванием порошков на основе никеля при различных параметрах работы установки. В процессе выращивания варьировалась мощность лазерного излучения в пределах от 250 до 1500 Вт. Структурные исследования показали наличие дендритной структуры в пределах наплавленных слоев от последовательного прохождения лазера. Толщина слоев увеличивается с повышением мощности лазерного излучения. Максимальная толщина стенки образцов достигнута при 1500 Вт, что аналогично и для толщины отдельно выращенного слоя. Минимальная толщина стенки бездефектного образца формируется при мощности 500 Вт.

Ключевые слова: высокоскоростное прямое лазерное выращивание, никелевые сплавы, структура

Введение

В настоящее время в России активизировалось развитие аддитивных технологий. Производственный принцип данного направления заключается в последовательном выращивании деталей машин по компьютерной 3D модели, что обеспечивает точность поверхности, минимизирует потери материала при изготовлении и последующей механической обработке деталей. Одним из видов аддитивных технологий является высокоскоростное прямое лазерное выращивание. Принцип технологии основан на расплавлении при помощи лазера исходного материала (порошка), который подается на подложку одновременно с лучом лазера, и дальнейшем затвердевании слоев, путем отвода тепла сначала в подложку, а затем в уже осажденные слои. Номенклатура порошковых материалов весьма разнообразна. Технология является выгодной по расходу исходного материала в сравнении с другими видами аддитивных технологий, например, с силикативным лазерным спеканием, где порошок слоем определенной толщины полностью покрывает подложку и спекается по траектории движения лазера, неиспользованный материал сыпается в подающей лоток для повторного использования [1, 2].

Сплавы на основе никеля обладают высокой механической прочностью, коррозионной стойкостью в широком диапазоне агрессивных сред, жаростойкостью, жаропрочностью, хорошей обрабатываемостью [3]. К коррозионностойким сплавам на основе никеля относятся сплавы системы Ni-Mo с содержанием молибдена от 25 до 30 %, а также сплавы системы Ni-Cr с процентным содержанием хрома в пределах 35-50 %. При

увеличении содержания легирующих элементов, обрабатываемость сплавов давлением ухудшается, поэтому сплавы данного типа используют в литом состоянии [4].

Целью работы являлось определение режима, позволяющего получить минимальную и максимальную толщину стенки образца, выращенного из порошка сплава системы Ni-Cr-Mo.

Методика проведения экспериментов

Высокоскоростное прямое лазерное выращивание осуществлялось на установке Erlaser Weld (кафедра «Сварка и лазерные технологии», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет).

Химический анализ исходных материалов проводился при помощи растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 50 XVP с энергодисперсионным микроанализатором INCA. Согласно микрорентгеноспектральному анализу исходный порошок содержит элементы в следующих пропорциях: 58,5 % Ni, 21,78 % Cr, 10,88 % Mo, 3,87 % Nb. Фазовый состав порошка – твердый раствор на основе никеля. Средний размер частиц порошка составил 123,6 мкм (рис. 1). Подача порошка из коаксиального сопла в рабочую зону осуществлялась со скоростью 20 г/мин. Диаметр лазерного пятна составил 1,2 мм. Мощность лазерного излучения изменяли от 250 до 1500 Вт. Перемещение лазера по траектории производилось при скорости 45 мм/с.

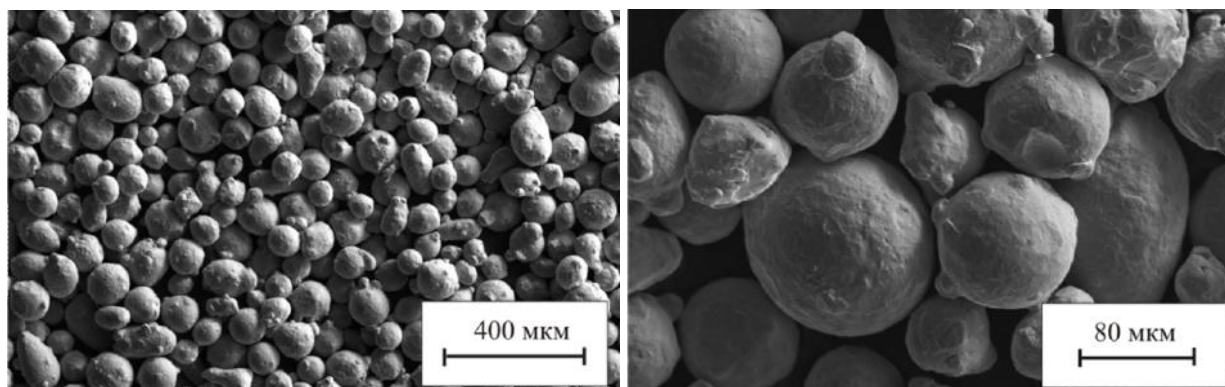


Рис. 1. Изображение исходного порошка

Перед проведением исследований выращенный образец был нарезан на мерные заготовки, соответствующие различным мощностям лазерного излучения. Структурные исследования материала проводили на световом микроскопе Carl Zeiss AxioObserver A1m, а также на растровом электронном микроскопе. Для выявления структуры образцов использовали раствор, составленный в следующих пропорциях: 2 мл HNO_3 , 4 мл HCl и 2 мл H_2O_2 .

Результаты исследований

На снимках поперечного сечения образцов, полученных на световом микроскопе, наблюдаются наплавленные слои, толщина которых зависит от мощности лазерного излучения. На рис. 2 представлены слои, выращенные при 500 (рис. 2 а) и 1500 Вт (рис. 2 б), со средними значениями толщин, составляющими 184 мкм и 415 мкм, соответственно.

Толщина стенки образцов также находится в прямой зависимости от мощности лазерного излучения. Полученные данные по средней толщине образцов представлены в таблице.

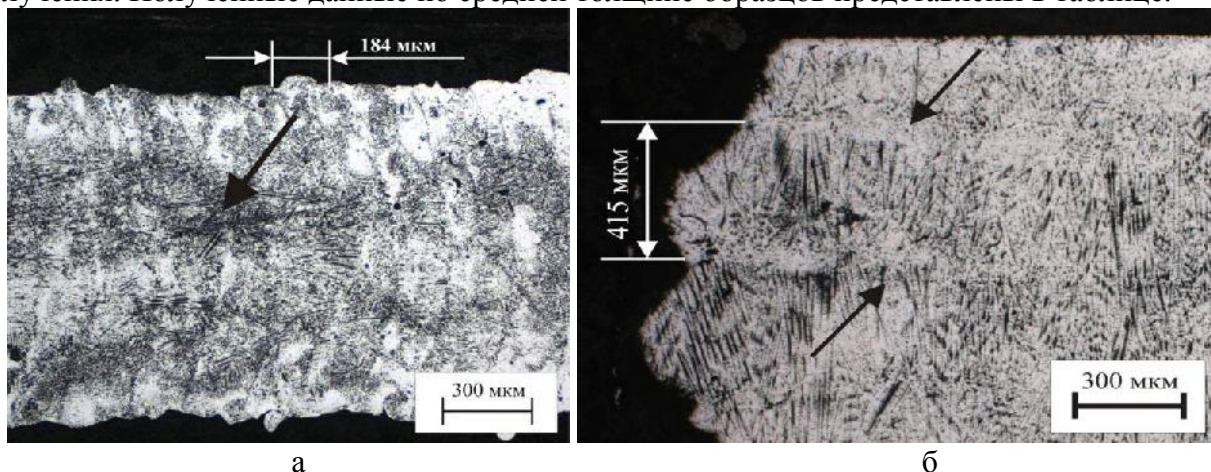


Рис. 2. Наплавленные слои в поперечном сечении образцов: а – 500 Вт; б – 1500 Вт [5].

Таблица

Влияние мощности лазерного излучения на толщину образцов

Мощность, Вт	250	500	750	1000	1500
Средняя толщина, мкм	854	964	1109	1636	1891

При малых мощностях в микроструктуре образцов были обнаружены не полностью расплавившиеся частицы исходного материала, которые при затвердевании окружающего их материала, являлись центрами кристаллизации (рис. 3). Таким образом, для получения минимальной толщины стенки с однородной структурой следует применять мощность лазерного излучения не менее 500 Вт. Максимальная толщина стенки была достигнута при 1500 Вт лазерного излучения, при этом в микроструктуре образца дефектов выявлено не было.

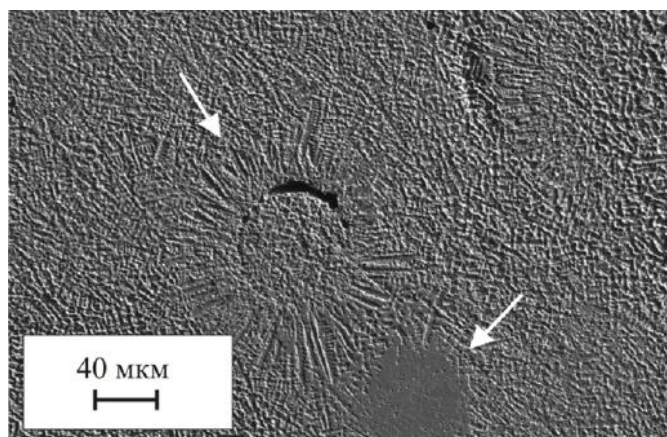


Рис. 3. Не полностью расплавившиеся частицы исходного материала, полученного при мощности лазерного излучения 250 Вт

Исследования структуры различных сечений образцов показали наличие дендритного строения. Структура в продольном направлении представлена на рис. 4 а, в поперечном - на рис. 4 б. В поперечном направлении в пределах одного выращенного слоя можно выделить две области: область столбчатых кристаллов в нижней части слоя и дисперсную в верхней

(рис. 5). Расположенная в нижней части слоя столбчатая структура сформировалась в результате высокой скорости охлаждения за счет отвода тепла в подложку или в предыдущий выращенный слой. Дисперсная структура продольного сечения характерна для участков с пониженной теплоотдачей.

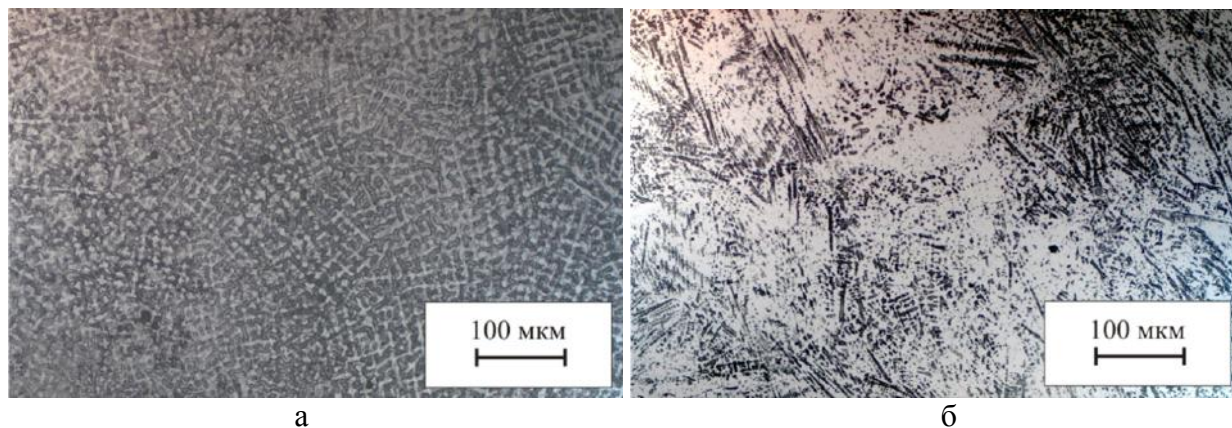


Рис. 4. Структура в продольном (а) и поперечном (б) сечениях

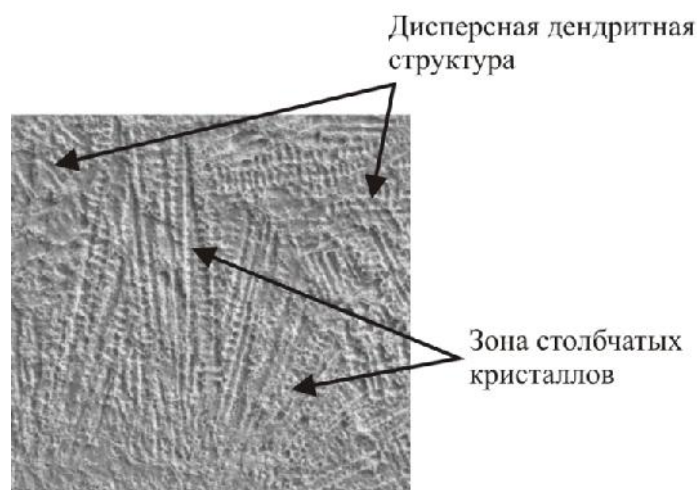


Рис. 5. Изображение зон выращенного слоя

Выводы

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что толщина выращенной стенки и отдельно взятого слоя имеет прямо пропорциональную зависимость от применяемого диапазона мощностей. Однородность и максимальная толщина в 1891 мкм характерна для структур, выращенных при высоких мощностях. Образцы, выращенные при малых мощностях, имеют дефекты в виде не полностью расплавившихся частиц порошка, что неблагоприятно может влиять на механические свойства. Таким образом, минимальная толщина стенки (964 мкм) при однородности структуры может быть достигнута при мощности 500 Вт.

Список литературы

1. *Costa L., Vilar R.* Laser powder deposition // *Rapid Prototyping Journal*. – 2009. – Vol. 15 (4). – P. 264–279.
2. *Khaing M.W., Fuh J.Y.H., Lu L.* Direct metal laser sintering for rapid tooling: Processing and Characterisation of EOS // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2001. – Vol. 113. – P. 269–272.
3. *Dindaa G.P., Dasguptaa A.K., Mazumderb J.* // *Laser Aided Direct Metal Deposition of Inconel 625 Superalloy: Microstructural Evolution and Thermal Stability // Materials Science and Engineering A*. – 2009. – Vol. 509. – P. 98–104.
4. Материаловедение и технология металлов: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др.; под ред. Г.П. Фетисова. – 5-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2007. – 862 с.
5. *Рашковец М.В., Рябинкина П.А.* Особенности структуры материала, полученного прямым лазерным осаждением сплава на основе Ni // Сборник материалов и докладов XVI Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов – молодых ученых, Екатеринбург, 07–11 декабря 2015 г. – Екатеринбург, 2015. – С. 46–48.

FEATURES OF MATERIAL OBTAINED BY DIRECT LASER METHOD DEPOSITION
OF Ni BASED ALLOY

Rashkovets M. V.¹, Master's Degree student, e-mail: lipa_04@mail.ru

Nikulina A.A.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: a.nikulina@corp.nstu.ru

Klimova O. G.², Ph.D. (Engineering), Assistant, e-mail: o.klimova@lrc.ru

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, 29 Polytechnicheskaya str., Saint-Petersburg, 195251, Russian Federation

Abstract

At the paper is considered chemical composition and features of structure of samples of Ni-based alloy obtained by direct laser method deposition at the different operating parameters. The range of 250 W to 1500 W of laser power was applied during deposition. Composition of starting powders was obtained by scanning electron microscope. Light microscopy showed the cast structure with transition serial tracks from laser beam. The maximum thickness of samples wall and the maximum track thickness with homogeneous structure were reach at 1500 W. A particles of starting powder were found at the structure at the minimum laser power (250 W). Minimum thickness of the defect-free sample wall was formed with a power of 500 W.

Keywords

direct laser method deposition, Ni-based alloys, structure

УДК 621.9.048.7;669.13.017:620.18;669.113.017:620.17

**ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННОЙ
СТАЛИ НА ЭФФЕКТ УПРОЧНЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОМ
ВОЗДЕЙСТВИИ***С.Н. БАГАЕВ¹, академик, директор ИЛФ СО РАН**Г.Н. ГРАЧЕВ¹, заведующий лабораторией**А.Л. СМИРНОВ¹, главный конструктор**М.Н. ХОМЯКОВ¹, мл. научный сотрудник**А.О. ТОКАРЕВ², доктор техн. наук, доцент**З.Б. БАТАЕВА², канд. техн. наук, доцент**А.Ю. ГЕРБЕР², аспирант**(¹Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск,
²СГУВТ, г. Новосибирск)***Грачев Г.Н.** – 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3,

Институт лазерной физики СО РАН

e-mail: grachev@laser.nsc.ru

Токарев А.О. – 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33,

Сибирский государственный университет водного транспорта,

e-mail: aot51@ngs.ru

Представлены результаты эксперимента по влиянию лазерно-плазменного воздействия на строение и микротвердость поверхностей конструкционных сталей с различной структурой: феррито-перлитной, сорбита отпуска и мартенсит. Материалом исследования служила низколегированная качественная конструкционная сталь 40ХН ГОСТ 4543-71 в состоянии поставки и после термической обработки закалкой с низким и высоким отпуском. В результате выявлено, что лазерно-плазменная обработка ЛПО позволяет производить упрочнение поверхности конструкционной стали до высокой (9,0- 11,0 ГПа) твёрдости, на глубину около 0,2 мм. Применение лазерно-плазменной обработки для упрочнения поверхности возможно на различных этапах технологического процесса изготовления или ремонта деталей машин: при обработке поверхности нормализованной или отожженной стали непосредственно после механической обработки, а также после объёмной термической обработки с различными видами отпуска на разную твёрдость, которая определяется назначением обрабатываемых изделий.

Ключевые слова: лазерно-плазменная обработка, поверхностная закалка, структура стали, этапы технологического процесса.

Введение

Стимулом к активному исследованию и использованию в технологии металлообработки источников энергии высокой концентрации, в частности лазеров, являются возможности формирования поверхностной структуры, обеспечивающей повышенные эксплуатационные свойства [1, 2].

Высокая концентрация энергии обеспечивает при встрече лазерного луча с поверхностью металла скорость локального нагрева превышающую тысячи градусов в секунду. Глубина области фазовых превращений в железоуглеродистых сплавах при этом

составляет до 1 мм. После прохождения луча нагретый участок оказывается в окружении холодного металла, что приводит к быстрому охлаждению и закалке [3-7].

В Институте лазерной физики СО РАН в последние годы разработаны основы нового высокопроизводительного лазерно-плазменного (ЛП) метода упрочнения поверхности сталей и сплавов, который существенно превосходит традиционные методы лазерной закалки непрерывным и импульсно-периодическим лазерным излучением [8]. Лазерно-плазменный метод основан на применении плазмы оптического пульсирующего разряда (ОПР). Разряд зажигается повторяющимися с высокой частотой следования (десятки кГц) импульсами CO_2 -лазера, сфокусированными на обрабатываемой поверхности, в потоке легирующего газа. Поток плазмообразующего газа (азота, углекислоты, воздуха) создается в обрабатывающей головке соосно лазерному излучению (рис. 1).

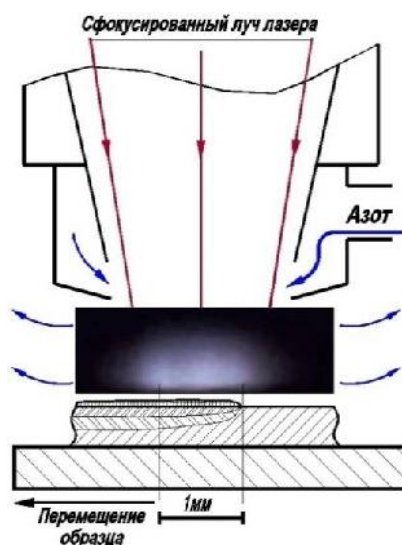


Рис. 1. Схема обработки материалов на лазерно-плазменной технологической установке с наложением фотографии приповерхностной лазерной плазмы

Методика экспериментального исследования

Впервые термохимическое действие плазмы пробоя было продемонстрировано в цикле работ [9] с неодимовыми лазерами, генерирующими импульсы излучения миллисекундной длительности [10]. Так же подобная технология с применением различных типов лазеров (XeCl , KrF , Nd:YAG) с низкой частотой следования импульсов (≤ 100 Гц) описана в [11, 12]. Применение импульсно-периодического CO_2 -лазера, оказывается предпочтительнее вследствие низкого порога пробоя газа и возможности обеспечить высокую производительность процесса обработки, за счет высокой частоты повторения импульсов (до 120 кГц).

Изготовление и ремонт деталей машин с применением лазерно-плазменного упрочнения, также как и лазерной закалки, предусматривает применение этого высокоэнергетического воздействия на поверхность стальных изделий на разных этапах технологического процесса: при обработке поверхности нормализованной или отожженной стали непосредственно после механической обработки [4,5], а также после объемной термической обработки с различными видами отпуска на разную твердость, которая определяется назначением обрабатываемых изделий [6,7].

Преобразования, происходящие в металлической основе литейных чугунов, по закономерностям фазовых превращений в процессе лазерно-плазменного воздействия имеют

некоторые общие закономерности с превращениями происходящим в сталях [13]. В связи с этим представляет интерес изучение влияния исходной структуры обрабатываемой стали на результат лазерно-плазменного воздействия.

Для проведения лазерно-плазменной обработки (ЛПО) в ИЛФ СО РАН создана лазерно-плазменная технологическая установка. Основой установки, определяющей её технологические возможности, является импульсно-периодическая CO₂-лазерная система генератор-усилитель (СГУ) средней мощностью до 2 кВт и импульсной сотни кВт с возможностью управления частотой следования (до 120 кГц) и длительностью лазерных импульсов [14].

В зависимости от частоты следования лазерных импульсов, размера пятна облучения и относительной скорости перемещения луча и детали цикл обработки включает десятки/сотни воздействий лазерной плазмы на поверхность. Эффективный обмен энергией высокой концентрации между лазерной плазмой и металлом обеспечивает скорость локального нагрева, достигающую 10⁵-10⁷ градусов в секунду, при этом производительность лазерно-плазменной обработки в 7-10 раз выше по сравнению с традиционной лазерной закалкой [13].

Режимы лазерно-плазменного воздействия были выбраны на основании литературных данных [15] и результатов собственных предварительных исследований. Энергия лазерного импульса составляла около 15 мДж при частоте следования импульсов 60 кГц. Излучение фокусировалось в пятно диаметром 0,8 мм, длительность пика лазерных импульсов на полувысоте составляла 0,2 мкс, таким образом пиковая интенсивность импульса достигала 14 МВт/см². В качестве рабочего газа использовался азот, давление азота в форкамере 2 атм. Скорость линейного перемещения образцов составляла 20 мм/сек. Обработка велась со сканированием фокуса лазерного излучения в направлении перпендикулярном линейному перемещению образцов частота и амплитуда сканирования составляли 300 Гц и 3 мм соответственно.

В результате ЛПО получены упрочненные лазером дорожки на сталях с исходной микроструктурой характерной для различных этапов технологического процесса изготовления и ремонта деталей машин.

Материалом исследования служила низколегированная качественная конструкционная сталь 40ХН ГОСТ 4543-71 в состоянии поставки и после термической обработки закалкой с низким и высоким отпуском.

Результаты и обсуждение

Исследование микроструктуры и твёрдости по глубине зоны лазерно-плазменного воздействия проводилось на Кафедре Технологии металлов и судостроения СГУВТ. Микрошлифы образцов стали для исследования готовили под углом 12⁰ к плоскости обработанной поверхности, благодаря этому на представленных микрофотографиях кажущаяся глубина рассматриваемого сечения и шероховатость поверхности увеличены в 5 раз. Твёрдость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 20 г.

Структурные превращения в стали при ЛПО определяются градиентом температур. Глубина закалённых слоёв и структура зон термического лазерно-плазменного воздействия зависит от исходной структуры и параметров лазерно-плазменной обработки, но при этом имеют место общие закономерности.

Превращения в стали с феррито-перлитной структурой при лазерно-плазменной обработке

На рис. 2 схематично представлен процесс структурных превращений по глубине сечения доэвтектоидной стали с феррито-перлитной структурой.

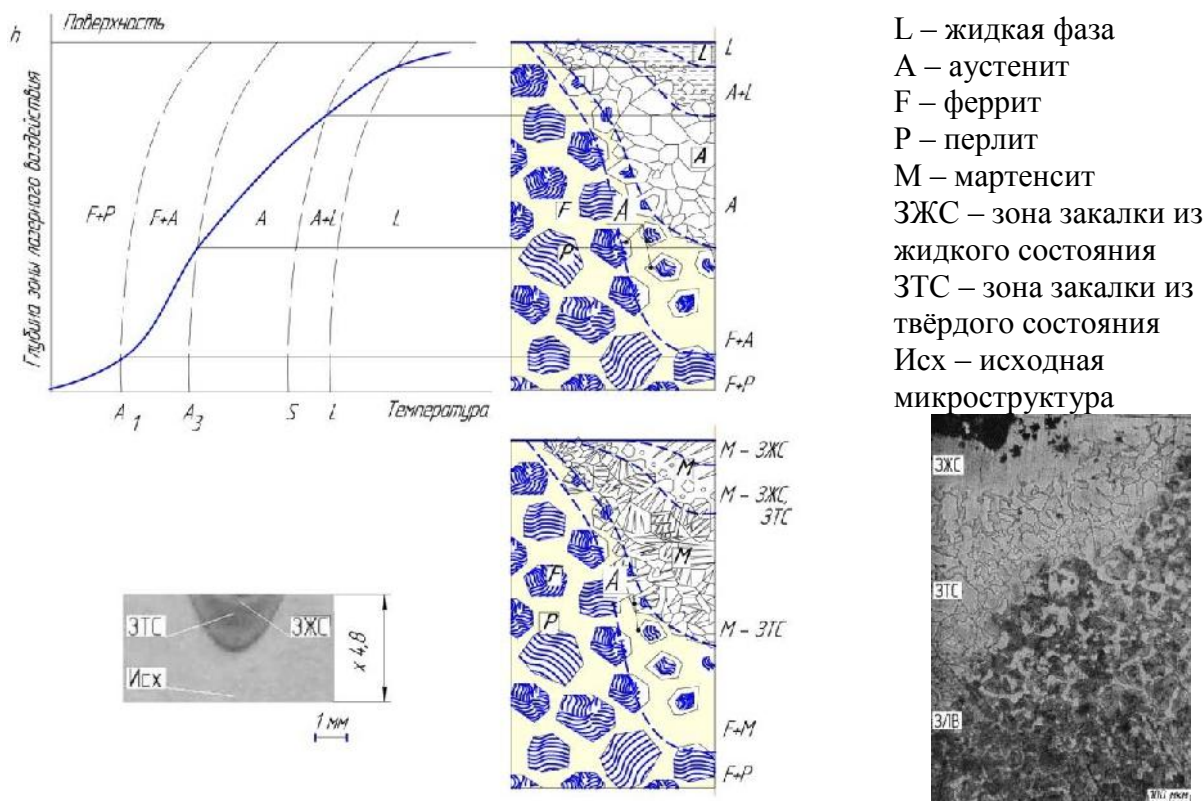


Рис. 2. Схема фазовых превращений в стали с феррито-перлитной структурой при лазерно-плазменном воздействии

Наиболее высокая температура, вызывающая плавление и испарение материала, при лазерной обработке возникает на поверхности обрабатываемых изделий. При последующем охлаждении за счёт интенсивного теплоотвода в холодную сердцевину металла в зоне плавления происходит закалка из жидкого состояния ЗЖС и образование мартенсита с микротвёрдостью 11,0 – 13,0 ГПа. К участкам ЗЖС прилегает зона мартенсита, с твёрдостью 6,0 – 7,0 ГПа, полученного закалкой при охлаждении из твёрдого аустенитного состояния ЗТС.

В зоне, в которой при нагреве происходит неполное фазовое превращение. Образование мартенсита начинается по границам перлитных колоний.

В зоне лазерно-плазменного влияния ЗЛВ в стали с феррито-перлитной структурой, то есть в состоянии поставки, при нагреве до температур ниже A_{c1} , фазовых превращений не происходит.

Распределение структурных составляющих по сечению зоны лазерно-плазменного воздействия и их твёрдость приведены на рис. 3. Общая глубина упрочнённого слоя составляет 0,2 мм [16].

Превращения в стали со структурой сорбита отпуска при лазерно-плазменной обработке

Процесс структурных превращений по глубине сечения в стали со структурой сорбит отпуска схематично представлен на рис. 4. Благодаря однородности исходной структуры - сорбит отпуска, зона фазовых превращений определяется главным образом температурой нагрева. Вследствие этого между закалённой мартенситной зоной и зоной термического влияния наблюдается чёткая граница.

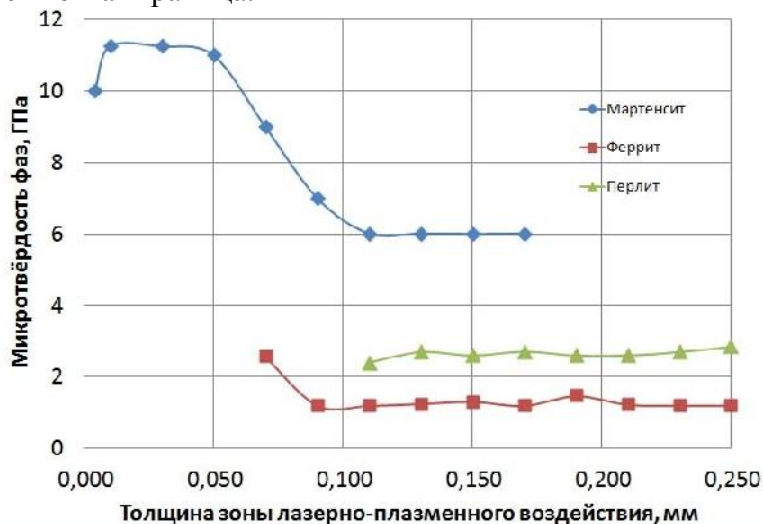


Рис. 3. Микротвёрдость структурных составляющих по глубине зоны лазерно-плазменного воздействия ЗЛВ в стали с исходной феррито-перлитной структурой

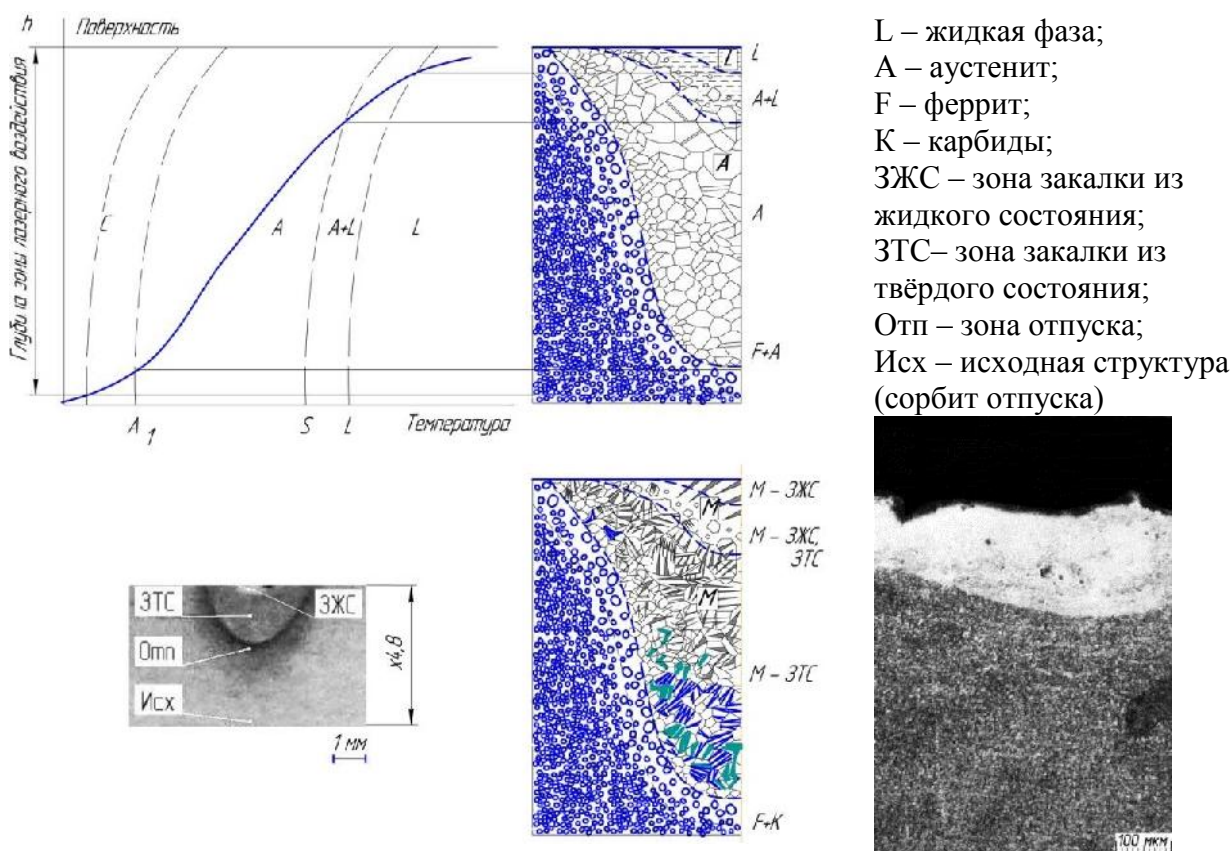


Рис. 4. Схема фазовых превращений в стали со структурой сорбит отпуска при лазерно-плазменном воздействии

Исследования микроструктуры и микротвёрдости в закалённых зонах показали, что на их строение исходная структура заметного влияния не оказывает. В зоне лазерно-плазменного влияния, нагретой при обработке до температур ниже фазового превращения происходит коагуляция и укрупнение карбидов. При этом незначительно, в пределах ошибки измерений, снижается микротвёрдость (рис. 5).

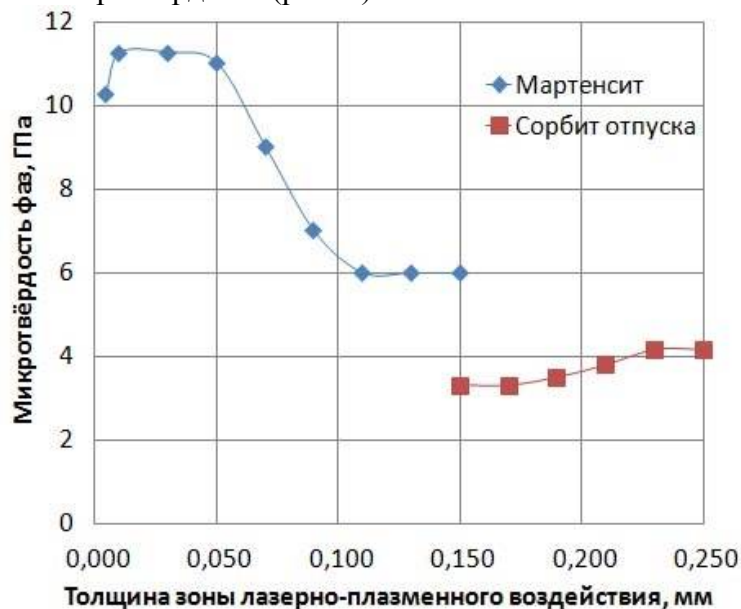


Рис. 5. Микротвёрдость структурных составляющих по глубине зоны лазерно-плазменного воздействия ЗЛВ в стали с исходной структурой – сорбит отпуска

Превращения в стали со структурой мартенсит при лазерно-плазменной обработке

Схема формирования структуры предварительно закалённой на мартенсит стали в процессе лазерно-плазменной обработки показан на рис. 6.

Исходная структура образцов, упрочнённых предварительной обработкой закалкой с низким отпуском, - мартенсит. При лазерной обработке поверхность стали оплавляется и при последующем охлаждении закаливается на мартенсит. Во всех исследованных образцах при любом состоянии исходной структуры поверхность получает упрочнение несколько меньше, чем ниже лежащие слои. Это вызвано, очевидно, частичным выгоранием углерода при расплавлении стали. К зоне, закалённой из жидкого состояния ЗЖС, примыкает слой, нагретый при воздействии лазерного луча до температур аустенитизации, т. е. закалённый из твёрдого состояния ЗТС.

Как и в описанных выше случаях, твёрдость закалённых слоёв при лазерно-плазменном воздействии превышает твёрдость, достижимую при других видах закалки. В данном случае получена микротвёрдость до H_{50} 11,09 ГПа. Высокую твёрдость имеет как слой, закалённый из жидкого состояния ЗЖС, так и слой, нагретый при лазерно-плазменной воздействии до аустенитного состояния ЗТС - H_{50} до 8,10 ГПа (рис. 7).

Слой с мартенситной структурой граничит с участками, в которых при лазерном нагреве прошла неполная фазовая перекристаллизация. При нагреве аустенитное превращение начинается от границ зёрен. При последующем охлаждении эти участки претерпевают мартенситное превращение (на микрофотографиях - светлые). Участки, не претерпевшие аустенитное превращение (тёмно травящиеся зёрна) в результате термического цикла при лазерно-плазменном воздействии, получают кратковременный отпуск. Твёрдость этих участков в результате отпуска снижается до ~4,3 ГПа.

Выводы

Лазерно-плазменная обработка может применяться с высокой эффективностью для упрочнения конструкционных сталей. Она позволяет производить упрочнение поверхности конструкционной стали до высокой (9,0- 11,0 ГПа) твёрдости, на глубину около 0,2 мм. При этом эффект упрочнения получен на сталях с различной, характерной для разных этапов технологического процесса, структурой. Следовательно, применение лазерно-плазменной обработки для упрочнения поверхности возможно на различных этапах технологического процесса изготовления или ремонта деталей машин.

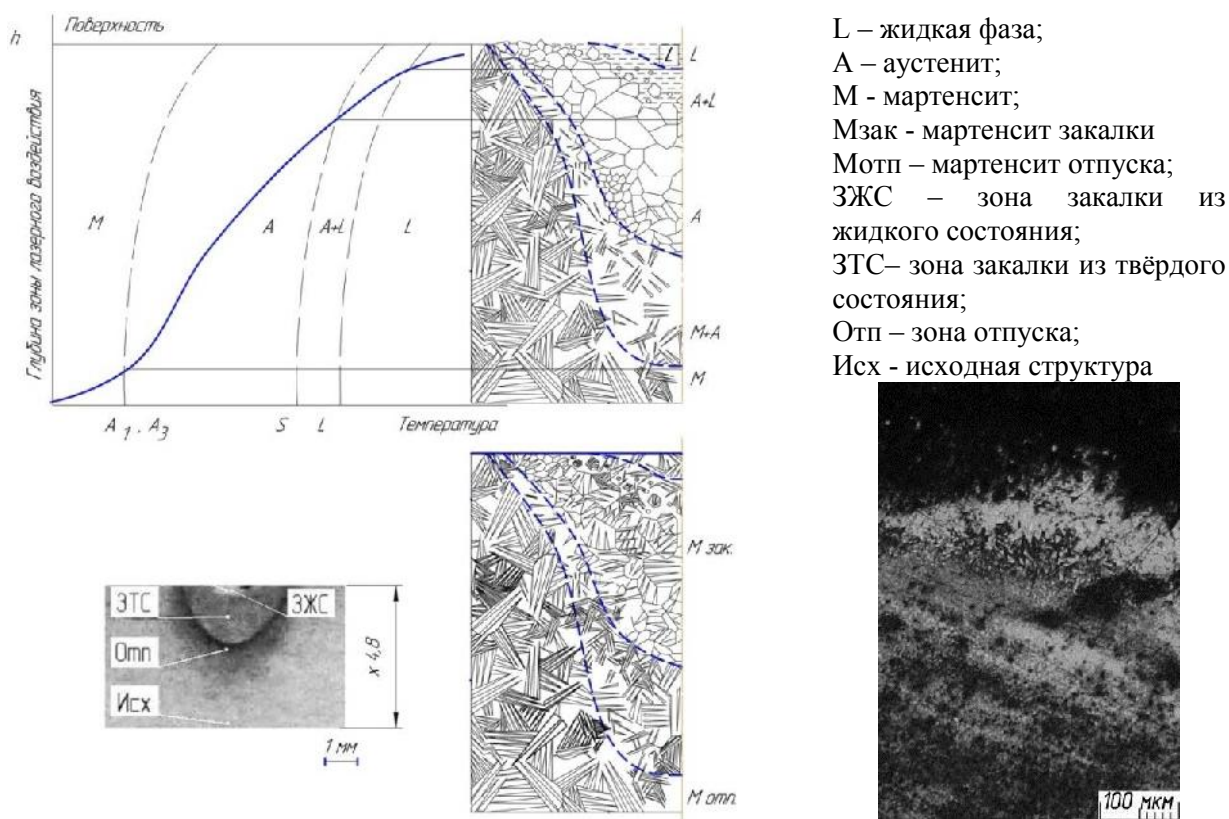


Рис. 6. Схема фазовых превращений в стали со структурой мартенсит при лазерно-плазменном воздействии

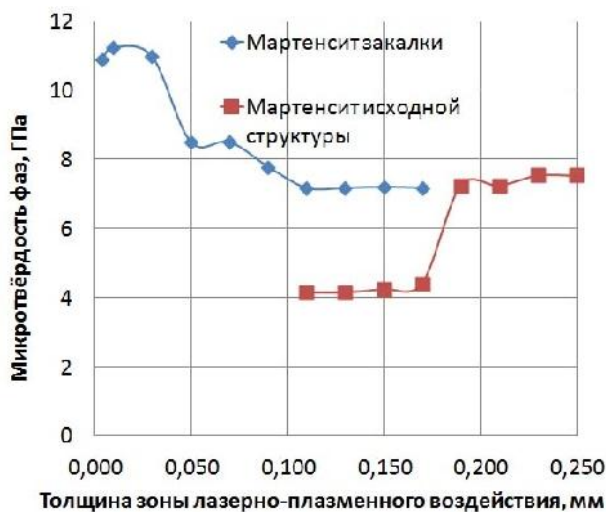


Рис. 7. Микротвёрдость структурных составляющих по глубине зоны лазерно-плазменного воздействия ЗЛВ в стали с исходной структурой - мартенсит

Список литературы

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учебное пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
2. Гуреев Д.М., Ямицкий С.В. Основы физики лазеров и лазерной обработки материалов: учебное пособие. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2001. – 392 с.
3. Сафонов А.Н. Изучение структуры и твердости поверхности железоуглеродистых сплавов после их оплавления лазерным излучением // МиТОМ. – 1999. – № 1. – С. 7–10.
4. Лазерные технологии на машиностроительном заводе / Н.Г. Терегулов и др.; АН Респ. Башкортостан. – Уфа: [б. и.], 1993. – 263 с.
5. Об использовании технологии лазерной обработки материалов в судовом машиностроении / Г.Н. Гаврилов, Л.А. Чкалов, Э.В. Максимова, О.В. Горшков // Технология судостроения. – 1989. – № 5. – С. 51–52.
6. Фазовые и структурные превращения при лазерном нагреве стали. I. Влияние исходной структуры / В.Д. Садовский, Т.И. Табатчикова, А.В. Салохин, М.М. Малыш // ФММ. – 1982. – Т. 3, Вып. 1. – С. 88–94.
7. Шатилов И.Р., Костромин С.В. Влияние исходной структуры стали 30ХГСА на строение и свойства поверхностного слоя после лазерного термоупрочнения // Фундаментальные и прикладные науки сегодня: материалы Международной научно-практической конференции (Москва, 25–26 июля 2013 г.). – 2013. – Т. 1: North Charleston: CreateSpace. – С. 117–120.
8. Патент РФ 2 425 907 С2. Способ модификации металлических поверхностей и устройство / С.Н. Багаев, Г.Н. Грачев, А.Л. Смирнов, П.Ю. Смирнов. – Опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22.
9. Рыкалин Н.Н., Углов А.А. Лазерно-плазменная обработка металлов при высоких давлениях газов // Квантовая электроника. – 1981. – Т. 8, № 6. – С. 1193–1201.
10. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А.М. Прохоров, В.И. Конов, И. Урсу, И.Н. Михэилеску. – М.: Наука, 1988.
11. Schaaf P. Laser nitriding of metals // Progress in Materials Science. – 2002. – Vol. 47. – P. 1–161.
12. Microstructure of TiN coatings synthesized by direct pulsed Nd:YAG laser nitriding of titanium: Development of grain size, microstrain, and grain orientation / D. Hoche, H. Schikora, H. Zutz, R. Queitsch, A. Emmel, P. Schaaf // Applied Physics A. – 2008. – Vol. 91. – P. 305–314.
13. Применение метода лазерно-плазменной модификации поверхности металлов для улучшения триботехнических характеристик цилиндров двигателей внутреннего сгорания / С.Н. Багаев, Г.Н. Грачев, А.Л. Смирнов, М.Н. Хомяков, А.О. Токарев, П.Ю. Смирнов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 1 (62). – С. 14–23.
14. Исследование пространственных характеристик излучения мощной CO₂-лазерной системы генератор-усилитель / П.А. Стаценко, Г.Н. Грачев, А.Л. Смирнов, А.А. Мякушина // Сборник докладов 22-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация – 2012». – Санкт-Петербург, 2012. – Т. 2. – С. 168–176.
15. Майоров В.С. Расчет параметров лазерной закалки со сканированием // Физика и химия обработки материалов. – 1989. – № 1. – С. 38–43.
16. Laser-plasma treatment of structural steel / A. Tokarev, Z. Bataeva, G. Grachev, A. Smirnov, M. Khomyakov, A. Gerber // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 58–62.

**INFLUENCE OF PRELIMINARY HEAT TREATMENT OF STRUCTURAL STEEL
ON THE STRENGTHENING AT LASER-PLASMA PROCESSING**

Bagaev S.N.¹, Academician, Director ILP SB RAS, e-mail: bagayev@laser.nsc.ru

Grachev G.N.¹, Head of the Laboratory, e-mail: grachev@laser.nsc.ru

Smirnov A.L.¹, Chief Designer, e-mail: asmir31@mail.ru

Khomyakov M.N.¹, Junior Researcher, e-mail: mnkhomy@gmail.com

Tokarev A.O.², D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: aot51@ngs.ru

Bataeva Z.B.², Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: bataevazb@ngs.ru

Gerber A.J.², Ph.D. student, e-mail: altair.93@bk.ru

¹ Institute of Laser Physics of the SB RAS, 13/3 Akademika Lavrent'eva Prospekt, Novosibirsk, 600090, Russian Federation

² Siberian State University of Water Transport, 33 Shhetinkina st., Novosibirsk, 630099, Russian Federation

Abstract

The presented results reflect the experiment on the impact of laser-plasma action on the structure and microhardness of the structural steel surface which includes various structure patterns, such as the ferrite-pearlite structure, the secondary sorbite and the martensitic structure. The polyfunctional CO₂-laser oscillator - amplifier system was used as a means of technology equipment. As a material for study, the sheet structural low-alloyed steel 40XH ГОСТ 4543-71 was selected in the different stages: as original steel and as the steel in the state of post-thermal treatment with the help of low and high secondary hardening. The obtained data show that laser-plasma treatment LPT allows to perform hardening of structural steel surface which achieves high (9,0 - 11,0 GPa) solidity reaching the depth of about 0,2 mm. It is possible to use the laser-plasma treatment as a method for local surface hardening in the manufacturing process or during the repairs of machine parts and tools at such different levels as a standard or annealed steel surface treatment which follows into mechanization treatment and also into full thermal treatment with various kinds of release for different degrees of solidity which is determined by the functioning of the treated parts.

Keywords

Laser plasma, structural steel, surface hardening, stages of technological process.

УДК 539.122.04

**СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МЕХАНОАКТИВИРОВАННОЙ
ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ Ti+Al ПОД ДЕЙСТВИЕМ γ -ОБЛУЧЕНИЯ**

*М.В. ЛОГИНОВА*¹, канд. техн. наук, ст. научный сотрудник
*В.И. ЯКОВЛЕВ*¹, канд. техн. наук, доцент
*А.А. СИТНИКОВ*¹, доктор техн. наук, профессор
*В.Ю. ФИЛИМОНОВ*¹, доктор физ.-мат. наук, профессор
*А.В. СОБАЧКИН*¹, канд. техн. наук, ст. научный сотрудник
*А.З. НЕГОДЯЕВ*¹, аспирант
*А.В. ГРАДОБОЕВ*², доктор техн. наук, профессор
(¹ АлтГТУ, г. Барнаул, ² НИ ТПУ, г. Томск)

Логинова М.В. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: anicpt@rambler.ru

Исследовано влияние механоактивации на структурно-фазовое состояние компонентов порошковой смеси состава Ti+Al при воздействии разных доз γ -облучения. Выявлено, что изменение режимов γ -облучения, трансформирует структурное состояние механоактивированной порошковой смеси. Установлено, что при увеличении дозы γ -облучения, в механоактивированной порошковой смеси происходит повышение кристалличности структуры обоих компонентов, параметры кристаллических решеток Ti и Al приближаются к исходным. В процессе γ -облучения происходит уменьшение внутренних напряжений с сохранением нанокристалличности структуры.

Ключевые слова: титан, алюминий, порошковая смесь, механоактивация, γ -облучение, рентгеновская дифрактометрия, структурные параметры, кристаллическая решетка, кристаллиты, микронапряжения.

Введение

В настоящее время, все большее внимание уделяется экстремальным воздействиям на материалы, приводящим к формированию неравновесных, наноструктурных состояний. Трансформация структуры материалов до наноразмерного уровня способна привести к возникновению у них качественно новых физических и механических свойств, отличных от свойств подобных им крупнозернистых материалов, что представляет практический интерес [1-2]. Одним из эффективных способов получения субмикроструктурной структуры, является механоактивация, при которой в систему вводятся значительные порции дополнительной энергии, определяющие метастабильное состояние системы. Часть энергии запасается в виде дефектов кристаллической решетки и увеличения поверхностной энергии за счет предельной степени измельчения размеров зерна [3-4]. При воздействии облучения (в частности, γ -квантами) также наблюдается модифицирование структуры материалов [5-7]. В зависимости от режимов облучения и структурного состояния исходных материалов, может формироваться либо особое состояние, характеризующееся неравновесной структурой (насыщение дефектами, уменьшение размеров кристаллитов, изменение субструктурных параметров), либо за счет радиационно-стимулированной диффузии происходит перестройка структуры, приводящая ее к упорядоченному состоянию [8]. Особый интерес представляет

применение перед γ -облучением предварительной механоактивиционной обработки порошковой смеси, за счет которой система уже переходит в неравновесное состояние, с избыточной энергией. Эволюция структурных и фазовых переходов при совмещении методов механоактивиционной обработки и γ -облучения малоизучены и требуют дополнительной информации для понимания и выявления их особенностей. Такой подход к получению новых структурных состояний может быть использован в качестве технологического приема для модифицирования нанокompозитных смесей [9-10]. Объектом настоящих исследований выбрана система Ti-Al, поскольку алюминиды титана и сплавы на их основе находят широкое применение для конструкций и деталей, работающих в экстремальных условиях [11].

Таким образом, целью настоящей работы является исследования влияния предварительной механоактивиционной обработки на структурно-фазовое состояние компонентов порошковой смеси состава Ti+Al при воздействии разных доз γ -облучения.

Методика экспериментального исследования

В качестве объектов исследования использовались порошки титана ПТХ со средним размером частиц 50 ± 10 мкм и порошки алюминия АСД - 1 со средним размером 12 мкм. Приготавливалась простая механическая смесь в соотношении: Al50мас.%+Ti50мас.%. Далее проводилась механоактивация исходной порошковой смеси в течение 7 мин. на планетарной шаровой мельнице АГО-2, объем цилиндров 160 см^3 , центробежное ускорение 40 g. Отношение массы мелющих тел к массе исходного сырья 1:20. Для защиты от окисления, из цилиндров откачивался воздух, затем они заполнялись аргоном при давлении 0,3 МПа. После механической активации порошки извлекались из цилиндров в специальном боксе, в аргоновой атмосфере [12, 13]. Затем из порошковой механоактивированной смеси на лабораторном прессе изготавливались образцы диаметром 10 мм и высотой 5 мм. Прессование проводилось при комнатной температуре с нагрузкой 40 кН. На следующем этапе экспериментальные образцы облучались γ -квантами с набором дозы на установке «Исследователь» (изотоп ^{60}Co). Дозы облучения составляли: 2×10^5 рад., при $t_{\text{обл.}}=30$ мин., 5×10^5 рад., при $t_{\text{обл.}}=72$ мин., 1×10^6 рад., при $t_{\text{обл.}}=150$ мин.

Структурно-фазовый анализ образцов проводился на дифрактометре ДРОН-6, $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,5418 \text{ \AA}$). Дифрактограммы всех образцов регистрировались в идентичных условиях, что позволило более корректно сравнивать полученные величины. Для расчета параметров тонкой структуры использовалась программа Size&Strain пакета PDWin, с поправками на приборное уширение. Размеры кристаллитов и микродеформаций рассчитывались как коэффициенты системы уравнений с помощью метода наименьших квадратов.

Результаты и обсуждение

На рис.1 приведены дифрактограммы порошковых смесей состава Ti50мас.%+Al50мас.%, снятых на всех этапах исследования.

После механоактивации исходной порошковой смеси, значительно снижаются интенсивности дифракционных максимумов обоих компонентов, происходит их уширение и повышение диффузионного фона (рис.1а, б), возникающие в результате измельчения зерна и наличия микродеформаций, которые формируются в процессе механообработки. Дополнительные соединения после механоактивации не образуются. После γ -облучения дозами 2×10^5 рад и 5×10^5 рад (рис.1в,г) происходит увеличение интенсивности отражений

обоих компонентов, что свидетельствует о повышении кристалличности структуры порошковой смеси, однако, незначительное уширение пиков сохраняется. С повышением дозы γ -облучения до $2 \cdot 10^6$ рад (рис.1д) наблюдается рост кристалличности структур компонентов порошковой смеси (интенсивность дифракционных отражений от облученного образца ($I_{\max}=162,7$ усл.ед.) схожа с интенсивностью пиков в исходной смеси ($I_{\max}=163$ усл.ед.), однако небольшое уширение максимумов может свидетельствовать о сохранении наноструктурного состояния кристаллитов и о возможности наличия остаточных микродеформаций.

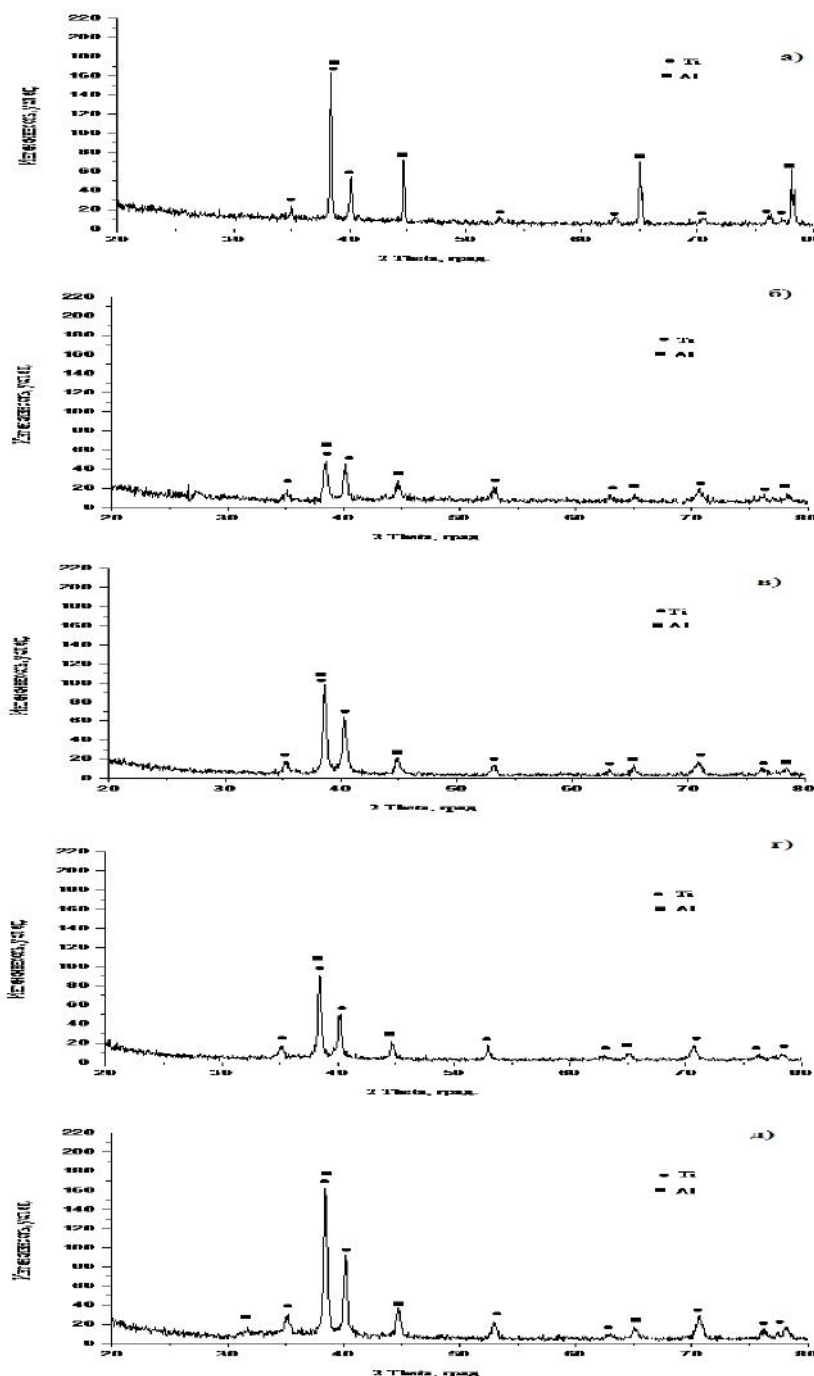


Рис. 1. Дифрактограммы порошковой смеси состава Ti 50мас. %+ Al 50мас. %: (а) механическая смесь; (б) порошковая смесь после МА 7 мин.; (в) $2 \cdot 10^5$ рад, $t=30$ мин.; (г) $5 \cdot 10^5$ рад, $t=72$ мин.; (д) $1 \cdot 10^6$ рад, $t=150$ мин

Расчет прецизионных параметров облученных механоактивированных образцов, показал, что их структурное состояние меняется с ростом доз и временем воздействия гамма-квантов (табл. 1, 2), с увеличением набора доз происходит стабилизация кристаллических решеток компонентов. У титана параметры решетки изменяются линейно в сторону увеличения, у алюминия при малых временах и дозах происходит сжатие решетки. После воздействия облучения с дозой $2 \cdot 10^6$ рад, параметры решетки и объем обоих компонентов приближаются к параметрам решеток исходных образцов до механоактивации, что коррелируется с увеличением интенсивностей отражений на дифрактограмме.

Таблица 1

Структурные параметры и объем кристаллических решеток Ti в порошковой смеси на всех этапах эксперимента

Параметры ячейки	Ti					Эталон Ti* Sys:Hexagonal
	исходный порошок	после МА7 мин.	γ-облуч. $2 \cdot 10^5$ рад, t=30 мин.	γ-облуч. $5 \cdot 10^5$ рад, t=72 мин.	γ-облуч. $1 \cdot 10^6$ рад, t=150 мин.	
a, (Å)	2,9547	2,9295	2,9469	2,9527	2,9554	2.9505
b, (Å)	2,9547	2,9295	2,9469	2,9527	2,9554	2.9505
c, (Å)	4,6938	4,7233	4,6702	4,6779	4,6826	4.6826
V, (Å ³)	35,490	35,107	35,125	35,320	35,421	35.3

* (44-1294) ICDD Grant-in-Aid, Sailer, R., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA., 1993 (База данных порошковой дифрактометрии PDWin 3.0).

Таблица 2

Структурные параметры и объем кристаллических решеток Al в порошковой смеси на всех этапах эксперимента

Параметры ячейки	Al					Эталон Al* Sys:Cubic
	исходный порошок	после МА 7 мин.	γ-облуч. $2 \cdot 10^5$ рад, t=30 мин.	γ-облуч. $5 \cdot 10^5$ рад, t=72 мин.	γ-облуч. $1 \cdot 10^6$ рад, t=150 мин.	
a, (Å)	4,0548	4,05123	4,0456	4,0482	4,0530	4,0494
b, (Å)	4,0548	4,05123	4,0456	4,0482	4,0530	4,0494
c, (Å)	4,0548	4,05123	4,0456	4,0482	4,0530	4,0494
V, (Å ³)	66,669	66,499	66,217	66,346	66,577	66,60

* (4-787) Natl.Bur.Stand.(U.S.),Circ.539, Swanson, Tatge., I, 11, 1953 (База данных порошковой дифрактометрии PDWin 3.0).

Сопоставляя дифракционную картину и расчетные данные тонкой структуры обоих компонентов, можно предположить, что после γ-облучения с дозой $1 \cdot 10^6$ рад происходит частичный отжиг дефектов (рис.3), однако размеры кристаллитов обоих компонентов сохраняют наноструктурное состояние (рис. 2).

Применяя для γ-облучения предварительно механоактивационные порошковые смеси, находящиеся в неравновесном состоянии, с избыточной энергией, за счет наличия

микродеформаций и субмикронных размеров зерен, можно модифицировать структурное состояние материала, управляя прецизионными параметрами кристаллической решетки и тонкой структурой вещества. В частности, изменяя дозы γ -облучения стабилизировать структуру материала, уменьшая напряженное состояние, радиационным отжигом дефектов, сохраняя при этом наноразмерность зерна.

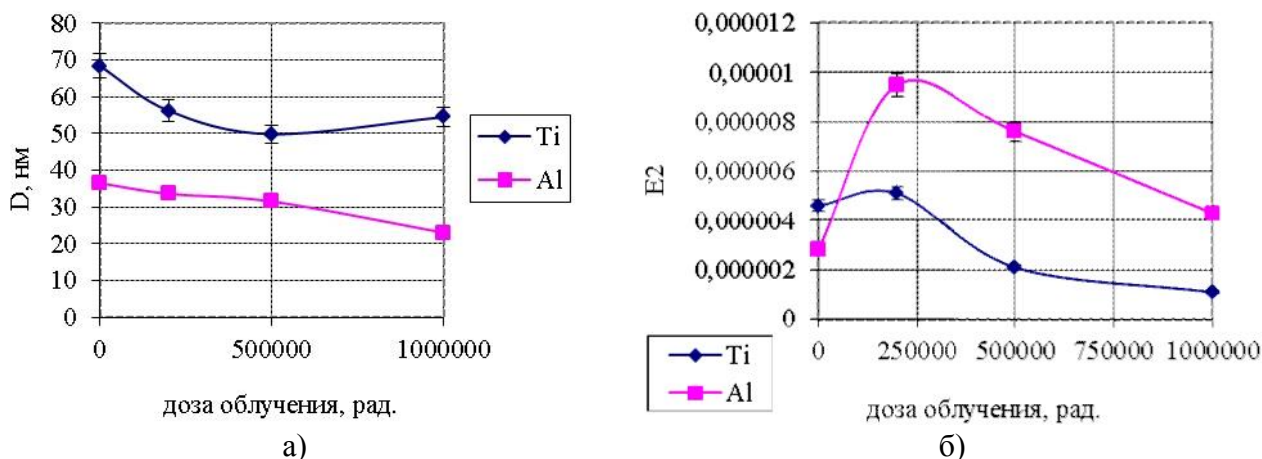


Рис. 2. Зависимость размеров субструктурных параметров компонентов смеси от режимов γ -облучения: а) размеры кристаллитов; б) микронапряжения

Выводы

С увеличением дозы гамма-облучения до $2 \cdot 10^6$ рад. в исследуемой механоактивированной системе состава Al50мас.%+Ti50мас.%. происходят процессы стабилизации, что характеризуется увеличением интенсивности дифракционных отражений компонентов и приведением параметров кристаллических решеток к исходному состоянию. Очевидно, что увеличение дозы гамма-облучения способствует радиационному отжигу неравновесных дефектов в механоактивированной системе, с сохранением зерна в наноразмерном состоянии.

Список литературы

1. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications / C. Leyens, M. Peters (Eds.). – Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2003.
2. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: Академкнига, 2007. – 398 с.
3. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // Успехи химии. – 2006. – Т. 75, № 3. – С. 203–216.
4. Analysis of the influence of high temperature synthesis parameters on the structure formation in the mechanically activated 3Ti+Al powder mixture / M.V. Loginova, V.Yu. Filimonov, V.I. Yakovlev, A.A. Sytnikov, A.Z. Negodyaev, D.V. Shreifer // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 117–122.
5. Градобоев А.В., Суржиков А.П. Исследование стойкости арсенида галлия при облучении гамма-квантами // Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах. – Томск: Изд-во ТПУ, 2002. – С. 85–86.
6. Нанокристаллические интерметаллидные и нитридные структуры, формирующиеся при ионно-плазменном воздействии / И.А. Курзина, Э.В. Козлов, Ю.П. Шаркеев и др. – Томск: Изд-во НТЛ, 2008. – 324 с.

7. Radiation- and thermally-induced phosphorus inter-granular segregation in pressure vessel steels / Z. Lu, F.G. Faulkner, R.B. Jones, P.E.J. Flewitt // Journal of ASTM International. – 2005. – Vol. 2, N 8. – P. 180–194.
8. Мамонтов А.П., Чернов И.П. Эффект малых доз ионизирующего излучения. – Томск: Дельтаплан, 2009. – 288 с.
9. Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. Mechanical properties of nanocrystalline materials // Progress in Materials Science. – 2006. – Vol. 51. – P. 427–556.
10. Production of submicrocrystalline structure in large- scale Ti-6Al-4V billet by warm severe deformation processing / S.V. Zharebtsov et al. // Scripta Materialia. – 2004. – Vol. 51. – P. 1147–1151.
11. Effect of composition on mechanical properties of newly developed Ti2AlNb-based titanium aluminide / L. Germann, D. Banerjee, J.Y. Guedou, J.-L. Strudel // Intermetallics. – 2005. – Vol. 13. – P. 920–924.
12. Microwave-assisted combustion synthesis in mechanically activated 3Ti + Al powder mixtures: structure formation issues / V.Yu. Filimonov, A.A. Sitnikov, A.V. Afanas'ev, M.V. Loginova, V.I. Yakovlev, A.Z. Negodyaev, D.V. Schreifer, V.A. Solov'ev // International Journal of Self Propagating High Temperature Synthesis. – 2014. – Vol. 23, N 1. – P. 18–25.
13. The features of structure formation in mechanically activated powder mixture 3Ti+Al in the thermal explosion mode / V.Yu. Filimonov, A.A. Sitnikov, V.I. Yakovlev, M.V. Loginova, A.V. Afanas'ev, A.Z. Negodyaev // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 621. – P. 71–76.

STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN MECHANICALLY ACTIVATED POWDER MIXTURES TI + AL UNDER THE INFLUENCE OF Γ -IRRADIATION

Loginova M. V.¹, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, e-mail: anicpt@rambler.ru
Yakovlev V. I.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: anicpt@rambler.ru
Sitnikov A. A.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: anicpt@rambler.ru
Filimonov V. Yu.¹, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: anicpt@rambler.ru
Sobachkin A. V.¹, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, e-mail: anicpt@rambler.ru
Negodyaev A. Z.¹, Ph.D. student, e-mail: anicpt@rambler.ru
Gradoboev A. V.², D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: anicpt@rambler.ru

¹ I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenina avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Abstract

It is investigated the influence of mechanical activation on structural-phase state of the components of the powder mixture composition of the Ti + Al under the influence of different doses of gamma-irradiation. It was found that the change of the mode of γ -irradiation transforms the structural condition of mechanically activated powder mixtures. It is discovered that by increasing doses of γ -irradiation in a mechanically activated powder mixture takes place preferment of crystallinity of the both components, parameters of the crystal lattices Ti and Al approximate to original size. In the process of γ -irradiation decreases the internal stress while preserving the nano crystalline structure.

Keywords

titanium, aluminum, powder mixture, mechanical activation, γ -rays, X-ray diffraction, structural parameters, lattice, crystallites microtension

УДК 669

**ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ЧУГУНЕ,
СОДЕРЖАЩЕМ 14,7 % МЕДИ*****Н.В. СТЕПАНОВА, м.н.с.
(НГТУ, г. Новосибирск)**

Степанова Н.В. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: stepanova@adm.nstu.ru

В данной работе исследованы структурные изменения в чугунах, связанные с повышением содержания меди до 14,7 мас. %. Представлены результаты исследования медьсодержащих частиц различного масштаба методами оптической микроскопии, а также методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии. В ходе выполнения работы проведен анализ формы, размера, состава частиц, проведена их классификация, а также предложена схема выделения частиц на основе меди в чугунах. Выявлены четыре типа включений на основе меди. Данные включения выделяются в широком диапазоне размеров от 20 нм до 240 мкм. В работе описаны условия образования и различия между частицами всех четырех типов.

Ключевые слова: чугун, легирование медью, частицы на основе меди, наноразмерные частицы, структура

Введение

Легирование медью позволяет повысить антифрикционные и прочностные свойства железоуглеродистых сплавов [1-3]. Упрочнение, а также изменение антифрикционных свойств обусловлено ограниченной растворимостью меди в железе, а также выделением в сплавах частиц на основе меди в широком диапазоне, от нескольких нанометров до сотен микрометров.

Ранее уже были проведены исследования влияния меди на структуру, механические и антифрикционные свойства сталей и чугунов [4-6] при легировании медью от 0 до 15 мас. %. Целью данной работы является исследование структурных изменений, связанных с повышением содержания меди. Особое внимание уделено исследованию медьсодержащих частиц различного масштаба методами оптической микроскопии, а также методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии, проанализированы форма, размер, состав данных частиц, проведена их классификация и предложена схема выделения частиц на основе меди в железоуглеродистых сплавах с высоким содержанием углерода.

Методика экспериментального исследования

В качестве объектов исследования использовали образцы из чугуна, полученные методом литья в песчано-глинистые формы. Диаметр отливок составлял 90 мм, длина - 500 мм. Температура заливки чугуна составляла 1350 °С. Содержание меди в отливке составляло

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-00230).

14,7 % (мас.), а содержание углерода 2,99 %. Образцы для проведения исследований были вырезаны из центральной зоны отливок. Для проведения исследований методами оптической металлографии был использован микроскоп *Carl Zeiss Axio Observer 11m*. Электронно-микроскопические исследования выполнены с использованием просвечивающего электронного микроскопа FEI Tecnai G2 20 TWIN и растрового электронного микроскопа *Carl Zeiss EVO 50 XVP*, оснащенного микроанализатором *EDS-Act*.

Результаты и обсуждение

В структуре чугуна, легированного 14,7 % меди обнаружено 4 вида медьсодержащих частиц. На рис. 1 показана схема, отражающая принцип выделения медьсодержащих включений в чугуне.

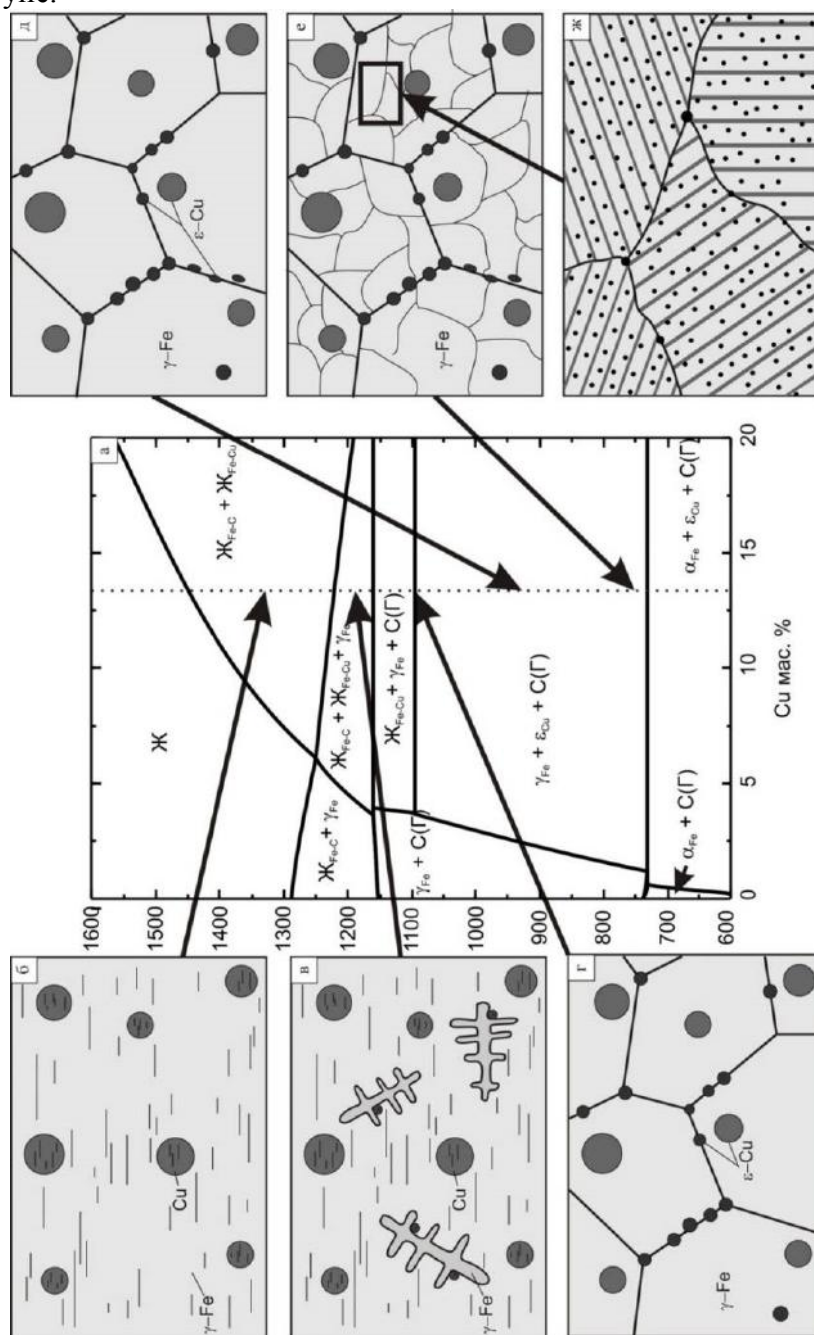


Рис. 1. Схема выделения медьсодержащих частиц

В соответствии с диаграммой состояния (рис. 1 а), включения 1 типа (рис. 1 б) образуются при температуре 1460...1340 °С. В этой зоне находится эмульсия, состоящая из двух жидкостей, одна из которых является раствором углерода в железе, вторая - раствором меди в железе. Эта зона увеличивается с повышением содержания углерода [7]. Фактически при температуре выше 1340 °С чугуны, содержащие 3 % углерода и 6...40 % меди представляют собой эмульсию из раствора на основе железа с плавающими в нем шариками твердого раствора на основе меди (рис. 1 б). В процессе кристаллизации данные включения сохраняют свою форму. В чугуне с 14,7 % меди описанные ранее шаровидные включения, образовавшиеся в результате расслоения жидкостей Fe-C и Fe-Cu равномерно распределены в объеме отливки. Объемная доля частиц 1 типа, выявленных методами оптической металлографии, составила 3,35 %. Диаметр наиболее крупных включений этого типа достигает 240 мкм. На диаграмме распределения частиц по размерам (рис. 2 а) отчетливо просматриваются 2 пика. Первый пик соответствует частицам с диаметром 160...170 мкм, и показывает средний размер частиц 1 типа. Второй пик соответствует частицам размерами 20...30 мкм, данный пик показывает средний размер частиц 2 типа.

Данные частицы имеют различный химический состав (рис. 2 б). Различие в химическом составе частиц с разным размером может свидетельствовать о разной температуре и разных условиях образования частиц.

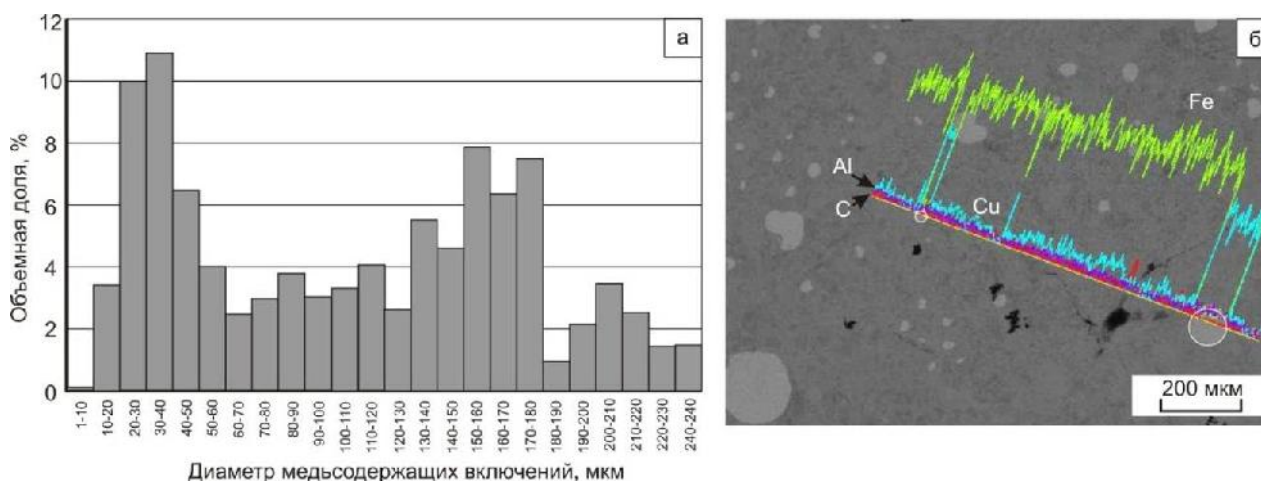


Рис. 2. Распределение по размерам медьсодержащих включений 1 и 2 типов (а) и распределение химических элементов вдоль линии, проходящей через включения разного размера (б) в чугуне с 14,7 % Cu

Доказательством того, что частицы 1 типа уже существовали и находились в жидком состоянии на момент роста ледобурита, является то, что некоторые частицы «перерезались» растущим дендритом (рис. 3 г).

Предполагается, что частицы 2 типа возникли из аустенита при температуре от ~ 1340 до 1094 °С, под кривой солидуса. Данный диапазон подробно описан в пункте 3.3.1 на примере частиц, образовавшихся в заэвтектоидной стали. При этом частицы находились в жидком состоянии до 1094 °С. Частицы 2 типа объединяет наличие округлой формы. Поскольку часть частиц 2 типа образовывалась из-за расслоения расплава, и находилась в жидкости на основе железа, а вторая часть частиц образовывалась по диффузионному механизму их твердого растущего кристалла аустенита, располагаясь по границам этого кристалла, то в окончательно застывшей структуре данные частицы образуют строчные выделения по границам бывшего аустенитного зерна и имеют круглую форму, поскольку образовывались на периферии растущего кристалла аустенита и частично находились в окружении жидкости на основе железа (рис. 3 а). Данный процесс показан на рисунке рис. 1в.

и рис. 1 г иллюстрирует момент, при котором закристаллизовалась и жидкость на основе железа, и жидкость на основе меди. При этом в структуре присутствуют аустенит, включения на основе меди 1 и 2 типов.

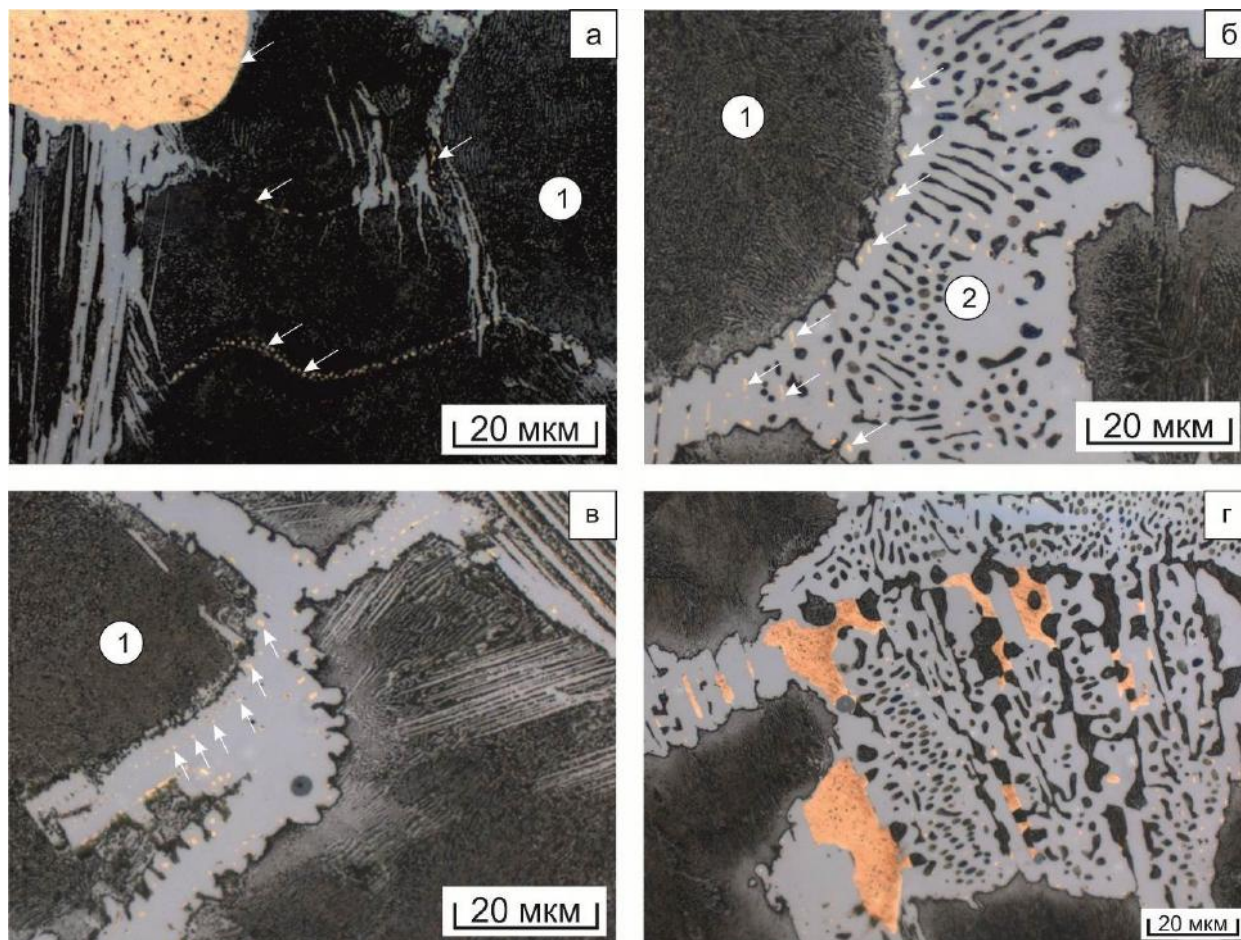


Рис. 3. Структура чугуна, содержащего 14,7 % Cu (1 – перлит, 2 – ледебурит). Стрелками показаны медьсодержащие включения

В интервале температур 1094 – 850 °С уже в твердом состоянии образовались более мелкие включения, 3 типа по диффузионному механизму (рис. 1 д). Такие выделения размером ~1 мкм имели неправильную форму и располагались между кристаллами цементита, входящего в состав ледебурита (рис. 3 б, в).

Наиболее мелкие частицы на основе меди (ϵ -Cu) выделяются в перлите (частицы 4 типа). Структура с данными частицами схематично изображена на рис. 1 е, ж. Малые размеры этих выделений позволяют зафиксировать их лишь методом просвечивающей электронной микроскопии (рис. 4). Причины формирования мелкодисперсной структуры такого типа обусловлены крайне малой растворимостью меди в α -железе при комнатной температуре. Ограниченная подвижность атомов меди в феррите, является фактором, сдерживающим рост формирующихся частиц.

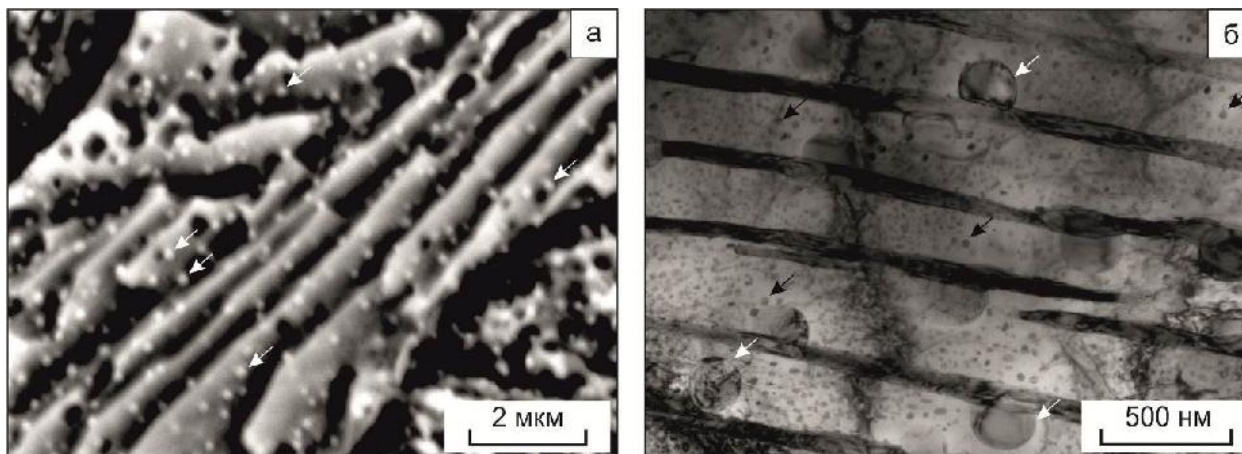


Рис. 4. Структура серого чугуна, легированного 14,7 % Cu (а - РЭМ перлита с медьсодержащими включениями, б – ПЭМ перлита с субмикронными (указаны белыми стрелками) и наноразмерными (указаны черными стрелками) частицами на основе меди)

Выводы

Медь в структуре чугуна, легированного алюминием, выделяется в широком диапазоне размеров - от 20 нм до 240 мкм. Выявлены 4 характерных типа включений на медной основе. В чугуне, легированном 14,7 % меди присутствуют «включения 1 типа», сферической формы, образованные из расплава, имеющие средний размер 150...160 мкм. «Включения 2 типа» имеют сферическую форму и размер ~20...25 мкм, располагаются по границам бывшего аустенитного зерна. Эти включения образуются при температуре выше 1094 °С ниже линии ретроградного солидуса. «Включения 3 типа» имеют неправильную форму и размер 1...2 мкм, располагаются в чугуне по границам бывшего аустенитного зерна, а в заэвтектидной стали и белом чугуне внутри цементита вторичного. Эти включения образуются в интервале температур 1094 – 850 °С. «Включения 4 типа» выделяются ниже линии сольвуса (при температуре ниже 850 °С), располагаются в феррите перлитных колоний, имеют сферическую форму и средний размер 20 нм.

Список литературы

1. Медь в черных металлах / под ред. И. Ле Мэя, Л. М.-Д. Шетки; пер. с англ. под ред. О.А. Банных. – М.: Металлургия, 1988. – 311 с.
2. Сильман Г.И., Камынин В.В., Гончаров В.В. О механизмах влияния меди на формирование структуры в чугуне // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2007. – № 9. – С. 16–22.
3. Сильман Г.И., Камынин В.В., Гончаров В.В. Влияние меди на структуру и свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом // *Заготовительные производства в машиностроении.* – 2010. – № 6. – С. 43–48.
4. Stepanova N., Bataev A., Razumakov A. Quenching of cast iron with a high copper content // *AIP Conference Proceedings.* – 2015. – Vol. 1683.
5. Influence of surfactants on the structure and wear resistance of copper alloyed hypereutectoid steel / N. Stepanova, A. Razumakov, E. Lozhkina, I. Zhil'tsov, V. Kuznetsov // *Advanced Materials Research.* – 2014. – Vol. 1040. – P. 53–58.
6. Stepanova N., Razumakov A., Lozhkina E.A. Structure and mechanical properties of Cu-alloyed cast iron // *Applied Mechanics and Materials.* – 2014. – Vol. 682. – P. 178–182.

7. *Shubhank K., Kang Y.* Critical evaluation and the thermodynamic optimization of Fe–Cu, Cu–C, Fe–C binary systems and Fe–Cu–C ternary system // Computer coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. – 2014. – Vol. 45. – P. 127–137.

PECULIARITIES EDUCATION OF COPPER-CONTAINING INCLUSIONS IN CAST IRON, WHICH CONTAINS 14.7 % COPPER

Stepanova N.V., Junior Researcher, e-mail: stepanova@adm.nstu.tu

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

In this paper we study the structural changes in the cast iron associated with an increase in the copper content up to 14.7 wt. %. The results of the study of copper-containing particles of various sizes by optical microscopy and by scanning and transmission electron microscopy submitted in paper. In the course of the work carried out analysis of the shape, size and composition of the particles, their classification, as well as the scheme of allocation of copper-based particles in the structure of cast iron. Four types of copper-based inclusions found. These inclusions are allocated in a wide range of sizes from 20 nm to 240 microns. The paper describes the conditions of formation and the differences between all four types of particles.

Keywords

iron, alloying copper, copper-based particles, nano-sized particles, structure

Funding

This study was supported by Russian Science Foundation (project No. 15-19-00230)

УДК: 621.785.5

ЛИТОЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ГОРНОРУДНЫХ МАШИН

*М.А. ГУРЬЕВ¹, канд. техн наук, докторант**МЭЙ ШУНЧИ² канд. техн наук, профессор**(¹ АлтГТУ, г. Барнаул,**² Уханьский текстильный университет, г. Ухань)*

Гурьев М.А. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: gurievma@mail.ru

Исследована структура композиционного материала на основе износостойкого чугуна марки ИЧХ28, имеющего включения высокопрочной фазы, представляющей смесь карбидов хрома и оксида циркония. Произведен анализ распределения микротвердости по сечению композита с высокотвердыми включениями. Исследован элементный, фазовый и гранулометрический состав упрочняющей фазы композита.

Ключевые слова: сталь, литье, упрочнение, композит, карбиды.

Введение

Композиционные материалы на сегодняшний день являются альтернативой традиционным конструкционным материалам на основе железа в силу сочетания лучших качеств входящих в их состав материалов.

Исследован фрагмент материала иностранного производства, имеющий включения неизвестной керамической фазы. Производитель изделий (деталей землеройного и горнодобывающего оборудования), из которых был вырезан данный фрагмент, располагается в Европейском союзе и в результате санкций, наложенных ЕС на РФ, отказался поставлять данные изделия на территорию РФ. Попытки замены данного материала на имеющиеся на рынке стали оказались безрезультатны: износостойкость замененного оборудования была катастрофически мала и не оправдывала даже затрат, понесенных на изготовление. Попытки наплавки и напыления различными высокотвердыми композициями типа сормайта, стеллита и им подобными успехом также не увенчались: в процессе работы наплавленного изделия происходило отслоение и скол наплавленного слоя и дальнейший катастрофический износ.

В результате проведенных экспериментов по импортозамещению необходимого узла, было принято решение производить его на данном этапе методом литья по газифицируемым моделям с одновременным поверхностным легированием в процессе изготовления, а также методами упрочнения ТВЧ-наплавкой либо диффузионным насыщением [1–9], так как по результатам экспериментов, данные способы обеспечивают ресурс работы приблизительно в 2,5–4 раза ниже оригинала, тогда как производство данного изделия из высоколегированных материалов и наплавка сормайтом показывали результаты в 6 и 4,8 раза ниже оригинала соответственно.

Методика исследования

При изучении структуры вырезку образцов производили на автоматическом прецизионном станке «MICRACUT-201» при помощи алмазного диска с водяным охлаждением. Вырезанные темплеты запрессовывались в бакелитовый компаунд на автоматическом прессе «METAPRESS» и полировались на автоматическом полировальном станке «DIGIPREP». Травление для выявления микроструктуры производили травителем «Ниталь». Распределение микротвердости исследовали при помощи полуавтоматического микротвердомера МН-6.

Общая микроструктура композита представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Общая микроструктура износостойкого композита на основе ИЧХ28.

Результаты исследования

Как видно из представленного рисунка, в данном композите высокотвердые включения, представляющие собой колотые карбиды, равномерно распределены в более мягкой матрице ИЧХ28.

По результатам измерения твердости, общая твердость композита составляет 1270–1310 НВ, микротвердость отдельных составляющих – карбидов 3850–4200 НВ, матрицы ИЧХ28 – 680–830 НВ.

Анализы, проведенные при помощи опико-эмиссионного анализатора «Аргон-5СФ» и рентген-флуоресцентного анализатора «Х-МЕТ 7500» показали, что содержание хрома в данном композите – от 33 до 55%, углерода – 3–8%, остальное железо и примеси. Анализ при помощи рентгеновского дифрактометра ДРОН 6.0 показал, что данный композит содержит множество карбидов хрома, основными из которых являются Cr_2C_3 , Cr_3C_7 . Наряду с карбидными включениями в композите присутствуют включения неизвестного состава, идентифицированные по результатам исследований как оксид циркония ZrO_2 , для чего потребовалось растворение матрицы ИЧХ в смеси соляной и азотной кислот, в результате

которого была выделена упрочняющая порошковая фаза. Гранулометрический состав выделенного порошка – карбиды хрома, имеющие неправильную колотую форму размерами 0,5–1,2 мм и округлые песчинки оксида циркония размерами 2–2,8 мм. Соотношение карбидов хрома к оксиду циркония составило 1:3,5.

Как видно на рисунках, в матрице ИЧХ также присутствует значительное количество карбидных включений и является эвтектикой, что свидетельствует о том, что, вероятнее всего, данный материал был получен методом пропитки соответствующей керамической фазы расплавленным металлом. В результате термических напряжений, появившихся в ходе застывания и охлаждения расплава, в некоторых местах композита наблюдаются трещины (см. Рисунок 1). При этом следует отметить, что сплавления карбидных частиц с металлом не произошло – границы раздела четкие.

Как можно заметить, микроструктура карбидных частиц неравномерна и представляет собой эвтектику.

Выводы

Таким образом, исходя из результатов исследования, можно сделать следующие выводы:

1. Принципиально возможно получение композиционных материалов на основе железоуглеродистых сплавов, содержащих различные дисперсные частицы методом пропитки.
2. Полученные композиты обладают высоким комплексом эксплуатационных свойств, недостижимых другими способами упрочнения.

Список литературы

1. Технологические основы создания износостойкого инструмента / В.В. Зобнев, С.Г. Иванов, А.М. Гурьев, А.М. Марков // Ползуновский альманах. – 2012. – № 1. – С. 271–273.
2. Особенности формирования структуры диффузионного слоя на литой стали при химико-термической обработке / А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, Д.М. Махаров, В.И. Мосоров, Е.В. Черных, О.А. Гурьева, С.Г. Иванов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2005. – Т. 2, № 1. – С. 39–41.
3. Упрочнение рабочих органов сельскохозяйственных машин путем нанесения многокомпонентных диффузионных покрытий в условиях ТВЧ-нагрева / В.В. Зобнев, А.М. Марков, С.Г. Иванов, Ю.П. Аганаев, Б.Д. Лыгденов, А.М. Гурьев // Ползуновский альманах. – 2013. – № 2. – С. 111–113.
4. Особенности формирования структуры диффузионного слоя и разработка технологии упрочнения литых инструментальных сталей с учетом дендритной ликвации / Б.Д. Лыгденов, А.М. Гурьев, И.А. Гармаева, А.Ц. Мижитов, В.И. Мосоров // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2006. – Т. 3, № 3. – С. 84–86.
5. Гурьев А.М., Хараев Ю.П. Теория и практика получения литого инструмента. – Барнаул, 2005. – 220 с.
6. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М. Упрочнение литых деталей поверхностным легированием // Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств: сборник научных трудов X международной научно-практической конференции / под ред. А.М. Гурьева, В.А. Маркова. – Барнаул, 2009. – С. 40–46.

7. Упрочнение рабочих поверхностей стальных деталей наплавочным материалом на основе боридов железа / В.В. Зобнев, С.Г. Иванов, М.А. Гурьев, Е.В. Черных, А.М. Гурьев, А.М. Марков // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2014. – Т. 11, № 3. – С. 398–401.

8. *Гурьев А.М.* Новые материалы и технологии для литых штампов. – Барнаул, 2000. – 158 с.

9. Технология упрочнения стальных изделий в процессе литья / М.А. Гурьев, Д.С. Фильчаков, С.Г. Иванов, А.М. Гурьев, В.Б. Деев // *Литейщик России*. – 2013. – № 6. – С. 36–38.

MOLDED COMPOSITE FOR MINING MACHINES

Guriev M.A.¹, Ph.D. (Engineering), Doctoral candidate, e-mail: gurievma@mail.ru
Mei Shunqi², Ph.D. (Engineering), Professor, e-mail: serg225582@yandex.ru

¹ I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

² Wuhan Textile University, 1 FangZhi Road, Wuhan, 430073, P. R. China

Abstract

The structure of composite material on the basis of the type ICHH28 ductile iron having a high switching phase, presumably a mixture of chromium carbides. The analysis of the distribution of Micro-section of a composite with high-hardness inclusions. Studied elementary, phase and particle size distribution of the hardening phase of the composite.

Keywords

steel, casting, hardening, composite, carbides

УДК 669-15:621.793.6

ДИФФУЗИОННЫЕ КАРБИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА СТАЛИ У8А*

В. А. БУТУХАНОВ, инженер
Б. Д. ЛЫГДЕНОВ, доктор техн. наук, доцент
(ВСГУТУ, г. Улан-Удэ)

Бутуханов В.А. – 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
e-mail: butuhanov_vyacheslav@mail.ru

В работе изучались свойства карбидных покрытий на стали У8А, полученных газовым контактным способом в порошках ферросплавов при их различных соотношениях в насыщающих смесях. Установлено, что двухкомпонентные покрытия превосходят по износостойкости в условиях сухого трения скольжения однокомпонентные. Выполнено математическое моделирование методом симплекс-планирования с целью определения состава смеси, обеспечивающего максимальную износостойкость.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, диффузионные слои, микротвердость, износостойкость, математическое моделирование.

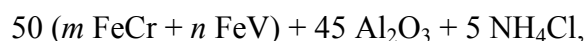
Введение

Процессы хромирования и ванадирования достаточно хорошо изучены [1]. Тем не менее, продолжается активное изучение процессов в области многокомпонентного насыщения поверхности сталей, которые по сравнению с однокомпонентным насыщением позволяют получить более широкий спектр требуемых свойств.

Цель данной работы заключалась в исследовании свойств карбидных двухкомпонентных слоев, полученных на стали У8А при различных соотношениях феррованадия и феррохрома в порошковой насыщающей смеси.

Материалы и методы исследования

Химико-термическую обработку осуществляли в герметичных контейнерах при 1000°С в течение 6 ч. в муфельной электропечи. Насыщающая смесь имела следующий состав:



где m и n – соотношения порошков феррохрома и феррованадия, которые составляли соответственно: 100/0; 75/25; 50/50; 25/75; 0/100. Оксид алюминия использовался в качестве балластной добавки для предотвращения спекания смеси. В качестве активатора использовали хлористый аммоний.

Для определения микротвердости изготавливали косые шлифы. Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 0,50 Н.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (Конкурс – МК-2015).

Износостойкость в условиях сухого трения скольжения определяли на машине трения типа Амслера при нагрузке 500 Н и 300 об/мин в течение 30 минут. Показатель относительной износостойкости K_u карбидных покрытий рассчитывали по формуле:

$$K_u = \frac{\Delta m_{\text{э}}}{\Delta m_{\text{и}}},$$

где $\Delta m_{\text{э}}$ – потеря массы эталона; $\Delta m_{\text{и}}$ – потеря массы исследуемого образца.

В качестве эталона применяли образец стали У8А после закалки и низкого отпуска (HRC 58-60). Потерю массы образцов определяли на весах ВЛТЭ-500.

Для оптимизации состава насыщающей смеси применяли метод симплекс-планирования. Критерием выступала максимальная износостойкость карбидных слоев.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных на поверхности стальных образцов сформированы диффузионные слои толщиной около 20 мкм с различной микротвердостью. Микрофотографии косых шлифов представлены на рис.1.

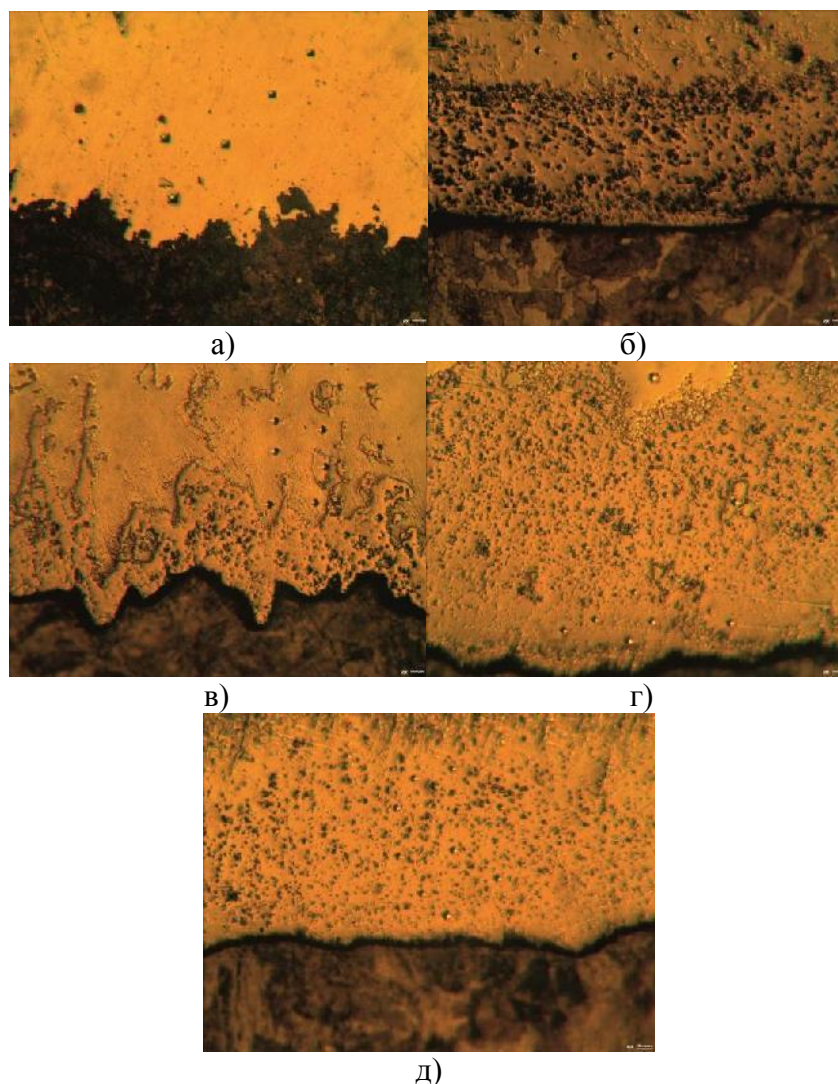


Рис. 1. Микроструктуры диффузионных слоев, полученных в смесях: а) 100% FeCr; б) 100% FeV; в) 75% FeCr + 25% FeV; г) 50% FeCr + 50% FeV; д) 25% FeCr + 75% FeV

В таблице 1 представлены результаты измерения микротвердости и износостойкости.

Таблица 1

Значения микротвердости и коэффициенты относительной износостойкости карбидных покрытий

№ состава	Соотношение порошков ферросплавов в смеси, масс. %		Микротвердость H_{50} , МПа	Коэфф. относит. износостойкости K_u , усл. ед.
	Cr	V		
1	100	0	18920	14,2
2	0	100	27000	18,1
3	75	25	18920	14,6
4	50	50	18920 27000	19,3
5	25	75	25750	22,2

На рис. 2 показана зависимость коэффициента относительной износостойкости (K_u) от состава насыщающей смеси.

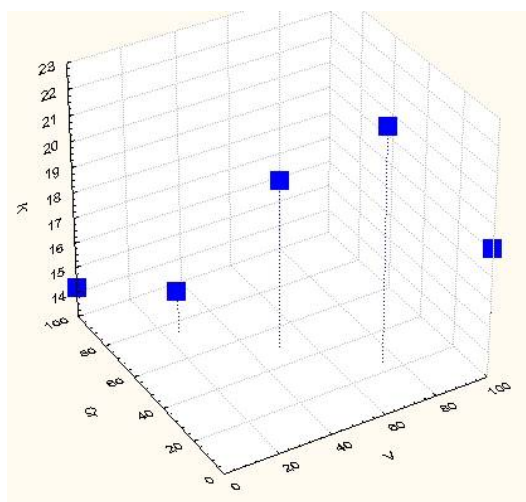


Рис. 2. Зависимость коэффициента относительной износостойкости (K_u) от соотношения порошков ферросплавов в смеси

Разработанный Шеффе [2] метод симплексных решеток заключается в том, что состав многокомпонентной системы дается точкой в правильном симплексе. В случае двухкомпонентной смеси это будет одномерный симплекс. Для получения симметричного и равномерного плана использовали псевдокоординаты X , связь которых с истинными координатами x формализуется зависимостью:

$$X_u = \frac{x_u - x_0}{\lambda}$$

где $x_0 = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} = 0,5$ – центр эксперимента; $\lambda = x_u - x_{u-1} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{M-1}$ – интервал варьирования (изменения) фактора от опыта к опыту; N – число опытов; $u = 1 \div N$ – номер опыта.

Поскольку план равномерный и симметричный ($\lambda=0,25$) и симметричный $\sum_{u=1}^M x_{uj} = 0,0$, оценки коэффициентов найдены по формуле $b_j = \frac{\sum_{u=1}^N \sigma_{ju} + Y_u}{t_j}$.

Получено уравнение 3-ей степени:

$$y = 19,36 + 4,74x - 0,81x^2 - 0,94x^3 = f(X_1)$$

Подставив в уравнение безразмерные величины X_{1u} , рассчитали величины $y_{u \text{ расч}}$ и Δu (табл. 2).

Таблица 2

Матрица планирования

u	$V, \%$	x_{1u}	X_{1u}	$Cr, \%$	x_{2u}	$y_{u \text{ эксп}}, \text{ед}$	$y_{u \text{ расч}}, \text{ед}$	$\Delta u, \text{ед}$
1	0	0,0	-2	100	1,0	14,2	14,1	-0,1
2	25	0,25	-1	75	0,75	14,6	14,7	0,1
3	50	0,50	0	50	0,50	19,6	19,3	-0,3
4	75	0,75	1	25	0,25	22,2	22,3	0,1
5	100	1,00	2	0	0,0	18,1	18	-0,1

Из $\frac{dy}{dx} = 0 = 0$, находим $X_{1\text{опт}} = 1,067$ и y_{max} :

$$y_{\text{max}} = 19,36 + 4,74 * 1,067 - 0,81 * 1,067^2 - 0,94 * 1,067^3 = 22,4$$

Получим уравнение в виде $y = f(x_1)$, подставив в полученное уравнение $X_1 = \frac{x_1 - 0,5}{0,25} = 4x_1 - 2$.

$$y = 19,36 + 4,74(4x_1 - 2) - 0,81(4x_1 - 2)^2 - 0,94(4x_1 - 2)^3 = \\ = B_0 + B_1x_1^2 + B_2x_1^2 + B_3x_1^3.$$

Оптимальный состав двухкомпонентной смеси с максимальной износостойкостью определим, реализуя связь между X_1 и x_1 :

$$x_{1\text{опт}} = \frac{X_{1\text{опт}} + 2}{4} = \frac{1,067 + 2}{4} = 0,76, \text{ т.е. } 76 \% \text{ феррованадия.} \\ x_{2\text{опт}} = 1 - x_{1\text{опт}} = 0,24 \text{ или } 24 \% \text{ феррохрома.}$$

Выводы

1. В работе установлено, что двухкомпонентные карбидные слои по микротвердости и износостойкости превосходят однокомпонентные.
2. Методом симплекс-планирования установлен состав двухкомпонентной смеси с максимальной износостойкостью при сухом трении скольжения.

Список литературы

1. Formation of VC coating on steel substrates in molten borax / S.B. Fazluddin, A. Koursaris, C. Ringas, K. Cowie // Surface Modification Technologies. – 1993. – Vol. 7. – P. 45–60.
2. Грачев Ю.П., Плаксин Ю.М. Математические методы планирования эксперимента. – М.: ДеЛи принт, 2005. – 296 с.

DIFFUSION CARBIDE COATINGS ON STEEL WITH 0,8 PERCENT OF CARBON

Butukhanov V.A., Engineer, e-mail: butuhanov_vyacheslav@mail.ru

Lygdenov B.D., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: lygdenov59@mail.ru

East Siberia State University of Technology and Management, 40V Kluchevskaya str, Ulan-Ude,
670013, Russian Federation

Abstract

The properties of carbide coatings on carbon steel were studied in this paper. Process was made in saturating mixtures with the use of iron-alloy powders. There were various ratios of these powders. It is found that the two-component coating have higher wear resistance under dry sliding friction than one component coatings. The mathematical modeling was carried out with simplex planning method. The composition of the mixture which provides the maximum durability was determined

Keywords

thermochemical treatment, diffusion layers, microhardness, wear resistance, mathematical modeling

Funding

Work is executed at financial support of grant of President of Russian Federation for state support of young Russian scientists – candidates of Sciences (Competition – MK-2015)

УДК: 621.785.5

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИЙ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ
ЛЕГИРОВАНИИ СТАЛЕЙ**

*Т.Г. ИВАНОВА¹, аспирант
М.А. ГУРЬЕВ¹, канд. техн наук, докторант
МЭЙ ШУНЧИ², канд. техн наук, профессор
(¹ АлтГТУ, г. Барнаул,
² Уханьский текстильный университет, г. Ухань)*

Иванова Т.Г. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: tatiana-8989@mail.ru

Проведен анализ механизмов диффузии бора с использованием термодинамического моделирования, позволяющего оценить влияние и вклад компонентов в процесс диффузионного насыщения. Расчеты проведены для процесса изотермического насыщения, температура процесса выбрана в пределах от 450 до 1150°C с шагом 50°C, рассчитаны энергия Гиббса и константы равновесия соответствующих реакций.

Ключевые слова: сталь, борирование, термодинамика, моделирование.

Введение

Диффузионное борирование является одним из распространенных видов химико-термической обработки железоуглеродистых сплавов. Боридные слои, полученные диффузионным борированием на стальных деталях значительно (в 5-30 раз) повышают износостойкость, теплостойкость (в 1,5 — 2 раза) и коррозионную стойкость, что позволяет повысить их срок службы.

Повышенный интерес к процессу борирования обусловлен возможностью получения в поверхностной зоне боридных слоев, характеризующихся уникальным комплексом эксплуатационных свойств и приемлемостью для обработки широкой гаммы конструкционных и инструментальных сталей. Улучшение эксплуатационных характеристик борированных изделий возможно лишь до определенного уровня, определяемого свойствами боридов и подборидной зоны, образующихся на поверхности и приповерхностном слое данного материала. В частности, для низколегированных углеродистых сталей этот уровень будет определяться свойствами боридов FeB и Fe₂B.

Методика исследования

На основании предварительно проведенных исследований [1–5] установлено, что ответственным фактором для получения соответствующего покрытия является главным образом химическая природа борсодержащего вещества, а не массовая доля бора в насыщающей среде, так как содержание бора в борлирующих смесях как правило значительно превышает требуемые его концентрации. Более детальный анализ механизмов фазо- и структурообразования возможен при использовании термодинамического моделирования, позволяющего оценить влияние и вклад компонентов в процесс диффузионного насыщения

и как следствие – производить научно обоснованный процесс синтеза борлирующих составов, в конечном итоге определяющих свойства боридных покрытий на различных сталях.

В данной работе моделировали процесс борирования из системы, содержащей в качестве основного компонента карбид бора с добавкой в качестве активатора фторида натрия.

Проведенное термодинамическое моделирование процесса диффузионного насыщения из самозащитных борлирующих обмазок на основе карбида бора позволило оценить механизмы взаимодействия компонентов насыщающей многофазной системы и определить ведущие реакции, которые могут являться источниками бора при проведении термодиффузионного борирования.

В процессе борирования происходит разложение либо диспропорционирование компонентов насыщающей среды с образованием диффузионно-активных атомов и молекул.

Расчеты проведены для процесса изотермического насыщения, температура процесса выбрана в пределах от 450 до 1150°C с шагом 50°C, рассчитаны энергия Гиббса и константы равновесия соответствующих реакций. Рассматриваемые реакции [6–7] в данной работе:



Графическая интерпретация расчетов приведена на рисунках 1 и 2:

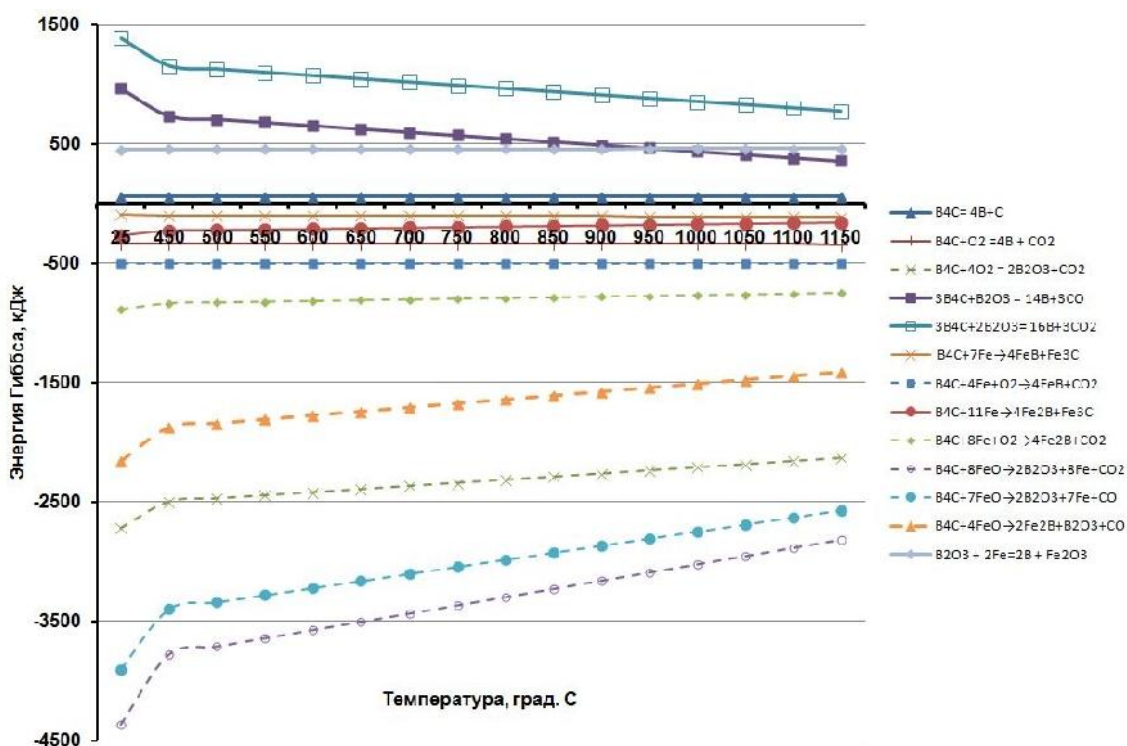


Рис. 1. Энергия Гиббса реакций образования активных атомов

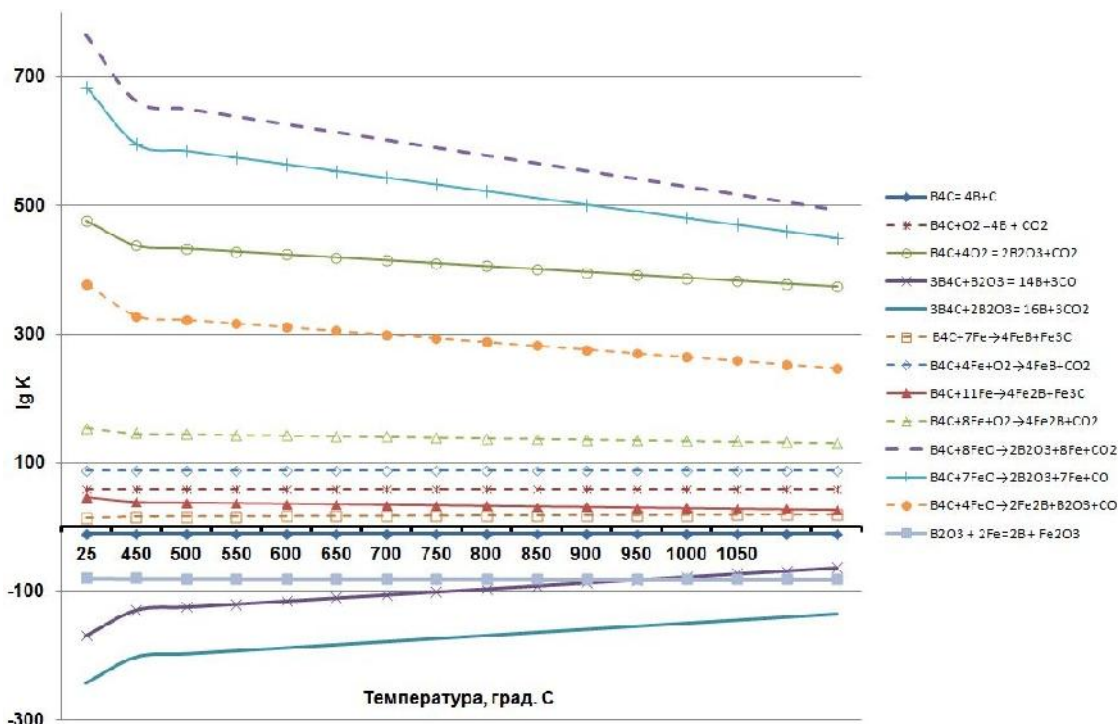


Рис. 2. Константа равновесия реакций образования активных атомов

Результаты и обсуждение

Как видно из графика, представленного на рисунке 1, наличие кислорода способствует значительной активации насыщающей среды и образования диффузионно-активных атомов бора. При этом, с учетом того, что насыщение ведется из самозащитной обмазки, в качестве поставщиков кислорода могут выступать:

- кислородсодержащие оксиды бора (карбид бора как правило, содержит порядка 2% борного ангидрида);
- оксиды железа, расположенные в виде пленки на поверхности насыщаемого изделия;
- диффундирующий сквозь защитную пленку на поверхности обмазки атмосферный кислород;
- диффундирующие из защитной пленки, образующейся на поверхности обмазки, оксиды бора (преимущественно борный ангидрид).

Ведущими реакциями при этом являются реакции (10)–(12) – на поверхности насыщаемого изделия, пока на ней имеется оксидная пленка, (7)–(9) – на границе контакта «насыщающая обмазка-насыщаемая поверхность», (2), (6) – в толще насыщаемой обмазки. На границе «насыщающая обмазка-атмосфера» по реакции (3) происходит непрерывная генерация стеклообразной защитной пленки из борного ангидрида.

Анализ констант равновесия реакций в температурном интервале насыщения показывает, что реакции (4), (5) и (13), кроме того что термодинамически невыгодны, но и не могут протекать в прямом направлении. Реакция (1) имеет шанс на протекание, однако количество диффузионно-активных атомов бора и углерода, образующихся в ее ходе будет пренебрежимо мало. Остальные реакции могут протекать и протекают во всем температурном интервале.

Выводы

В результате термодинамического моделирования реакций образования диффузионно-активных атомов в процессе борирования сталей из самозащитных насыщающих обмазок, установлено:

1. Кислородсодержащие соединения играют важную роль в ходе образования активных атомов бора, значительно увеличивая число и скорость образования активных атомов бора.

2. Наличие на поверхности насыщаемого изделия оксидной пленки, состоящей из оксидов железа способно интенсифицировать процесс борирования на начальных стадиях насыщения и дополнительно активизирует насыщаемую поверхность.

3. Наличие агрессивной кислородсодержащей внешней среды важно, так как:

– обеспечивает протекание реакций образования диффузионно-активных атомов бора в течение всего процесса насыщения:

– является главным условием для формирования стеклообразной защитной пленки борного ангидрида, защищающей нижележащие слои обмазки от чрезмерного воздействия кислорода и кроме того, под данной пленкой создается повышенное давление, дополнительно активизирующее процессы адсорбции диффузионно-активных атомов и их дальнейшую диффузию вглубь материала.

Список литературы

1. Зобнев В.В., Гурьев А.М., Марков А.М. Многокомпонентное упрочнение поверхности сталей бором совместно с титаном, хромом и вольфрамом // Инновации в машиностроении: сборник трудов 2-ой Международной научно-практической конференции / под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово, 2011. – С. 323–330.

2. Оптимизация состава смеси для борирования стрелчатых лап культиватора / И.А. Гармаева, В.В. Зобнев, А.М. Марков, Б.Д. Лыгденов, Н.Ю. Малькова, С.Г. Иванов, А.М. Гурьев // Ползуновский альманах. – 2013. – № 2. – С. 161–163.

3. Технологические основы создания износостойкого инструмента / В.В. Зобнев, С.Г. Иванов, А.М. Гурьев, А.М. Марков // Ползуновский альманах. – 2012. – № 1. – С. 271–273.

4. Износостойкость многокомпонентных диффузионных боридных покрытий на рабочих органах сельскохозяйственных машин / В.В. Зобнев, А.М. Марков, С.Г. Иванов, А.М. Гурьев // Актуальные проблемы в машиностроении: материалы Первой международной научно-практической конференции. – 2014. – С. 435–439.

5. Упрочнение рабочих органов сельскохозяйственных машин путем нанесения многокомпонентных диффузионных покрытий в условиях ТВЧ-нагрева / В.В. Зобнев, А.М. Марков, С.Г. Иванов, Ю.П. Аганаев, Б.Д. Лыгденов, А.М. Гурьев // Ползуновский альманах. – 2013. – № 2. – С. 111–113.

6. Упрочнение рабочих поверхностей стальных деталей наплавочным материалом на основе боридов железа / В.В. Зобнев, С.Г. Иванов, М.А. Гурьев, Е.В. Черных, А.М. Гурьев, А.М. Марков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2014. – Т. 11, № 3. – С. 398–401.

7. Износостойкость многокомпонентных диффузионных боридных покрытий на рабочих органах сельскохозяйственных машин / Зобнев В.В., Марков А.М., Иванов С.Г., Гурьев А.М. // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 435–439.

8. Комплексное диффузионное упрочнение тяжелонагруженных деталей машин и инструмента / М.А. Гурьев, С.Г. Иванов, Е.А. Кошелева, А.Г. Иванов, А.Д. Грешилов, А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, Г.А. Околович // Ползуновский вестник. – 2010. – № 1. – С. 114–121.

9. Особенности формирования структуры диффузионного слоя и разработка технологии упрочнения литых инструментальных сталей с учетом дендритной ликвации / Б.Д. Лыгденов, А.М. Гурьев, И.А. Гармаева, А.Ц. Мижитов, В.И. Мосоров // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2006. – Т. 3, № 3. – С. 84–86.

10. Комплексное насыщение сталей бором и хромом – борохромирование / С.Г. Иванов, А.М. Гурьев, Е.А. Кошелева, О.А. Власова, М.А. Гурьев // Ползуновский альманах. – 2008. – № 3. – С. 53.

THERMODYNAMIC MODELING OF REACTION AT SURFACE ALLOYING OF STEEL

Ivanova T.G.¹, Post-graduate Student, e-mail: tatiana-8989@mail.ru

Guriev M.A.¹, Ph.D. (Engineering), Doctoral candidate, e-mail: gurievma@mail.ru

Mei Shunqi², Ph.D. (Engineering), Professor, e-mail: serg225582@yandex.ru

¹ I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

² Wuhan Textile University, 1 FangZhi Road, Wuhan, 430073, P. R. China

Abstract

Was studied the analysis of the boron diffusion mechanisms using thermodynamic modeling, allowing to evaluate the impact and contribution of the components in the diffusion saturation process. The calculations were performed for isothermal saturation process, the process temperature is chosen in the range from 450 to 1150 ° C in steps of 50 ° C, calculated Gibbs energy and equilibrium constants of the corresponding reactions.

Keywords

steel, borating, thermodynamics, modeling

УДК 620.172.224.2

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ
ЭКСТРУДИРОВАННОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ НИЗКОЙ
ТЕМПЕРАТУРЕ***

*Н.Д. КОВАЛЕНКО, м.н.с.
А.М. ИВАНОВ, канд. техн. наук
(ИФТПС СО РАН, г. Якутск)*

Коваленко Н.Д. – 677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1,
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
e-mail: nakalykay@mail.ru

Выполнено экструдирование низкоуглеродистой конструкционной стали. Проведены механические испытания образцов на растяжение и определены механические свойства стали Ст3сп в состоянии поставки и после экструдирования. Проведено исследование механизма разрушения стали в исходном и упрочненном состоянии при положительной и отрицательной температурах. Показано, что прочность стали Ст3сп результате экструдирования повышается в 1,5...2 раза, а пластичность падает в 2,5 раза. Установлено, что в результате диспергирования структуры при экструзии в один проход при температуре 673 К со степенью деформации 0,4 сменяется вязкое разрушение при одноосном растяжении образцов не происходит, в том числе и при температуре испытаний 213 К.

Ключевые слова: сталь, экструзия, образец, температура, механические свойства, прочность, пластичность, излом, фрактограмма, механизм разрушения, вязкое разрушение.

Введение

В настоящее время во всех ведущих отраслях машиностроения все в больших масштабах применяют высокоэнергетические методы обработки материалов. Экструзия, известная как технология получения изделий путем продавливания вязкого расплава материала или густой пасты через формуемое отверстие, и используемая при формовке полимеров, изделий пищевой промышленности и т.д. нашел применение и в области упрочнения металлических материалов. Применительно к металлическим материалам экструдирование применялось вначале для обработки высокопластичных металлов, затем пластичных металлов и сплавов, и наконец, труднодеформируемых материалов [1].

Для упрочнения металлических материалов применяются различные методы интенсивной пластической деформации [2, 3]. В результате динамической экструзии в [4] крупнозернистая (КЗ) медная заготовка была раздроблена на четыре части, а заготовка из ультрамелкозернистой (УМЗ) меди на три части. При УМЗ структура в меди сформирована в результате равноканального углового прессования (РКУП) в 16 проходов по маршруту В_c. В процессе динамической экструзии в УМЗ меди произошла динамическая рекристаллизация, а в КЗ меди нет. Влияние геометрических параметров на простой сдвиг при экструзии в [5] проанализировано методом конечных элементов. Технология изготовления длинномерных полуфабрикатов методом изотермической экструзии из конструкционных титановых сплавов ВТ6 и ВТ16 представлена в [6], которая позволяет получать мелкозернистую структуру, оптимальное сочетание прочностных

* Работа выполнена в рамках научного проекта № III.28.1.1 по программе III.28.1 СО РАН

и пластических характеристик материала. Микроструктура и механические свойства бинарного сплава Mg-3Y, подвергнутого циклической экструзии и сжатия, рассмотрены в [7]. Расчет изменения структуры металлов при экструзии выполнен в [8]. Кроме того, немаловажное значение имеют прочность, надежность применяемых штампов для экструзии. Так в [9] исследована микроструктура и твердость материала матрицы, а также выполнен анализ напряженного состояния штампа при экструдировании медной заготовки методом конечных элементов. Вместе с тем, механизмы разрушения металлов и сплавов с субмикроструктурной структурой, в том числе в условиях низких температур, исследованы не в полной мере.

Цель работы заключается в исследовании механизма разрушения низкоуглеродистой стали, подвергнутой экструзии, при низкой температуре.

Материал и методика эксперимента

Экструдирование заготовок Ø12×40 мм из конструкционной низкоуглеродистой стали СтЗсп выполнялось в созданной оснастке с помощью гидравлического пресса «ПСУ 125» типа ЗИМ усилием 1250 кН. Усилие при экструдировании заготовок составило 120-140 кН. Для снижения трения использовалась технологическая смазка «РОСОЙЛ-АНГЕЛИНА» с добавками чешуйчатого графита. Химический состав стали СтЗсп, в %: 0,18 С, 0,23 Si, 0,60 Mn, 0,01 Cr, ≤0,003 Ni, 0,01 P, 0,01 S, 0,05 Cu, 0,05 Al, остальное Fe. Химический анализ проведен на атомно-эмиссионном спектрометре «Foundry-Master» фирмы «Worldwide Analytical Systems AG (WAS AG)». Обработка заготовок экструзией выполнялась при температуре 673 К. Используемая оснастка обеспечивала степень деформации 0,4.

Механические испытания на одноосное растяжение образцов из стали СтЗсп диаметром 3 мм и длиной рабочего участка 15 мм проводились с использованием испытательных машин Инстрон-1195 при комнатной температуре и UTS-20k фирмы «UTS TestSysteme GmbH» (Lammerweg 29.D-89079 Ulm) с температурной камерой и холодильной установкой «Noske-Kaeser» типа TEE 52/70X при температуре 213 К. Скорость нагружения образцов составила $3,33 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Результаты исследований и обсуждение

В результате экструдирования получили заготовки сечением 8,4×8,4 мм и длиной 65 мм (рис. 1). Механические характеристики стали СтЗсп представлены в таблице.



Рис. 1. Заготовка из стали СтЗсп после экструдирования.

Таблица

Механические характеристики стали СтЗсп

№	Состояние стали	Механические характеристики		
		σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_K , %
Температура испытания: 293 К				
1	Состояние поставки	333	485	35,1
2	Экструзия в $n=1$ проход при $T=673$ К	650	709	14,0
Температура испытания: 213 К				
4	Экструзия в $n=1$ проход при $T=673$ К	701	748	15,29

Рассмотрим изломы образцов из стали СтЗсп в исходном и упрочненном состояниях, испытанных одноосным растяжением при комнатной и отрицательной температуре.

I. Сталь СтЗсп в состоянии поставки. Анализ изломов образцов из стали СтЗсп в состоянии поставки, испытанных при одноосном растяжении, показал вязкое разрушение с образованием «чашечного» излома в шейке образца. На рис. 2а показан вид волокнистого (вязкого) излома круглого образца. Структура поверхности разрушения матовая, неровная. Образец перед разрывом испытал значительную утяжку. Изломы обеих половинок разрушенного образца образуют систему «чашечка – конус». Разрушение образованием вязкой трещины в результате слияния пор начинается с центральной части шейки образца. Разрушение образца произошло с образованием губ среза в периферийной части шейки образца.

Развитие трещины транскристаллитное. При этом механизм разрушения определяется образованием ямок путем слияния микропор (рис. 2б, г). В центральной части шейки образцов (зона I) равноосные ямки нормального отрыва, которые разделены гребнями с острыми краями (рис. 2б, в). Поскольку размеры зерен и дисперсных включений в исследуемой стали различаются значительно, то и размеры ямок меняются в широком диапазоне.

Излом периферийной части шейки (зона 2) образцов стали также сформирован по механизму вязкого разрушения. В этой зоне ямки сдвига имеют вытянутую форму, они изолированы мелкими ямками отрыва.

II. Сталь СтЗсп, подвергнутая экструзии. Разрушение образца, подвергнутого экструзии в $n=1$ проход при $T=673$ К, при комнатной температуре произошло при меньшей, чем в случае I, утяжке. Характер разрушения аналогичен случаю I, то есть вязкий. Но в данном случае максимальные размеры ямок меньше, чем для исходного материала. Это связано с меньшим размером ферритных зерен и включений в упрочненной стали.

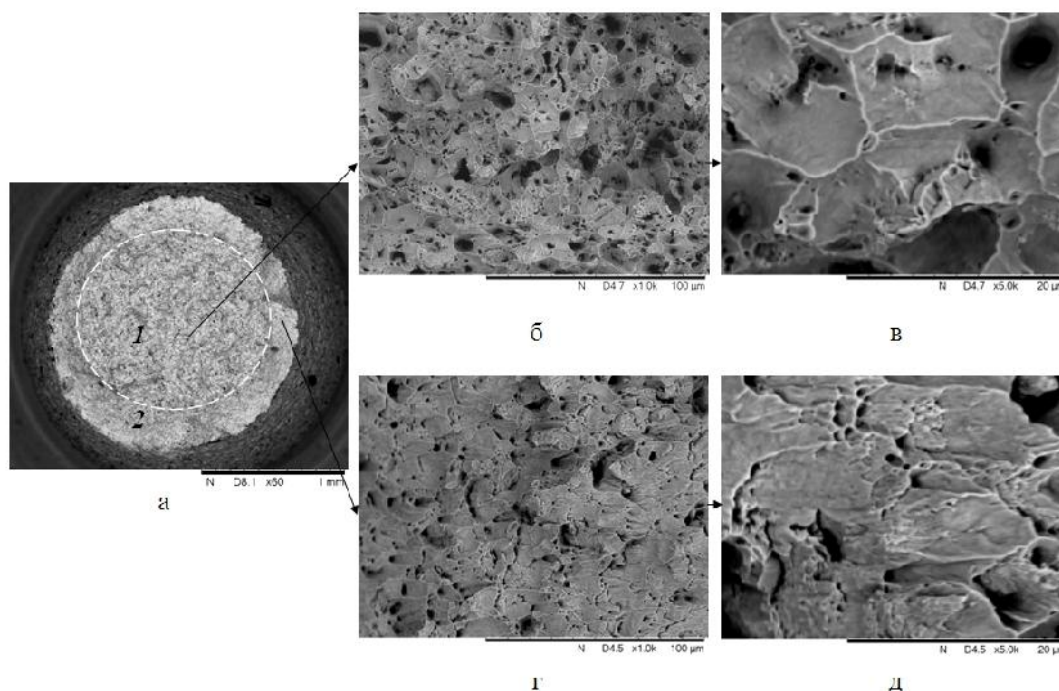


Рис. 2. Макро- и микрорельеф излома образца из стали СтЗсп в состоянии поставки, испытанного при комнатной температуре:
(а, $\times 60$), в зоне I (б, $\times 1000$; в, $\times 5000$) и в зоне (г, $\times 1000$; д, $\times 5000$).

Механизм разрушения СтЗсп, упрочненной методом экструзии, при температуре 213 К также вязкий.

Таким образом, разрушение образцов из низкоуглеродистой стали СтЗсп во всех случаях (в состоянии поставки при 293 К, в мелкозернистом состоянии при 293 К и 213 К) произошло по вязкому механизму.

Выводы

1. Как показали экспериментальные исследования, прочность стали СтЗсп результате экструдирования повышается в 1,5...2 раза, а пластичность падает в 2,5 раза, что обусловлено измельчением зерна. Показатели прочности при низкой температуре, равной 213 К, незначительно выше (в пределах 10%), чем при комнатной температуре. Пластичность практически на том же уровне, как и в случае испытаний при комнатной температуре.

2. Анализ фрактограмм показал, что для низкоуглеродистой стали СтЗсп в состоянии поставки и в мелкозернистом состоянии при одноосном растяжении образцов при температуре 293 К и 213 К характерен вязкий механизм разрушения.

Таким образом, в результате диспергирования структуры при экструзии в один проход при температуре 673 К со степенью деформации 0,4 смены вязкого механизма разрушения при одноосном растяжении образцов не произошло, в том числе и при температуре испытаний 213 К.

Список литературы

1. Шаталов Р.Л. История и философия металлургии и обработки металлов: учебное пособие для вузов. – М.: Теплотехник, 2011. – 396 с.
2. Процессы пластического структурообразования металлов / В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов, Д.А. Павлик, В.Ф. Малышев. – Минск: Наука и техника, 1994. – 231 с.
3. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: Академкнига, 2007. – 398 с.
4. Analysis on dynamic tensile extrusion behavior of UFG OFHC Cu [Electronic resource] / K-T. Park, L. Park, H.J. Kim, S.B. Kim, C.S. Lee // 2014 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 63. – P. 012144. – URL: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/63/1/012144> (accessed: 22.03.2016).
5. Bagherpour E., Qods F., Ebrahimi R. Effect of geometric parameters on deformation behavior of simple shear extrusion [Electronic resource] // 2014 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 63. – P. 012046. – URL: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/63/1/012046> (accessed: 22.03.2016).
6. Мусеев Н.В., Некрасов Б.Р., Выдумкина С.В. Энергоэффективная технология получения длинномерных полуфабрикатов методом изотермической экструзии из конструкционных титановых сплавов ВТ6, ВТ16 // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2015. – № 8. – С. 35–38.
7. Microstructure and mechanical properties of Mg-3Y binary alloy processed by cyclic extrusion and compression / X. Liu, M. Liu, Q. Wang, W. Guo, D. Yin // Materials Science Forum. – 2011. – Vol. 667–669. – P. 767–771.
8. Бейгельзимер Я.Е., Прокофьева О.В., Варюхин В.Н. Изменение структуры металлов в процессах прямой и винтовой экструзии: математическое моделирование // Металлы. – 2006. – № 1. – С. 30–38.
9. Failures of AISI H21 die in copper hot extrusion / M. Schwartz, R. Ciocoiu, D. Gheorghe, I. Ciuca // Materials at High Temperatures. – 2014. – Vol. 31, N 2. – P. 95–101.

**MECHANICAL PROPERTIES AND FRACTURE MECHANISM OF THE EXTRUDED
LOW-CARBON STEEL AT LOW TEMPERATURES**

Kovalenko N.D., Junior Researcher, e-mail: nakalykay@mail.ru

Ivanov A.M., Ph.D. (Engineering), e-mail: a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru

Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS, 1 Oktyabrskaya str., Yakutsk, 677891, Russian Federation

Abstract

The extrusion is made of low carbon structural steel. Conducted mechanical tensile test of samples and determined the mechanical properties of Fe360 steel in the initial state and after extrusion. A study of failure mechanism of steel in the initial and hardened state at positive and low temperatures. It is shown that the strength of steel Fe360 after extrusion is increased in 1,5...2 times, while the plasticity decreases in 2,5 times. As a result of the structure refinement in extrusion 673 K does not change the viscous mechanism of destruction in uniaxial sample tension, including at 213 K is established.

Keywords

steel, extrusion, sample, temperature, mechanical properties, strength, plasticity, break, fractograph, fracture mechanism, viscous fracture

Funding

The work is done within the research project № III.28.1.1 program III.28.1 RAS.

УДК 678.027.93

ОЦЕНКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ СВМПЭ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ

*Д.И. ЛАГЕРЕВА, магистрант
Д.А. МИХАЙЛОВ, магистрант
В.В. ПРОВОТОРОВ, магистрант
К.Е. ШЕВЦОВА, магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Лагерева Д.И. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: lagerenok@mail.ru

Рассмотрены вопросы создания композиционных соединений металл – СВМПЭ. Предложено в качестве соединительных элементов использовать "ласточкин хвост". Обобщены результаты исследований в области получения композиционных соединений (металл – СВМПЭ). Установлены режимные параметры по деформированию и формообразованию сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Экспериментально получены образцы, формирование которых осуществлялось при воздействии температуры и давления, обеспечивающих деформирование полиэтилена и получение соединений.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полиэтилен высокомолекулярный, объемная штамповка, формообразование, шаржирование.

Введение

СВМПЭ - сверхвысокомолекулярный полиэтилен, представляющий собой полимер линейной структуры с молекулярной массой более 1 000 000 г/моль [1], который обладает свойствами, значительно превосходящими свойства обычного высокомолекулярного полиэтилена (ПЭВП). СВМПЭ присуще такие свойства, как высокая механическая и ударная прочность, стойкость к растрескиванию под напряжением в коррозионных и влажных средах при повышенной температуре, жесткость и стабильность размеров, низкий коэффициент трения, стойкость к истиранию [2]. Кроме того СВМПЭ обладает высокой химической стойкостью, он инертен к действию многих химических реагентов, является биосовместимым материалом, широко применяется в медицине [3].

Широкому применению СВМПЭ препятствуют трудности его формообразования. В большинстве случаев объемные изделия из полиэтилена получают или механической обработкой монолитных блоков, что приводит к значительным трудозатратам и сопровождается большим количеством отходов, или литьем под давлением, которое ограничено высокой вязкостью расплава СВМПЭ. Поэтому актуальным является необходимость поиска альтернативных методов формообразования, например, пластическое деформирование СВМПЭ. Объемная штамповка является одним из способов пластической деформации, который характеризуется коротким циклом формования, высоким коэффициентом использования материала, возможностью переработки высоконаполненных материалов и материалов с высокой молекулярной массой. Для улучшения эксплуатационных характеристик СВМПЭ необходимо определение параметров технологического процесса обработки полимера посредством объемной штамповкой.

СВМПЭ как конструкционный материал используется в триботехнических парах, в силу его низкого коэффициента трения [4]. При конструировании триботехнических пар возникает необходимость зацепления СВМПЭ на различного рода каркасах, в том числе и металлических.

Настоящая работа посвящена поиску технических и технологических решений по соединению СВМПЭ с металлическим каркасом для формообразования триботехнической пары.

Для решения данной проблемы в первую очередь необходимо изучение способов формообразования изделия из полиэтилена.

Теория

Существует несколько способов формообразования деталей из СВМПЭ такие как:

1. Литье под давлением;
2. Механическая обработка;
3. Объемная штамповка.

Для полимеров и пластмасс предпочтительно используют литье под давлением на термопластавтоматах. Гранулят порошка СВМПЭ расплавляют и подают в форму, в которой он застывает. В то же время в работах [5, 6] отмечается, что при литье существуют ограничения по минимальной толщине изделия, которая равна 6мм. Это обусловлено тем, что при атмосферном давлении и при температуре плавления кристаллической составляющей материала он не переходит в текучее состояние, что не позволяет получать изделие литьем.

Поэтому в большинстве случаев формообразование происходит при помощи механической обработки готового изделия из СВМПЭ. Данный способ формообразования имеет следующие достоинства:

- Возможность создания изделий сложной формы;
- В процессе обработки не происходит изменения свойств обрабатываемого материала в виду незначительного термического воздействия.

При этом механическая обработка подразумевает большие трудозатраты, в связи с множеством операций. Так же СВМПЭ склонен к шаржированию, поэтому для ответственных изделий обычные методы финишной обработки не используются.

Метод объемной штамповки позволяет получать детали сложной конфигурации, обладает высокой производительностью и высоким коэффициентом использования материала. Следует отметить, что после объемной штамповки СВМПЭ не требуется финишной обработки для достижения требуемой шероховатости поверхности.

Из возможных вариантов объемной штамповки наиболее предпочтительными являются открытые штампы, обеспечивающие максимальную степень деформации. В закрытых штампах возникает вертикальная неустойчивость пуансонов пресса, что препятствует реализации максимальной деформации.

В работе [7] отмечается, что объемная штамповка реализуется при нагреве СВМПЭ выше температуры плавления кристаллической фазы, при которой блок - заготовка сохраняет свою конфигурацию.

Минимальное значение степени деформации равно 1,6 обусловлено появлением структурных изменений в материале, а максимальное - 11,0 - ограничено образованием дефектов в виде трещин и разрывов в материале.

Автор [8] утверждает, что реализация давления свыше 10 - 20 МПа при объемной штамповке СВМПЭ приводит к формированию упорядоченной структуры полимера. В то же время не установлено влияние скорости деформирования на структуру и свойства материала.

Установлено, что СВМПЭ склонен к окислению в среде воздуха при повышенных температурах. Для исключения этого эффекта, для высококачественных деталей, используют различные среды для нагрева: масляную или газовую (аргон, углекислота).

Методика экспериментального исследования

На основании аналитического обзора были назначены режимные параметры формирования заготовок СВМПЭ в открытом штампе (см. табл.).

Таблица

Режимные параметры формирования заготовок СВМПЭ

Температура заготовки, °С	Температура оснастки штампа, °С	Давление, МПа
135 +/- 5	125-130	30

Для формирования триботехнической пары "СВМПЭ - металлический каркас" на поверхности последнего был выполнен замок в виде "ласточкиного хвоста", предназначенного для образования соединения элементов (рисунок 1).

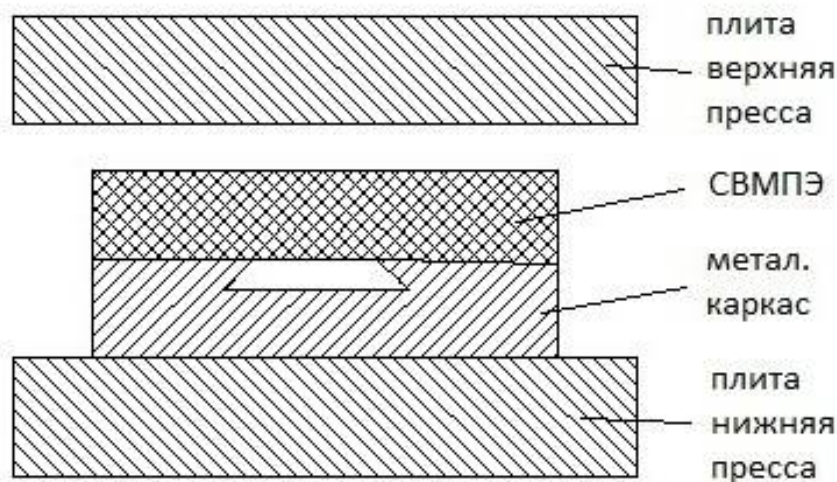


Рис. 1. Схема установки элементов соединения в гидравлическом прессе.

В процессе горячей штамповки происходило заполнение замка металлического каркаса материалом СВМПЭ. В результате сформировано соединение элементов в триботехническую пару (рисунок 2).

Нижняя плита гидравлического пресса и установленным на него металлическим каркасом и пластиной СВМПЭ нагревалась до $T=140$ °С. Верхняя плита прессы нагревалась до $T=130$ °С для исключения адгезии с материалом СВМПЭ. Формообразование соединения осуществлялось при давлении 30 МПа.

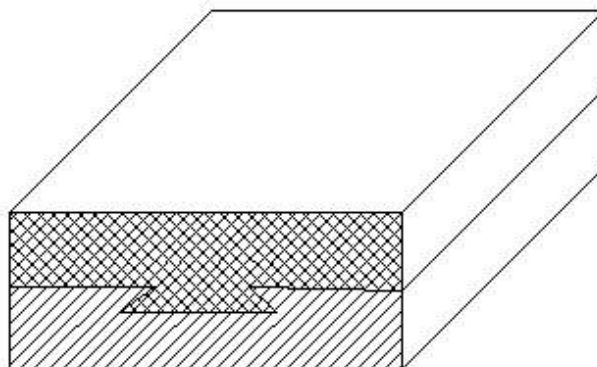


Рис. 2. Соединение металлический каркас - СВМПЭ

Охлаждение полученного соединения производилось вместе с прессом до $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, после чего изделие снималось с прессы.

Вывод

На основе исследований установлено, что СВМПЭ можно подвергать объемной штамповке, с определенными параметрами формования полимера: температурой образцов $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, нагрузкой 30 МПа, температурой оснастки на 5-10 градусов ниже температуры образца. Экспериментально подтверждено, что использование горячего пластического деформирования позволяет получить композиционное соединение металл - полиэтилен. Подбирая режимы можно обеспечить соединение материалов для создания различного рода триботехнических пар.

Список литературы

1. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности / Е.В. Андреева, Е.А. Веселовская, Е.И. Наливайко и др. – Л.: Химия, 1982. – С. 80.
2. Гвоздова Г.В., Смирнова Т.Н. Высокомолекулярный и сверхвысокомолекулярный полиэтилен за рубежом. – М., 1987. – С. 17.
3. Кондратюк А.А., Муленков А.Н., Неведомский Д.П. Разработка технологии горячего формования изделий из сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Сборник научных трудов ЛТИ. – 2009. – № 4. – С. 79–84.
4. Tong Jin, Ma Yunhai, Arnell R.D. Free abrasive wear behavior of UHMWPE composites filled with wollastonite fibers. – Ren: Luquan, 2006. – P. 38.
5. Переработка полимеров и композитов в твердой фазе: учебное пособие / Г.С. Баронин, А.М. Столин, М.Л. Кербер, В.М. Дмитриев. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 140 с.
6. Будницкий Ю.М. Переработка термопластичных полимеров при температуре ниже температуры плавления или стеклования: учебное пособие. – М.: РХТУ имени Д.И. Менделеева, 2003. – 124 с.
7. Катов М.М. Регулирование структуры и свойств сверхвысокомолекулярного полиэтилена в процессе переработки: дис. ... канд. техн. наук / РХТУ имени Д.И. Менделеева. – М., 1998.

ASSESSMENT OF THE DEFORMATION FOR UHMWPE COMPOSITE COMPOUNDS

Lagereva D.I., Master's Degree student, e-mail: lagerenok@mail.ru

Mikhaylov D.A., Master's Degree student, e-mail: noodle_man@mail.ru

Provotorov V.V., Master's Degree student, e-mail: reason166@mail.ru

Shevtsova K.E., Master's Degree student, e-mail: ksenia_shevtsova@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The main idea of this paper is searching for technical and technological solutions for connecting UHMWPE with metal frame for forming a tribological couple.

The problems of creating composite compounds, like metal and UHMWPE and using of "dovetail" like connecting elements are also considered. We have summarized all the results of exploration in composite production (metal and UHMWPE) field. The necessary operating parameters on deformation and shaping of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE). Experimentally obtained samples, which were formed under the influence of temperature and pressure are provides straining of polyethylene and compounds. UHMWPE is used as a structural material in the tribological pairs, because it has low coefficient of friction. There is a need of UHMWPE engagement on different kinds of frames, including metal, when constructing tribological pairs. To solve this problem, firstly, necessary to examine ways of forming products made of polyethylene.

Keywords

UHMWPE, HDPE, die forging, shaping, charging

УДК 669.14.018.295

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО АУСТЕНИТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ**

М.А. ФИЛИППОВ¹, доктор техн. наук, профессор
М.А. ГЕРВАСЬЕВ¹, доктор техн. наук, профессор
С.М. НИКИФОРОВА¹, аспирант,
М.С. ХАДЫЕВ¹, доктор техн. наук, профессор
М.А. РЫЖКОВ¹, канд. техн. наук, доцент
А.С. ЖИЛИН¹, канд. техн. наук, доцент
С.Х. ЭСТЕМИРОВА², канд. техн. наук, с. н. с.
(¹УрФУ, г. Екатеринбург,
²Имет УрО РАН, г. Екатеринбург)

Никифорова С.М. – 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
e-mail: s.m.nikiforova@urfu.ru

Проанализировано поведение остаточного аустенита после различных режимов термической обработки и в условиях абразивного изнашивания в высокохромистых износостойких сталях, на примере сталей ледебуритного класса X12M и 95X18. Анализ показал, что остаточный аустенит, полученный в результате высокотемпературной закалки (1100 °С – 1170 °С), метастабильен, и в процессе изнашивания превращается в дисперсный мартенсит с высокой способностью к упрочнению рабочей поверхности – «мартенсит деформации». В результате исследования влияния температуры нагрева под закалку и температуры отпуска на фазовый состав и структуру, был выбран оптимальный режим термической обработки сталей, обеспечивающий высокую износостойкость и повышенную конструктивную прочность.

Ключевые слова: остаточный аустенит, метастабильный аустенит, износостойкость, закалка, мартенсит деформации, мартенситное превращение, сталь.

Введение

Метастабильный аустенит, представляет особый интерес в научном и практическом плане для разработки группы функциональных материалов с повышенной контактной прочностью, обусловленной ТРИП-эффектом. Этот путь создания материалов с метастабильной структурой, среди основателей которого видную роль сыграли И.Н. Богачёв и В.Д. Садовский, является одним из наиболее перспективных. Материалы с метастабильным аустенитом, способные под влиянием внешних воздействий к "самоорганизации" и получившие название "интеллектуальных", "адаптирующихся", получают всё большее развитие. Однако поведение метастабильных структур при различных условиях изнашивания и методы регулирования кинетики деформационных фазовых и структурных превращений, определяющих комплекс трибологических свойств сталей, и способы их обработки изучены недостаточно.

Материалы износостойкие в различных условиях механического изнашивания (абразивного, гидро- и газоабразивного, эрозионного, кавитационного и др.) должны обладать структурой, способной к максимальному упрочнению под влиянием контактного нагружения. Рабочая поверхность таких материалов отличается высокой эффективной, или

эксплуатационной прочностью, препятствующей механическому внедрению контактирующего контртела или частиц и аномальным видам разрушения при адгезионном изнашивании. С другой стороны, ресурс работы при контактном воздействии определяется кинетикой накопления и аннигиляции дефектов кристаллического строения, т.е. адаптивной способностью материала к условиям нагружения. В качестве наиболее эффективных рассматриваются стали, в которых сформирована структура метастабильного аустенита или аустенит определённого химического состава присутствует наряду с мартенситом, карбидами и др. фазами и структурными составляющими [1-4]. Рассеяние подводимой к рабочей поверхности энергии при внешнем воздействии наиболее эффективно производится микрогетерогенной структурой с метастабильным аустенитом, превращающимся в дисперсный мартенсит в процессе эксплуатации. Самоорганизация структуры, обусловленная релаксационными процессами при образовании мартенсита, с высоким уровнем деформационного упрочнения поверхностного слоя и формирование сжимающих напряжений обеспечивают высокую стойкость материалов, в максимальной степени отвечающих принципам синергетического подхода к неравновесным системам [5].

К распространённым деталям, подвергающимся гидроабразивно-коррозионному воздействию агрессивных жидкостей, содержащей твёрдые частицы, принадлежат, например, рабочие лопатки и улитки центробежных насосов, цилиндрические втулки буровых насосов. Срок службы таких деталей не превышает 100 – 200 ч вследствие гидроабразивного и коррозионного изнашивания и появления недопустимо больших зазоров в сопрягаемых деталях.

В связи с этим представляет практический интерес разработка технологии производства цилиндрических втулок буровых насосов, аналогичных по условиям работы деталей из износостойких сталей.

Цель работы – исследование взаимосвязи температуры нагрева под закалку и изменение фазового состава и структуры высокохромистых сталей X12MФЛ и 95X18 – с их абразивной износостойкостью и выбор оптимального режима термической обработки для получения максимальной износостойкости в сочетании с повышенной конструкционной прочностью.

Методика экспериментального исследования

Из литых трубных заготовок сталей ледебуритного класса X12MФЛ после нормализации и отпуска и 95X18 после горячей прокатки и отжига были изготовлены образцы размером 10 x 10 x 25 мм для изучения микроструктуры и испытаний на абразивное изнашивание.

Температуру нагрева образцов под закалку изменяли в широком диапазоне (850÷1170°C), Выдержка при температуре нагрева составляла 30 мин, охлаждение в масле.

Оценка износостойкости образцов производилась с помощью методики изнашивания по закреплённому образцу, реализованной на специальной установке. Образцы с площадью рабочей части 10 x 10 мм совершали возвратно–поступательное движение по шлифовальной бумаге 14A32MН481 (ГОСТ 6456-82) на корундовой основе. Нагрузка на образец составляла 10 кг (удельная нагрузка 1 МПа).

Абразивная износостойкость определялась по результатам двух параллельных испытаний, сравнение результатов производили через относительные единицы:

$$\varepsilon = \Delta M_{\text{э}} / \Delta M_{\text{о}}, \quad (1)$$

где ε - относительная износостойкость, $\Delta M_{\text{э}}$ - потеря массы образца-эталона – валковой стали 9X5MФС после закалки от 900 °С и низкого отпуска (0,4100 г), $\Delta M_{\text{о}}$ - потеря массы испытуемого образца, которая составляла менее 1 % на пути трения 30 м [2].

Фазовый анализ поверхности образцов после изнашивания определяли методом рентгеноструктурного анализа, упрочнение рабочей поверхности оценивали по приросту микротвёрдости при нагрузке 0,49 Н.

Электронно-микроскопическое исследование тонких фольг, полученных из поверхностного рабочего слоя образцов проводилось на микроскопе ЭМВ-100Л в режиме светлопольного и темнопольного изображений и режиме микродифракции [3].

Рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализы (РФА и РС) проводились после первичной обработки экспериментальных данных. Первичную обработку (вычитание фона, разделение и вычитание $K\alpha_2$ -линии) выполняли с помощью программного комплекса Shimadzu, позиции пиков определяли с помощью программы ORIGIN.

Результаты и их обсуждение

С целью определения характера и температур фазовых превращений в процессе нагрева и охлаждения проведено дилатометрическое исследование образцов, изготовленных из стали X12МФЛ после трёх режимов термической обработки показал, что в стали происходит ряд структурных превращений, сопровождающихся заметными дилатометрическими эффектами. Определены критические температуры и температуры начала мартенситного превращения.

Дилатометрические исследования образцов стали X12МФЛ показали, что температура аустенитизации, как и следовало ожидать, при принятой скорости охлаждения ($3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$) оказывает значительное влияние на положение температуры Мн: если при температуре нагрева $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура Мн составляет $360\text{ }^{\circ}\text{C}$, то вследствие повышения температуры нагрева образцов до 1000 и $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура Мн снижается до $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно (рис. 1).

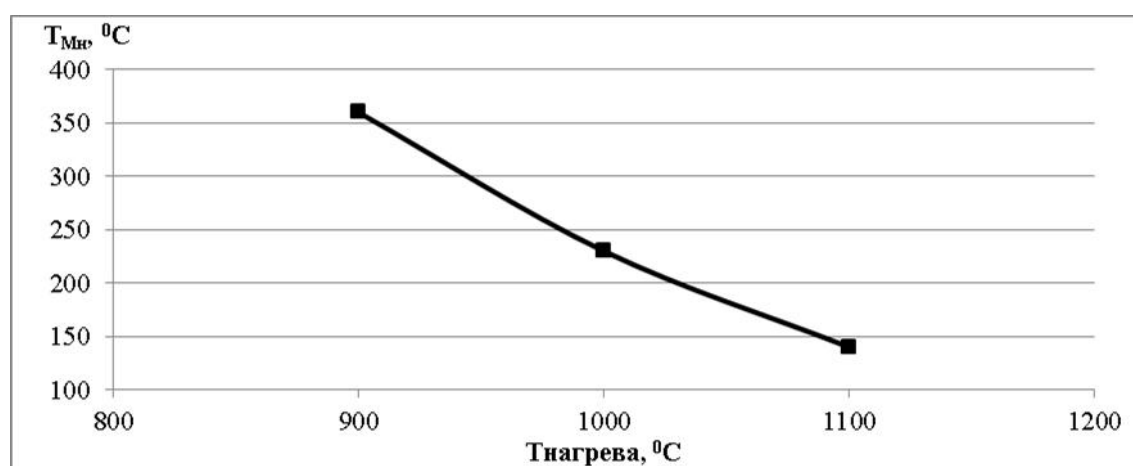


Рис. 1. Зависимость температуры начала мартенситного превращения от температуры нагрева для стали X12МФЛ

Как видно из рис 2, выбранные в этих опытах температуры нагрева не обеспечивают полное растворение карбидов M_7C_3 в аустените. По данным [6], (Геллер Ю.А.), суммарное количество карбидов в стали типа X12МФЛ при температурах нагрева 900 , 1000 и $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет около 15, 5 и 3 % соответственно. Содержание углерода и хрома в мартенсите увеличивается по сравнению с исходным отожжённым состоянием примерно вдвое, что и влечёт снижение мартенситной точки и повышение количества остаточного аустенита по мере увеличения температуры аустенитизации, рис 2.

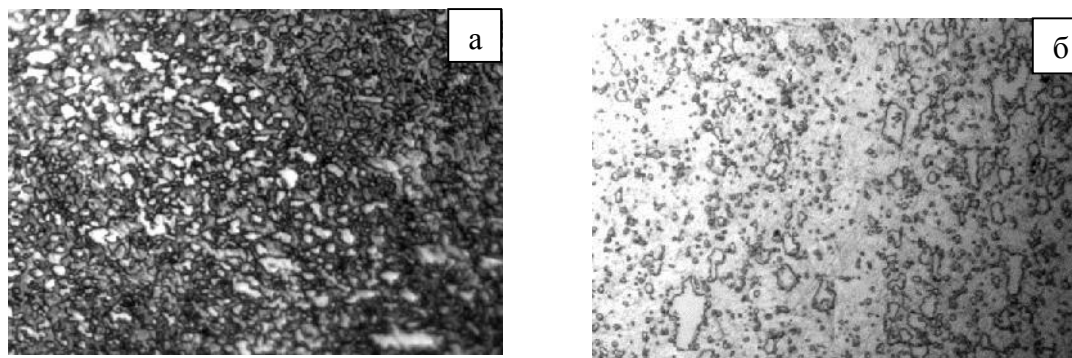


Рис. 2. Структура стали 95X18 после закалки от разных температур: а -900 °С; б - 1170°С

Поэтому одной из главных причин повышения абразивной износостойкости Х12МФЛ и 95Х18 в результате высокотемпературной закалки является помимо образования «мартенсита трения» в процессе испытания также и то, что остаточный аустенит и образующийся из него мартенсит деформации имеют повышенное содержание углерода и вследствие этого высокую микротвёрдость и способность к упрочнению.

Исходная структура образцов стали Х12МФЛ состоит из карбидно-аустенитной эвтектики по границам первичных кристаллов аустенита и избыточных карбидов [3]. В стали 95Х18 содержится мартенсит и избыточные карбиды, часть которых ориентирована в направлении прокатки. При закалке от 900 °С–1000 °С в структуре сталей мартенсит и избыточные карбиды обеспечивают высокую твёрдость (61-64 HRC), однако при этом не достигается максимальная износостойкость в условиях абразивного изнашивания.

Повышение температуры нагрева под закалку сталей 95Х18 и Х12МФЛ до 1100 – 1170 °С существенно влияет на структуру обеих сталей. Вызывает прогрессирующее снижение исходной твёрдости (до 44 и 49 HRC соответственно) в связи с растворением части карбидов и увеличением количества остаточного аустенита (до 95 и 60 % соответственно). Это сопровождается ростом износостойкости обеих сталей при абразивном изнашивании, особенно большим для стали 95Х18. Такой эффект обусловлен образованием значительного количества мартенсита деформации при изнашивании (табл. 1).

Таблица 1

Количество мартенсита (α) и аустенита (γ) в металлической основе сталей Х12МФЛ и 95Х18 после закалки от разных температур до и после испытаний на абразивное изнашивание

Температура нагрева под закалку	До абразивного износа	После абразивного износа
Сталь 95Х18		
900 °С	95-97 % α	95-97 % α
1100 °С	45% γ, 55% α	98 % α
1170 °С	95% γ, 5% α	60% α, 40 % γ
Сталь Х12МФЛ		
900 °С	96-98 % α	96-98 % α
1100 °С	20% γ, 80% α	90 % α, 10 % γ
1170 °С	60% γ, 40% α	70% α, 30 % γ

Остаточный аустенит, получаемый в результате высокотемпературной закалки в сталях 95Х18 и Х12М (1100 – 1170 °С), метастабилен и превращается в высокоуглеродистый мартенсит деформации в процессе изнашивания, что придаёт сталям максимальную износостойкость вследствие обеспечения высокой способности к фрикционному упрочнению рабочей поверхности. Микротвёрдость рабочей поверхности сталей после изнашивания достигает 11-12 ГПа.

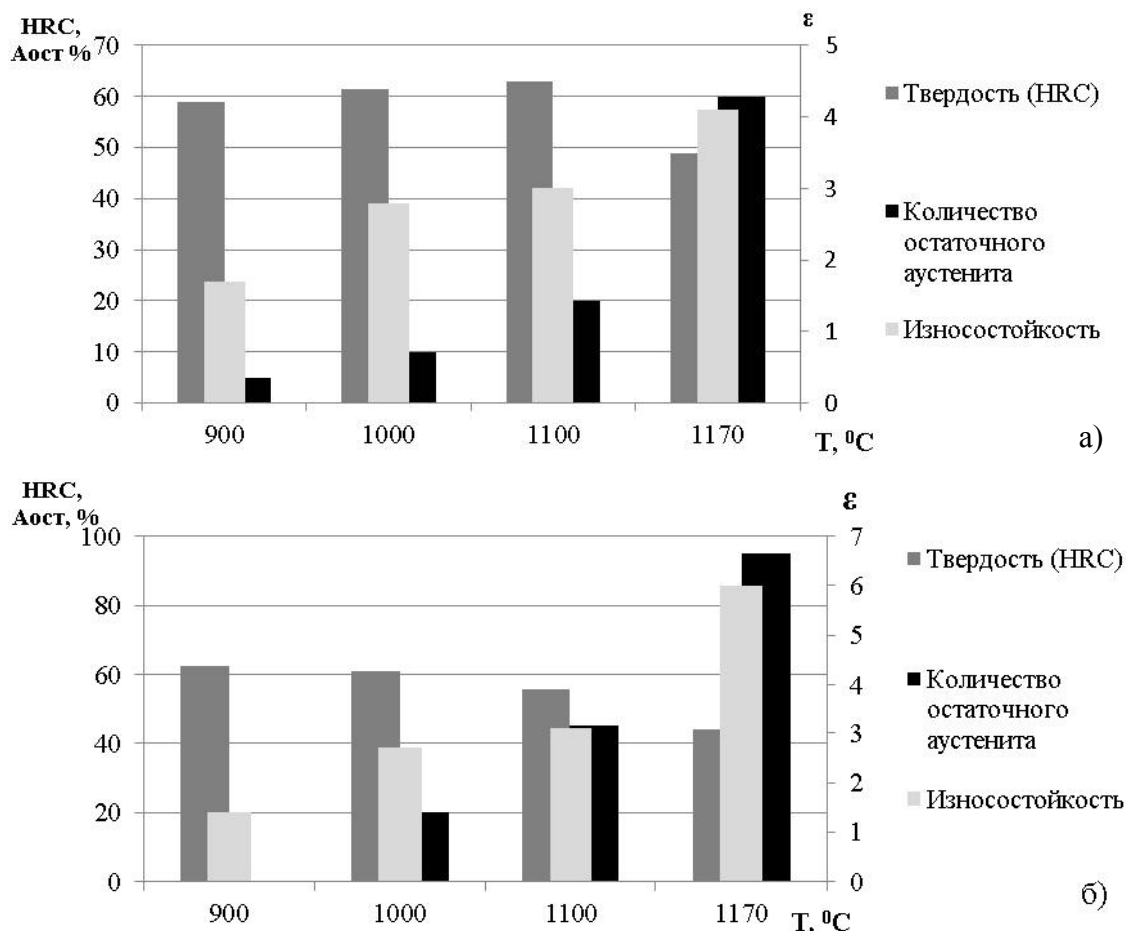


Рис. 3. Зависимость количества остаточного аустенита $A_{ост}$, твердости HRC и относительной абразивной износостойкости ϵ сталей X12M (а) и 95X18 (б)

Металлографическое и электронно-микроскопическое исследование тонких фольг стали X12M, полученных с рабочей поверхности после изнашивания, показало, что дисперсные кристаллы мартенсита деформации образуются в пределах ширины микроцарапин, оставленных после прохода абразивных частиц под определёнными углами к направлению движения частиц.

Выводы

1. Повышение температуры закалки сталей 95X18 и X12MФЛ с 900 до 1170 °C вызывает увеличение количества остаточного аустенита до 95 и 60 % соответственно.

2. Остаточный аустенит, получаемый в результате высокотемпературной закалки в сталях 95X18 и X12MФЛ, метастабилен и превращается в дисперсный мартенсит деформации (55 % в первой стали и 30 % во второй стали) в процессе изнашивания, что придаёт сталям. Не смотря на пониженную перед испытанием на изнашивание исходную твёрдость, максимальную износостойкость вследствие обеспечения высокой способности к фрикционному упрочнению рабочей поверхности.

3. Определён интервал температуры нагрева под закалку с точки зрения достижения высокой износостойкости, который составляет для обеих сталей 1050 – 1150 °C. Дальнейшее повышение температуры закалки выше 1150 °C нецелесообразно ввиду чрезмерного роста величины зерна.

Список литературы

1. *Счастливец В.М., Филиппов М.А.* Роль принципа метастабильности аустенита Богачева–Минца при выборе износостойких материалов // МиТОМ. – 2005. – № 1 – С. 6–9.
 2. Влияние температуры закалки на фазовый состав, структуру и износостойкость стали 150ХНМ / М.А. Филиппов, М.А. Гервасьев, Ю.В. Худорожкова, В.В. Легчило // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 11. – С. 14–16.
 3. Формирование структуры и износостойких сталей 150ХНМЛ и Х12МФЛ при закалке / М.А. Филиппов, М.А. Гервасьев, Г.Н. Плотников, А.С. Жилин, С.М. Никифорова // МиТОМ. – 2015. – № 11. – С. 5–9.
 4. *Иванова В.С.* Синергетика в металловедении // МиТОМ. – 2005. – № 2. – С. 12–19.
 5. *Schmidt I.* Reibungsinduzierter Martensit in austenitischen Fe-Mn-C – Stählen // Zeitschrift für Metallkunde. – 1984. – Bd. 75, H. 10. – S. 747–754.
- Геллер Ю.А.* Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1968. – 568 с.

THE USE OF RESIDUAL AUSTENITE TO INCREASE THE ABRASIVE WEAR
RESISTANCE HIGH-CHROMIUM STEELS

Filippov M.A.¹, D.Sc. (Engineering), Professor
Gervasyev M.A.¹, D.Sc. (Engineering), Professor
Nikiforova S.M.¹, Post-graduate Student, e-mail: s.m.nikiforova@urfu.ru
Khadyev M.S.¹, D.Sc. (Engineering), Professor
Ryzhkov M.A.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Zhilin A.S.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Estemirova S.H.², Ph.D. (Engineering), Senior Researcher

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

² Institute of Metallurgy, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 101 Amundsen st., Yekaterinburg, 620016, Russian Federation

Abstract

Influence of different type heat treatment including high temperature quenching on wear resistance and was investigated. Analysis of the residual austenite contents influence on wear resistance was also made. It was determined that residual austenite formed after high temperature quenching (1100-1170°C) was metastable and had tendency to transform into carbon containing martensite of deformation. This allowed steels to have maximum wear resistance because of providing high abilities to friction hardening of the work place of the sample. It investigated the effect of tempering temperature on the phase composition and structure. It was determined the optimum regime of thermal processing of steel. This regime (high temperature quenching 1100-1170°C) provides high wear resistance and structural strength.

Keywords

residual austenite, metastable austenite, wear resistance, quenching, martensite of deformation, martensitic transformation, steel

УДК 621.791.92

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ
НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Ti-Al***

*О.Э. МАТЦ, студент
Д.Д. МУНКУЕВА, студент
И.А. БАТАЕВ, канд. техн. наук, доцент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Матц О. Э. - 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: o.matts@mail.ru

Материалы на основе интерметаллидов являются одними из приоритетных при выборе конструкционных материалов. Приведены результаты исследований влияния режимов электронно-лучевой наплавки порошковой смеси, состоящей из порошков алюминия и титана технической чистоты, а также порошков флюса на титановые пластины VT1-0. Полученные покрытия исследовались методами растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Механические свойства определялись сравнением результатов измерений микротвёрдости и износостойкости покрытий с материалом основы. Установлено, что изменение тока пучка значительно влияет на структурно-фазовый состав и свойства получаемого покрытия. Показано, что метод электронно-лучевой наплавки позволяет формировать качественные покрытия.

Ключевые слова: титановые сплавы, электронно-лучевая наплавка, интерметаллиды, алюминий.

Введение

Интерметаллидам системы Ti-Al характерны уникальные свойства, такие как низкая плотность, стойкость к окислению, жаропрочность, высокая удельная прочность и высокая температура плавления, что обуславливает их применение в автомобильной и авиационной промышленности [1 - 3]. Приоритетным направлением применения интерметаллидов рассматриваемой системы является формирование защитных слоёв и покрытий на титановых основах [4]. В настоящее время известно большое количество методов нанесения покрытий [5, 6]. Однако, в литературе мало информации о получении защитных покрытий методом электронно-лучевой наплавки. Цель данной работы состояла в том, чтобы исследовать структуру и свойства покрытий системы Ti-Al, сформированных методом электронно-лучевой наплавки на пластинах титанового сплава технической чистоты VT1-0.

Материалы и методы исследования

В качестве материалов исследования были выбраны порошки алюминия и титана технической чистоты, пластины титанового сплава VT1-0, а также порошки флюса CaF₂ и LiF. На титановые пластины габаритами 50x50x12 мм наносились порошковые смеси из

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № НК 15-38-20776\15

алюминия и титана, а также порошков флюса. Затем методом электронно-лучевой наплавки формировались интерметаллидные покрытия. Образцы были получены в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН на ускорителе электронов ЭЛВ-6. Режимы электронно-лучевой наплавки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы электронно-лучевой наплавки

Плотность насыпки, г/см ²	Ток пучка, мА	Энергия пучка, МэВ	Скорость перемещения столика, мм/с	Расстояние от выпускного отверстия, мм	Частота сканирования, Гц
0,45	16	1,4	10	90	50
	18				

Структурные исследования были выполнены методом растровой электронной микроскопии на микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP в режиме обратно-рассеянных электронов. Элементный состав покрытий определялся с помощью энергодисперсионного анализатора INCAХ-АСТ. Для исследования фазового состава использовался рентгеновский дифрактометр ARLX'TRAX-ray с медной трубкой в качестве источника рентгеновского излучения. Съёмка дифракционных картин осуществлялась в пошаговом режиме с размером шага 0,05° и временем накопления на точку, равным 6 секундам.

Для оценки механических свойств использовался полуавтоматический прибор Wolpert Group 402 MVD. При измерениях микротвёрдости нагрузка на алмазный индентор составляла равна 0,1 кг. Триботехнические испытания материалов в условиях трения скольжения проводились на машине трения ИИ 5018 по схеме «диск – плоскость» в соответствии с ГОСТ 23.204-78. Для определения износостойкости интерметаллидных покрытий использовали образцы размерами 20x10x10 мм. Поверхность наплавленного покрытия перед испытаниями шлифовалась на плоскошлифовальном станке и полировалась до шероховатости Ra 0,32. В качестве контртела в паре трения использовали диски из закаленной стали 45 внешним диаметром 50 мм и шириной 10 мм. Скорость вращения диска составляла 15,7 м/мин, нагрузка на образец была равна 100 Н. Суммарное время испытаний составило 10 минут. Контроль размеров лунки износа осуществлялся с помощью лупы Бринелля каждые 60 секунд. Объем изношенного материала определялся по результатам испытаний.

Результаты исследований

Структуры поверхностных слоёв образцов при различных режимах электронно-лучевой наплавки, зафиксированные методами оптической и растровой электронной микроскопии представлены на рисунках 1 и 2. Структурные исследования показали, что толщина покрытий, полученных наплавкой при токе пучка 16 мА составила 900 мкм, а при 18 мА - 1200 мкм, в связи с тем, что с увеличением тока пучка растет величина энергии, вводимой в материал, и увеличивается толщина зоны переплава. При одинаковых исходных концентрациях элементов в порошковых насыпках ток пучка может играть решающую роль в формировании структуры и фазового состава покрытий, поскольку увеличение указанного параметра приводит к более существенному разбавлению легирующего порошка материалом основы. Об этом свидетельствуют результаты анализа элементного состава покрытий. Среднее содержание алюминия и титана в образцах, сформированных при токе пучка 16 мА составляет 48 Al–52 Ti, а при 18 мА - 35 Al–65 Ti (ат. %). Результаты микроскопий позволяют отметить, что в наплавленных слоях отсутствуют дефекты в виде крупных пор или трещин. Методом

растровой электронной микроскопии было установлено, что наплавленные слои имеют типичную для титановых сплавов микроструктуру игольчатого типа.

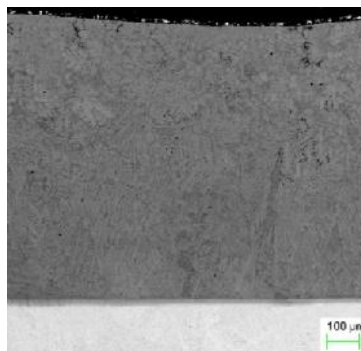


Рис. 1. Микроструктура наплавленного электронным лучом покрытия системы Ti-Al при токе пучка 16 мА

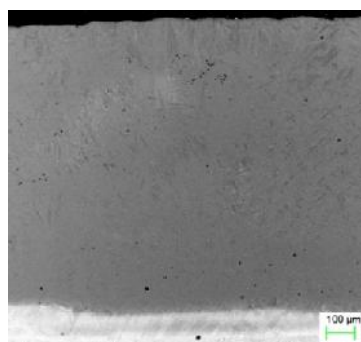


Рис. 2. Микроструктура наплавленного электронным лучом покрытия системы Ti-Al при токе пучка 18 мА

Согласно диаграмме состояния Ti-Al, при концентрациях основных элементов (указанных выше) фазовый состав поверхностных слоев должен отличаться. Так, при токе пучка 16 мА формируется фаза γ -AlTi, которое имеет довольно широкую область гомогенности (до 63 %), а при токе электронного пучка 18 мА в структуре покрытия образуется смесь интерметаллидов AlTi₃ и AlTi. При концентрации алюминия 35 – 48 ат. % формируется механическая смесь двух указанных фаз. Результаты рентгенофазового анализа представлены на рисунке 3.

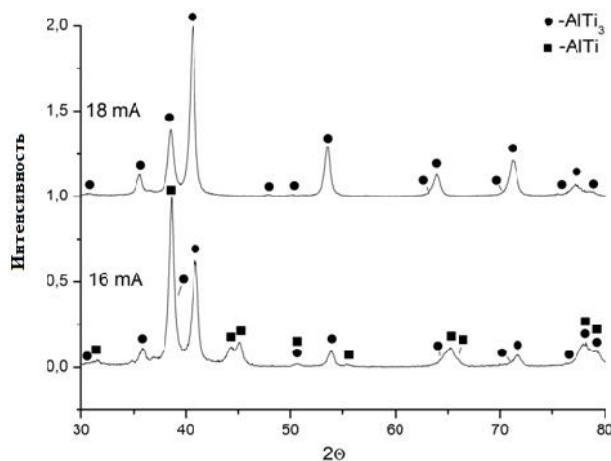


Рис. 3. Результаты рентгенофазового анализа покрытий системы Ti-Al, сформированных на пластинах титана BT1-0 методом электронно-лучевой наплавки

Для того, чтобы оценить свойства наплавленного слоя проводились измерения микротвердости и износостойкости материалов основы и наплавленного слоя (рисунки 4, 5). Было показано, что микротвердость интерметаллидных слоев, наплавленных по различным режимам, выше, по сравнению с микротвердостью материала основы примерно в 3,8 раз. При этом микротвердость слоёв, наплавленных по различным режимам, практически не отличается.

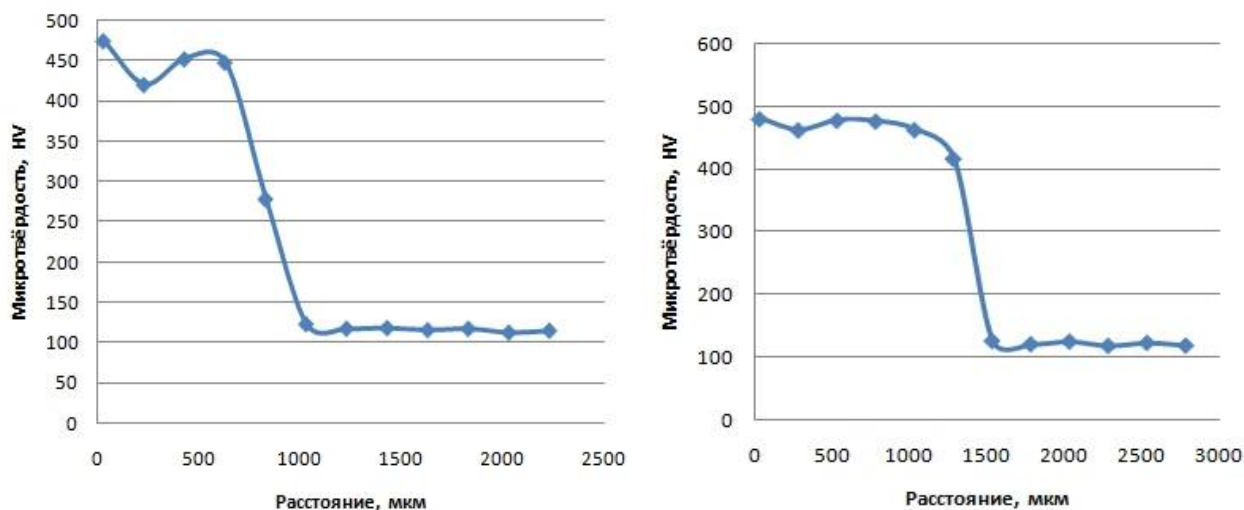


Рис. 4. Результаты измерений микротвёрдости интерметаллидных покрытий при токе пучка 16 мА (слева) и при токе пучка 18 мА (справа)

Однако износостойкость двухфазного интерметаллидного покрытия ($AlTi + AlTi_3$) оказалась выше износостойкости покрытия, состоящего только из $AlTi_3$. При этом в работе [7] указывается, что обогащенные титаном фазы должны иметь более высокую износостойкость и этот параметр в полной мере коррелирует с твердостью. Так, например, износостойкость покрытия $AlTi_3$ может быть в 2 - 3 раза выше износостойкости покрытия, состоящего из $AlTi$ (в зависимости от нагрузки и скорости скольжения). Обратная зависимость, полученная в этой работе, может быть связана с влиянием примесей, распределенных по границам дендритных ветвей в покрытии, наплавленном при токе пучка 16 мА. Эти примеси, вероятно, могут формировать, например твердые фазы (например, фосфиды), повышающие стойкость к истиранию.

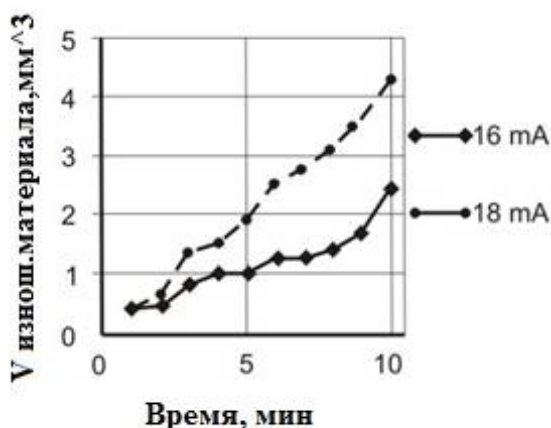


Рис. 5. Результаты испытаний на износостойкость образцов, полученных методом электронно-лучевой наплавки при разных режимах

Износостойкость титана в условиях трения скольжения оказалась значительно ниже износостойкости наплавленных слоёв. Так, например, при испытаниях чистого титана, объем изношенного материала, составляющий 3 мм³ был достигнут уже после 1 минуты испытаний. Подобный объем лунки износа при испытании наплавленных слоев достигался после 10 минут испытаний.

Выводы

На основании проведенных исследований можно утверждать, что параметры наплавки (в данном случае - ток пучка) существенно влияют на структурно-фазовый состав получаемых слоёв. При токе электронного пучка 16 мА рентгенофазовый анализ показал, что сформировался двухфазный материал, в то время как при токе 18 мА слой состоял из одной фазы. Благодаря образовавшимся интерметаллидам значения микротвёрдости полученных слоёв превысило значение микротвёрдости материала основы примерно в 3,8 раз. Износостойкость наплавленного материала существенно превысила износостойкость материала основы.

Список литературы

1. *Lütjering G., Williams J.C.* Titanium. – Berlin: Springer, 2007. – 442 p. – (Engineering Materials and Processes).
2. *Leyens C., Peters M.* Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications. – New York: Wiley-VCH, 2003.
3. *Loria E.A.* Gamma titanium aluminides as prospective structural materials // *Intermetallics*. – 2000. – Vol. 8, iss. 9–11. – P. 1339–1345.
4. Structure and properties of titanium surface layers after electron beam alloying with powder mixtures containing carbon / O. Lenivtseva, I. Bataev, M. Golkovski, A. Bataev, V. Samoilenko, N. Plotnikova // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 355. – P. 320–326.
5. In situ synthesis of titanium-aluminides in coating with supersonic free-jet PVD using Ti and Al nanoparticles / A. Yumoto, F. Hiroki, I. Shiota et al. // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – Vol. 169–170. – P. 499–503.
6. Surface modification of Ti–49.8at%Ni alloy by Ti ion implantation: phase transformation, corrosion, and cell behavior / Y. Li, T. Zhou, P. Luo et al. // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. – 2015. – Vol. 22, N 8. – P. 868–875.
7. *Appel F., Paul J.D.H., Oehring M.* Gamma titanium aluminide alloys: science and technology. – New York: Wiley-VCH, 2011.

**INFLUENCE OF ELECTRON BEAM TREATMENT REGIMES ON THE FORMING
OF Ti-Al SYSTEM CLADS**

Matts O. E., Student, e-mail: o.matts@mail.ru

Munkueva D. D., Student, e-mail: 19darima94@mail.ru

Bataev I. A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: i.bataev@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The structure and the properties of the Ti-Al intermetallic layers, which were fabricated at the surface of titanium alloys by electron-beam cladding was studied by optical microscopy and scanning electron microscopy. The cladding was carried out using non-vacuum electron beam treatment technique. Treatment by the electron beam with a current of 16 mA led to the formation of a two-phase lamellar coating consisted of AlTi and AlTi₃. Increase of a beam current to 18 mA led to the formation of a single-phase layer, which contained only AlTi₃. Formation of the intermetallic layers on a surface of cp-Ti led to significant increase of its hardness (up to 480 HV) and wear resistance. The volume of worn material in the samples obtained at the beam current of 16 and 18 mA after 10 minutes of testing was 2.4 and 4.2 mm³ respectively. Similar values of the worn material were reached after 1 minute of titanium testing.

Keywords

electron beam, aluminum, titanium alloys, intermetallic compounds

Funding

This study was supported by RFBR, research project No. 15-38-20776 mol_a_ved.

УДК 621.791.13

**КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ТИПА «ТИТАН-СТАЛЬ»,
СФОРМИРОВАННЫЙ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ**

*Ю.Н. МАЛЮТИНА, ассистент
К.А. СКОРОХОД, студент
Л.И. ШЕВЦОВА, ассистент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Малютина Ю.Н. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail:k.skorokhod@mail.ru

В работе представлены результаты структурных исследований и механических свойств композиционного материала системы «титан-сталь», сформированного сваркой взрывом. Сварка взрывом позволяет получать высокопрочные малодефектные соединения из разнородных материалов. В работе показана принципиальная схема формирования композиционного материала сваркой взрывом. Установлено, что микротвердость композиционного материала возрастает в промежуточных зонах «сталь-сталь» и «титан-сталь» (от 280 до 369 HV). Испытания на ударный изгиб показали, что ударная вязкость зависит от расположения концентратора напряжений.

Ключевые слова: титаностальной композит, сварка взрывом, прокатка

Введение

Развитие энергетики, ракетно-космической и криогенной техники требует разработки технологических способов получения надежных композиционных материалов на основе титана и стали. Такие материалы предназначены для работы в условиях высоких давлений, транспортных перегрузок, низких и повышенных температур и поэтому должны обладать высоким комплексом механических свойств. Проблема создания таких соединений традиционными способами сварки, плавлением или прокатки состоит в образовании нежелательных химических соединений на границы раздела, приводящих к неработоспособности детали. Один из эффективных путей получения высокопрочных материалов основан на использовании методов интенсивной пластической деформации, позволяющих формировать субмикроструктурную структуру в различных материалах конструкционного назначения. Недостатком, характерным для этих методов, является низкий уровень пластичности и ударной вязкости материалов. Альтернативой могут служить технологии формирования слоистых металлических материалов, основанные на сварке взрывом тонколистовых полуфабрикатов [1].

Сварка взрывом имеет ряд специфических особенностей, вызванных высокой интенсивностью пластического течения и кратковременностью действия высоких давлений и температур в поверхностных слоях соударяющихся пластин. Это позволяет получать высококачественные и бездефектные соединения из разнородных металлов, сварка которых другими способами затруднена или вообще невозможна [2].

В связи с вышесказанным, целью работы является получение методом сварки взрывом многослойных материалов «титан - сталь» с повышенным комплексом механических свойств.

Материалы и методы исследования

Технология сварки взрывом выполнялась в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. Многослойный композит формировался следующим образом. В качестве основных материалов были выбраны пластины высокопрочного титана марки ВТ23 и стали 65Г. Толщина пластин титана и стали составляла 3 мм и 1,5 мм соответственно. Для увеличения вязкости при одновременном сохранении показателей прочности, между пластинами основных материалов устанавливали тонколистовые пластины титана ВТ1-0 и стали 08ПС (рисунок 1). Сварка взрывом всех пластин осуществлялась за один этап.

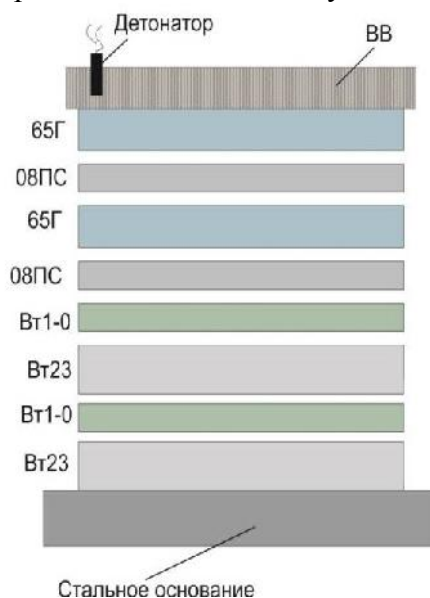


Рис. 1. Схема сварки взрывом

Исследования микротвердости проводились в соответствии с ГОСТ 9450-76 на поперечных шлифах в направлении от титана к стали. Индентором являлась алмазная пирамида, нагрузка на которую при проведении испытания составляла 50 г. Микротвердость оценивали на нетравленных и слабо травленных шлифах, подготовленных по стандартной методике.

В соответствии с ГОСТ 9454-78 в работе были проведены испытания слоистых материалов на ударный изгиб. Для испытаний использовали маятниковый копер *Metrocom* с максимальным значением энергии удара 300 Дж. Образцы имели форму параллелепипеда размером 45x2x5,25 мм с концентратором *V*-образного типа. Глубина концентратора составляла 2 мм.

По результатам всех испытаний образцов проводилась статистическая обработка экспериментальных данных.

Результаты и их обсуждение

Результаты оптической микроскопии показали, что в сформированном многослойном композите типа «ВТ23 – 65Г» отсутствуют дефекты в виде трещин (рисунок 2). Отдельные поры, образовавшиеся в сварных швах вихревого строения между ВТ23 и ВТ1-0, свидетельствуют о происходящем в процессе соударения пластин нагреве локальных участков материалов до температуры плавления и их последующей кристаллизации. В центральной пластине титана ВТ23 зафиксированы полосы скольжения [4].

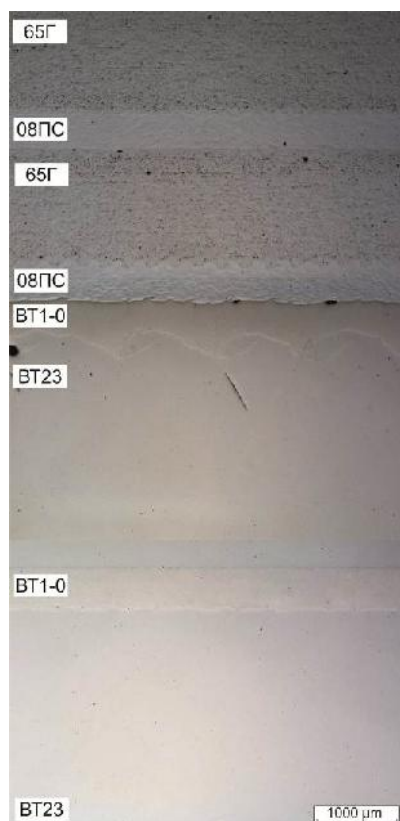


Рис. 2. Общий вид композиционного материала «ВТ23 – 65Г»

Результаты дюрометрических исследований, представленные на рисунке 3, свидетельствуют о незначительном повышении микротвердости зоны перемешивания между титаном ВТ23 и ВТ1-0, и о существенном упрочнении материала в зоне перемешивания между сталью 08ПС и 65Г (от 280 до 370 НВ).

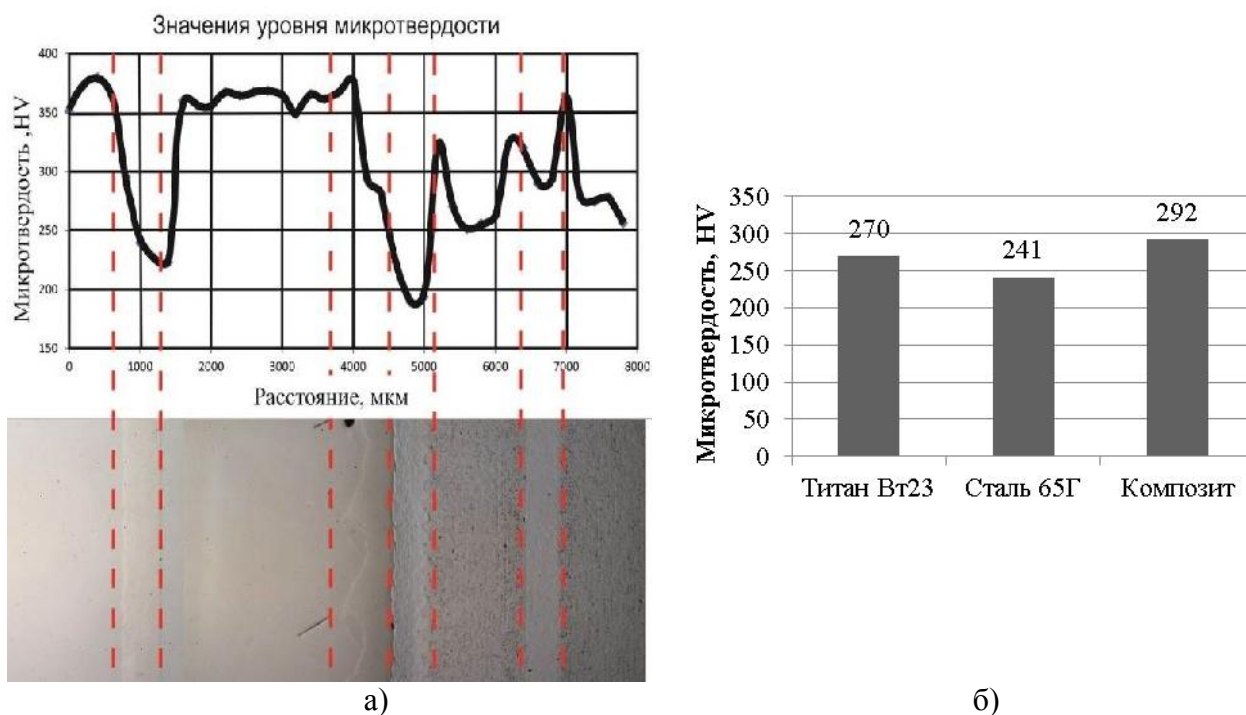


Рис.3. Значения уровня микротвердости полученного композита типа «титан – сталь» по слоям (а); микротвердость полученного композита в сравнении с исходными материалами (б)

Испытания на ударный изгиб композита, сформированного сваркой взрывом, свидетельствуют о явной зависимости энергии разрушения от ориентации надреза относительно сваренных пластин (рисунок 4). При испытании образцов, в которых линии надреза концентратора были расположены со стороны титана, зафиксирован уровень ударной вязкости 446 Дж/см², соответствующий значению исходного титана. А при испытании образцов, у которых концентратор располагался со стороны стали, уровень ударной вязкости составил 495 Дж/см².

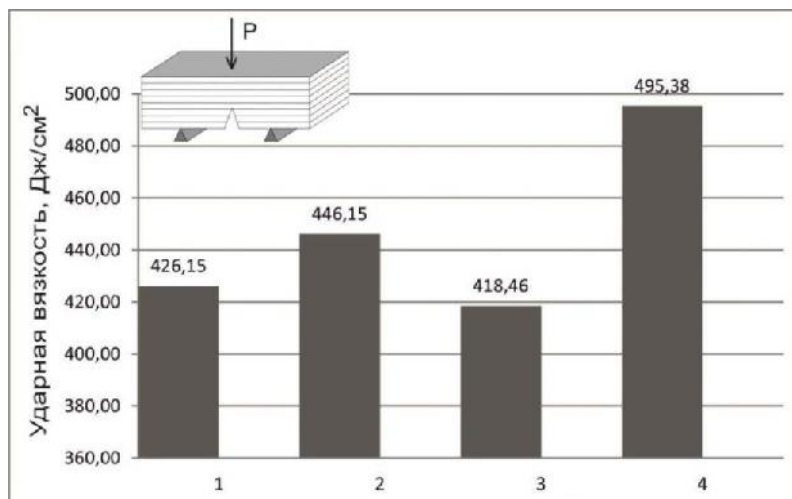


Рис.4. Ударная вязкость композиционного материала типа «титан – сталь»

Выводы

1. В сформированном многослойном композите типа «титан - сталь» отсутствуют дефекты в виде трещин.
2. Микротвердость композиционного материала на основе «титан-сталь», полученного сваркой взрывом, составляет 290 НV. Это значение превосходит уровень микротвердости исходных материалов.
3. Испытания на ударный изгиб композита, сформированного по несимметричной схеме сварки взрывом, свидетельствуют о явной зависимости ударной вязкости от ориентации надреза относительно сваренных пластин.

Список литературы

1. Сварка разнородных материалов и сплавов / В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин, Р.С. Курочко, Л.Г. Стрижевская. – М. : Машиностроение, 1984. – 239 с
2. Захаренко И.Д. Сварка металлов взрывом. – Минск: Наука и техника, 1990. – 205 с.
3. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: в 2 т. – М.: Машиностроение, 1997. – 1024 с.
4. Формирование сваркой взрывом слоистых композиционных материалов из разнородных сталей / И.А. Батаев, Д.В. Павлюкова, Т.В. Журавина, Е.Б. Макарова, Д.С. Терентьев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 1. – С. 6–8.

**COMPOSITE MATERIAL "TITANIUM-STEEL", PRODUCED BY EXPLOSION
WELDING**

Malutina, Y. N., Assistant, e-mail: iuliamaliutina@gmail.com

Skorokhod K. A., Student, e-mail: k.skorokhod@mail.ru

Shevtsova L. I., Assistant, e-mail: edeliya2010@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

Structural determination and mechanical properties results of "titanium-steel" composite material are presented in research. High-impact marginally-defected compounds from heterogeneous materials could be obtained by explosion welding. principle diagram of forming composite material by explosion welding are shown in this research. Specified, that in transition zones "steel-titanium" and "titanium-steel" microhardness of composition material increases from 280 to 369 HV. Impact-bending tests showed, that impact toughness depends on stress concentrator configuration.

Keywords

«titanium-steel» composite, explosion welding, lamination

УДК 621.768.011

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ КОВКИ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ОТЖИГА
НА КОЭРЦИТИВНУЮ СИЛУ И ЛИНЕЙНОЕ РАСШИРЕНИЕ СТАЛИ 10**

*А.Н. ПРУДНИКОВ, доктор техн. наук, профессор
В.А. ПРУДНИКОВ, аспирант
(СибГИУ, г. Новокузнецк)*

Прудников А.Н. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: a.prudnikov@mail.ru

Приведены результаты влияния предварительной термоциклической ковки и последующего отжига в интервале 100÷900°C с шагом 100°C на микроструктуру, коэрцитивную силу и линейное расширение листовой стали 10. Установлено, что использование предварительной термоциклической деформации приводит к повышению коэрцитивной силы не более чем на 8 % по сравнению со сталью, изготовленной по промышленной технологии. Показана возможность снижения коэрцитивной силы листовой стали, изготовленной с использованием термоциклической ковки, почти в 3 раза по сравнению с исходным необработанным состоянием за счет последующего отжига при 900°C в течение 10 ч. Кроме того, отжиг по этому режиму снижает температурный коэффициент линейного расширения листовой стали в среднем на 6 % в интервале температур испытания 50-450 °C.

Ключевые слова: сталь, структура, деформация, термоциклическая ковка, коэрцитивная сила, линейное расширение, отжиг, прокатка.

Введение

В промышленности подавляющая часть заготовок, деталей и конструктивных элементов изделий из различных материалов используется после упрочняющих технологий – деформационных, термических или поверхностных химико-термических обработок. Однако все более ужесточающиеся требования к современной технике привели к появлению комплексных технологий, включающих совместное применение различных способов и приемов формирования и управления структурой и, следовательно, свойствами материалов. К таким технологиям относятся термомеханическая, механотермическая и более сложный вид – деформационная термоциклическая обработка (ДТЦО). Технологические режимы этих обработок совмещают различные виды холодной и горячей деформации с нагревами, выдержками при фиксированных температурах и охлаждением в широком диапазоне скоростей (в воде, на воздухе или с печью). ДТЦО – отличается повторяемостью циклов обработки. Причем количество циклов обработки и его параметры (температура нагрева и охлаждения; температурный интервал деформирования; вид и степень деформации в цикле; общая степень деформации и др.). В литературе довольно широко освещается ДТЦО как технология, применяемая для упрочнения черных и цветных металлов и сплавов, в том числе сталей, чугунов и алюминиевых сплавов [1-8]. Гораздо меньше внимания уделено проблеме улучшения электрических, магнитных, тепловых и других физических свойств различных материалов. К таким публикациям можно отнести работы авторов [1, 9-11]. Одним из перспективных направлений использования ДТЦО может быть придание конструкционной

низкоуглеродистой стали свойств, приближающихся к свойствам некоторых групп магнитно-мягких материалов, в частности технически чистого железа и электротехнической стали, сочетающихся с повышенными механическими и технологическими свойствами. Кроме того, дополнительным резервом улучшения свойств низкоуглеродистой стали, может послужить последующая термическая обработка, оказывающая влияние на ее структуру и наиболее важные свойства. Для магнитно-мягких материалов такими свойствами могут являться электрические, магнитные и тепловые (удельное электрическое сопротивление, электрическая проводимость, потери на перемагничивание, коэрцитивная сила, коэффициент теплового расширения и др.). Поэтому целью работы явилось исследование воздействия предварительной термоциклическойковки и последующего отжига на коэрцитивную силу и линейное расширение листовой горячекатаной стали 10.

Материал и методика экспериментального исследования

В качестве материала исследования была взята низкоуглеродистая качественная сталь 10сп. Сталь была выплавлена в ОАО «НМК» (г. Новокузнецк). Химический состав опытной стали, в % (вес.): С – 0,13; Si – 0,22; Mn – 0,42; P – 0,014; S – 0,018; Cr – 0,05; Ni – 0,04; Cu – 0,20; As – 0,06; Fe – остальное. Сляб из опытной стали подвергали горячей циклической ковке. Схемаковки – однопроходная протяжка плоскими бойками с кантовкой заготовки. Деформацию слябов проводили в кузнечно-термическом цехе ОАО ЗСМК (г. Новокузнецк) на гидравлическом ковочном прессе усилием 20 МН. Технология предварительной термоциклическойковки описана в работе [11], а ее основные параметры и режим приведены ниже. Температура нагрева под ковку составляла 1250 °С, время выдержки сляба в печи перед ковкой – 2 ч. Охлаждение поковок проводили на воздухе до 200-300°С. Количество цикловковки – 10, степень деформации в каждом цикле составляла 6÷8 %. Суммарная степень деформации равнялась 65÷68 % при величине общего коэффициента уковки ~ 1,90. В дальнейшем заготовки были прокатаны на лист толщиной 3 мм на полунепрерывном прокатном стане 810 по промышленной технологии изготовления горячекатаного листа из стали 10. Перед прокаткой заготовки нагревали в газовой печи. Температура нагрева заготовок под прокатку составляла 1120÷1250 °С, время выдержки – 2÷2,5 ч. Температура конца прокатки для листа толщиной 3 мм составляла 800÷860°С. Более подробно технологический режим изготовления листа из стали 10 приведен в работе [2].

Отжиг образцов, вырезанных из листа, проводили в печах сопротивления типа СНОЛ 2.2,5.2/125-И1. Для исследования микроструктуры стали использовали оптический микроскоп ЛабОмет – И1. Для определения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) стальных образцов при различных температурах использовали высокотемпературный дилатометр DIL 402С с цифровой обработкой данных и погрешностью измерения $0,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Определение коэрцитивной силы проводили на коэрцитиметре КИФМ-1 с феррозондовым датчиком (ток размагничивания магнитопровода $8 \cdot 10^{-3} \text{ A}$) на листовых образцах прямоугольной формы толщиной 3 мм и размером 90×120 мм. Погрешность измерения составила 4 А/м.

Результаты и обсуждение

Одним из важнейших свойств магнитно-мягких материалов является коэрцитивная сила, определяющая потери энергии на перемагничивание элементов магнитных цепей. В первую очередь, это относится к сердечникам магнитопроводов, имеющих сложную конфигурацию, статоров и роторов высокочастотных машин, дросселей, трансформаторов и

других конструктивных элементов [12]. В связи с этим была определена величина коэрцитивной силы для горячекатаной стали 10, изготовленной по промышленному режиму прокатки и с использованием предварительной ДТЦО. В первом случае она составила 214 А/м, а в случае использования термоциклическойковки – 232 А/м. Такое повышение коэрцитивной силы за счет использования режимов предварительной термоциклическойковки при изготовлении листовой горячекатаной стали 10 можно объяснить изменениями, происходящими в ее микроструктуре. Это, прежде всего, измельчение зерен феррита и перлитных колоний, ориентированных вдоль направления прокатки, что согласуется с результатами металлографических исследований, проведенных в работе [2]. Такое измельчение структурных составляющих и, следовательно, увеличение протяженности границ зерен, являющихся местами скопления дефектов кристаллического строения (дислокаций, вакансий и др.), в структуре листовой стали 10, изготовленной с использованием ДТЦО, является причиной повышения величины ее коэрцитивной силы.

Зачастую в промышленности магнитные элементы работают при повышенных и пониженных температурах, в том числе широко распространенные пластинчатые наборные сердечники с электроизоляционным покрытием, герметизированные магнитные контакты (герконы) и другие подобного рода изделия. Поэтому для магнитномягких материалов, из которых изготавливают такие изделия, одной из важных характеристик является характеристика теплового расширения – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР). Проведенные исследования по воздействию режима термоциклическойковки на линейное расширение стали 10 показали, что использование ДТЦО практически не оказывает влияния на истинный температурный коэффициент линейного расширения. Величина его изменения после циклическойковки и прокатки на лист не превышает 5 % (рис. 1). Однако можно отметить тенденцию превышения коэффициента в области низких температур испытания (до 300°C) на 5 % по сравнению с коэффициентом горячекатаной стали промышленного изготовления и противоположное изменение значений ТКЛР для более высоких температур испытаний (300-450°C).

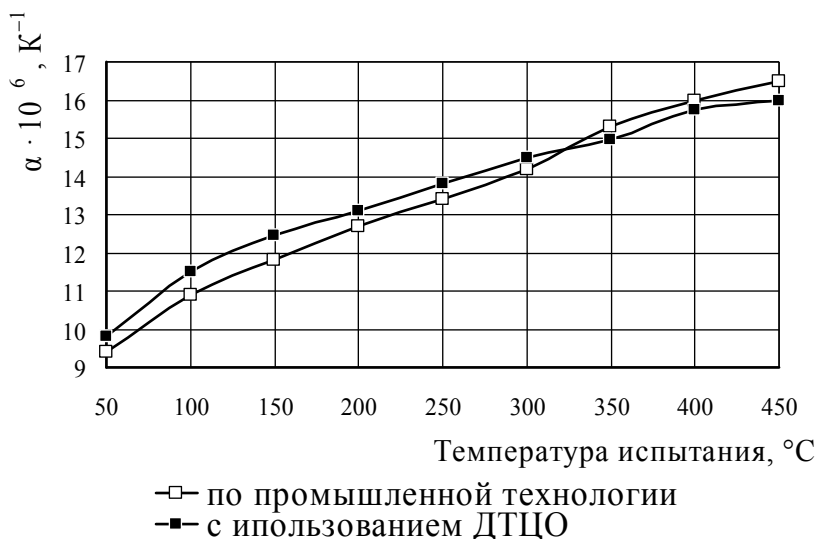


Рис. 1. Влияние термоциклическойковки на линейное расширение листовой горячекатаной стали 10 (толщина листа 3 мм)

В дальнейшем исследовали влияние последующего отжига в течение 10 ч на физические свойства листовой стали 10 (толщина 3 мм), подвергнутой ДТЦО. Установлено, что увеличение температуры отжига от 100 до 900°C с шагом 100°C приводит к последовательному снижению величины коэрцитивной силы стали (рис. 2). Ее интенсивное

снижение отмечено при более высоких температурах отжига начиная от 600°C. Минимальное значение коэрцитивной силы соответствует отжигу при температуре 900°C и составляет 83 А/м, что почти в 3 раза ниже, чем у образцов без термической обработки. Снижение величины коэрцитивной силы листовой стали, изготовленной с использованием ДТЦО, с увеличением температуры отжига объясняется общим снижением уровня напряжений и дефектов кристаллического строения (вакансий, дислокаций и др.), формирующегося в металле в результате, используемых режимов деформации и охлаждения, а также значительным ростом зерна феррита и некоторым уменьшением объемной доли перлитных колоний.

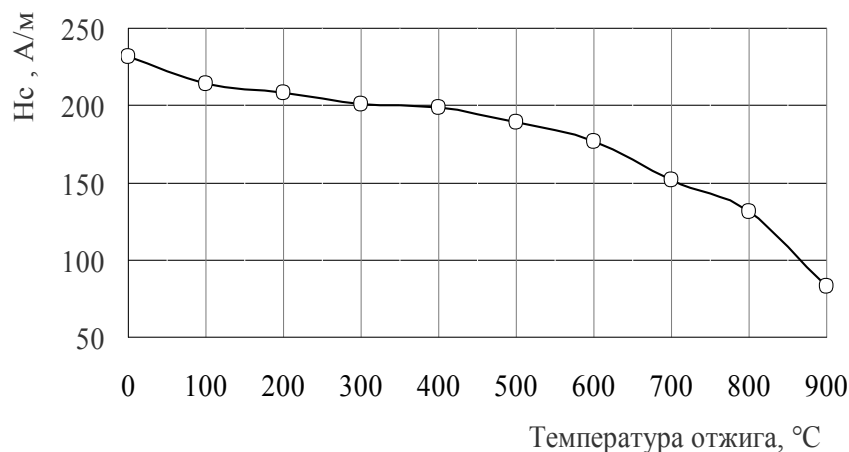


Рис. 2. Влияние температуры нагрева с охлаждением в печи на коэрцитивную силу стали 10, изготовленной с использованием ДТЦО

На основании анализа кривых температурной зависимости истинного ТКЛР стали 10, изготовленной с использованием термоциклическойковки, после отжига в течение 10 ч при 600, 700, 800 и 900°C построены графические зависимости среднего коэффициента по интервалам температур испытания от температуры отжига (рис.3).

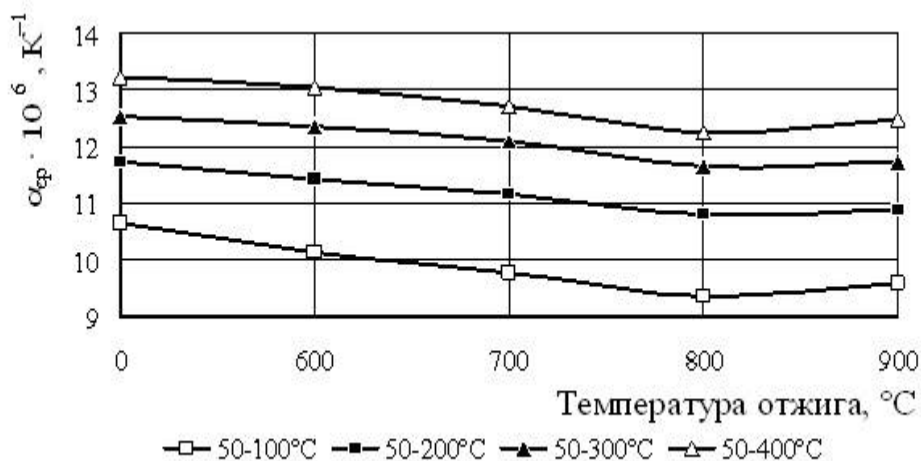


Рис. 3. Влияние температуры отжига на средний ТКЛР в различных интервалах температур испытания листовой горячекатаной стали 10, изготовленной с использованием ДТЦО

Полученные зависимости позволяют сделать вывод о снижении способности стали 10 к термическому расширению после отжига при всех исследуемых температурах. Причем отжиг стали при 800 и 900°C снижает ТКЛР более заметно. Это снижение составляет в

среднем более 6 % во всем температурном интервале испытаний (до 450°C). Кроме того, наиболее значительно отжиг при 800 и 900°C уменьшает величину среднего ТКЛР в области низких температур 50-100 и 50-200°C. Так, после отжига при 800°C это уменьшение составляет 8 и 12 %, а после отжига при 900°C – 7 и 12 % соответственно по сравнению с термически необработанными образцами.

Выводы

1. Использование термоциклическойковки для изготовления листа из стали 10 (толщина 3 мм) повышает величину ее коэрцитивной силы не более чем на 8 % по сравнению с промышленным режимом и не оказывает существенного влияния на термическое расширение.

2. Последующий высокий отжиг (900°C) в течение 10 ч листовой стали 10, изготовленной с использованием термоциклическойковки, позволяет снизить ее коэрцитивную силу почти в 3 раза по сравнению с термически необработанной сталью, а также уменьшить ТКЛР в среднем более чем на 6 % в интервале до 450°C и средний коэффициент в низкотемпературной области (до 200°C) на 7-10 %.

Список литературы

1. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. – Л.: Машиностроение, 1989. – 255 с.
2. Prudnikov A.N., Popova M.V., Prudnikov V.A. Influence of thermal-cyclic deformation and hardening heat treatment on the structure and properties of steel 10 // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 187–193.
2. Taskin M., Orhan M., Ozan S. Diffusion bonding of fine grained high carbon steels in the super-plasticity temperature range // Indian Journal of Engineering & Materials Sciences. – 2006. – Vol. 12. – P. 362–367.
3. Прудников А.Н. Комплексное воздействие отжигов и термоциклическойковки на структуру и свойства заэвтектических силуминов // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 2. – С. 14–20.
4. Чуракова А.А., Гундеров Д.А. Механические свойства сплава TiNi, полученного интенсивной пластической деформацией и последующей термоциклической обработкой // Вектор науки ТГУ. – 2013. – № 3 (25). – С. 288–291.
5. Малинен П.А., Казачков О.В. Термоциклическая обработка деталей гусеничных тракторов // Ресурсы и технология. – 1996. – № 1. – С. 51–55.
6. Горбачев С.В., Щипачев А.М., Литфуллин Р.Я. Исследование разнотермичности при деформационно-термической обработке сварных соединений из стали 20 // Нефтегазовое дело. – 2014. – № 1. – С. 302–316.
7. Furuya Y., Park Y.C. Thermal cyclic deformation and degradation of shape memory effect in Ti-Ni alloy // Nondestructive Testing and Evaluation. – 1992. – Vol. 8 (1). – P. 541–554.
8. Прудников А.Н., Попова М.В., Прудников В.А. Оценка воздействия термоциклической деформации и последующей термической обработки на электрофизические свойства низкоуглеродистой стали // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 396–400.
9. Беллавин А.Д., Подзоров Б.Н., Смагоринский М.Е. // Высокотемпературная термоциклическая обработка порошкового силумина // Цветные металлы. – 1984. – № 7. – С. 74–76.

10. Прудников А.Н., Прудников В.А., Богонос Е.В. Оценка структуры, свойств и загрязненности неметаллическими включениями деформационно-термоциклически обработанной стали 10 // Сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции «Металлургия: технология, инновации, качество», 15–16 ноября 2015 г. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2015. – С. 35–39.

11. Кекало И.Б., Самарин Б.А. Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами. – М.: Metallurgy, 1989. – 496 с.

INFLUENCE OF THERMOCYCLIC FORGING AND SUBSEQUENT ANNEALING ON THE COERCIVE FORCE AND LINEAR EXPANSION OF STEEL 10

Prudnikov A.N., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: a.prudnikov@mail.ru

Prudnikov V.A., Ph.D. student, e-mail: vladpr88@gmail.com

Siberian State Industrial University, 42 Kirova st. Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Abstract

The results of the effect of pre thermocyclic forging and subsequent annealing in the range 100–900°C in increments of 100°C steps on the microstructure, coercive force and a linear expansion of hot-rolled steel sheet 10. It is established that the use of pre-deformation thermocyclic leads to an increase of coercive force is not more than 8% compared with the steel manufactured by industrial technology. The results of determination of the temperature coefficient of linear expansion revealed that pre-forging thermocyclic little effect on the thermal expansion of steel (the changes do not exceed 5%). The possibility of reducing coercive force of sheet steel made using thermocyclic forging by applying heat treatment. Annealing at 900°C for 10 hours to reduce the coercive force steel almost 3 times compared with the thermally untreated condition. In addition, annealing of this mode reduces the temperature coefficient of linear expansion of steel sheet in an average of 6% in the temperature range 50–450 °C test. Wherein the most significant decrease in the average temperature coefficient of linear expansion at low temperatures between 50 and 200 °C. It is 7–10% compared with the steel without heat treatment.

Keywords

steel, structure, deformation, thermocyclic forging, coercive force, linear expansion, annealing, rolling

УДК 620.178.4

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ
ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СОСТАВОВ**

*А.М. МАРКОВ*¹, доктор техн. наук, профессор
*А.В. ГАБЕЦ*², канд. техн. наук, директор по развитию
*Д.А. ГАБЕЦ*¹, аспирант
*А.В. ИВАНОВ*¹, аспирант
(¹АлтГТУ, г. Барнаул,
²ООО «АСЛЗ», г. Барнаул)

Иванов А. В. - 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
e-mail: d.lenya.ne@yandex.ru

Сокращение межремонтного пробега железнодорожных вагонов, вследствие относительно невысокой эксплуатационной способности отдельных узлов, к которым относится поглощающий аппарат, в состав которого входит особо нагруженная фрикционная пластина, приводит к материальным затратам, связанным с простоем и ремонтом. Недостаточность рекомендаций и широкий диапазон варьирования по сочетанию и процентному соотношению компонентов фрикционных металлокерамических материалов на основе железа в условиях ударного трения и их влияние на показатели качества делают необходимым проведение исследований для конкретных условий работы материалов и деталей узлов. Для увеличения эксплуатационных характеристик данной детали предлагается рассмотрение повышения износостойкости металлокерамического брикета путем исследования состава и технологии изготовления порошкового композита, совершенствование и внедрение разработок.

Ключевые слова: повышение износостойкости, поглощающий аппарат, фрикционная пластина, металлокерамика, порошковые компоненты, технология спекания

Введение

Развитие железнодорожного транспорта предусматривает постоянное увеличение интенсивности пассажирских и грузовых перевозок, что, в свою очередь, требует повышения эксплуатационной надежности, а также увеличения срока службы подвижного состава. Одним из направлений повышения эффективности работы железнодорожного транспорта является минимизация затрат на обслуживание и ремонт подвижного состава.

Совершенствование основных частей и деталей вагонов приводит к удовлетворению данных требований, однако низкая эксплуатационная способность отдельных узлов может значительно сокращать межремонтный пробег. Как следствие, это приводит к материальным затратам от простоя и ремонта отдельных узлов. Поэтому увеличение эксплуатационных характеристик отдельных узлов вагонов является весьма актуальной задачей.

Теория

К одним из таких узлов относится поглощающий аппарат (рис.1) – компонент автосцепного устройства, служащий для поглощения (демпфирования) основной части

энергии удара, а также для снижения продольных растягивающих и сжимающих усилий, передающихся через автосцепку на раму рельсового подвижного состава (вагон, локомотив). Выполняет функцию буферов, но размещён внутри рамы. Усилия от автосцепки передаются через специальный тяговый хомут, благодаря которому поглощающий аппарат постоянно работает на сжатие [1].

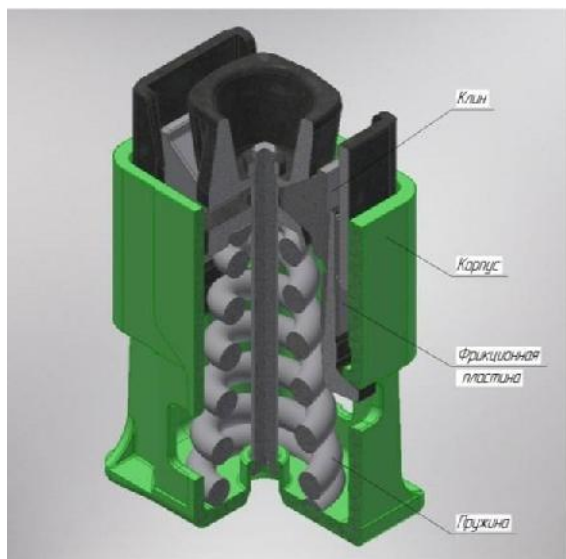


Рис. 1. Поглощающий аппарат

Особо нагруженным элементом, входящим в состав данного аппарата, является фрикционная пластина, изготовленная из металлической подложки и спеченным с ней металлокерамического брикета. Специфика данной детали заключается в том, что она работает в режиме ударного трения, который характеризуется малой длительностью процесса (0,03-0,10 с) с высоким удельным давлением (до 100 МПа), при температурах вспышки на поверхности трения до 870 К. Данные условия работы предъявляют повышенные требования к твердости поверхности (70-100 HRF), фрикционным характеристикам металлокерамики (стабильности коэффициента трения), а также к прочности сцепления (диффузии) её основы с подложкой из металла.

Основными компонентами, входящими в состав металлокерамического фрикционного материала, являются: олово, свинец, дисульфид молибдена, диоксид кремния, графит, железо. Их процентное соотношение напрямую определяет эксплуатационные характеристики материала. Процентное соотношение компонентов представлено в таблице. [2]

Таблица

Материал	Состав шихты					
	Графит	Олово	Свинец	Дисульфид молибдена	Диоксид кремния	Железный порошок
	8,5-9,5	9-11	1,5-2,5	1,5-2,5	4-6	остальное

Постепенный износ металлокерамического брикета приводит к увеличению номинальных зазоров и изменению параметров действующих нагрузок. Так, если брикет должен воспринимать давление и незначительные ударные нагрузки, то при износе и увеличенном зазоре происходит возрастание значений данных нагрузок, которое приводит к постепенному выкрашиванию поверхности брикета, что также сказывается на изменении шероховатости и коэффициенте трения. Необходимо учитывать, что молекулярное схватывание поверхностей, которое наблюдается в зоне контакта, оказывает значительное влияние на процесс износа поверхности. В следствие всех этих факторов происходит разрушение металлокерамического брикета и нарушение правильного функционирования поглощающего аппарата. Поэтому повышенная износостойкость необходима не только с точки зрения увеличения срока службы детали, но и для условий нормального функционирования всего узла. Исходя из этого, можно сделать вывод, что необходимо обеспечить высокую износостойкость поверхностного слоя металлокерамического брикета, которая приведет к сохранности максимального объема фрикционного материала и, как следствие, правильному функционированию всего аппарата [3].

Обсуждение и результаты

В качестве перспективного направления исследования можно выделить упрочнение поверхностного слоя путем нанесения легирующих элементов на данный слой, а также создание многослойного брикета, каждый слой которого отвечает за восприятие конкретных нагрузок (трение, удар, сцепление).

Существуют различные методы получения и спекания металлокерамического брикета. В зависимости от применяемого оборудования и его возможностей, технологический процесс может проходить в среде вакуума, водорода или эндогаза. Существенного влияния на качество данные различия технологического процесса не оказывают, но необходимо учитывать, что водород является взрывоопасным газом, что приводит к нарушениям охраны окружающей среды и безопасности жизни человека. Поэтому рекомендуется применение технологии вакуумного спекания в технологическом процессе. Имеются также конкретные требования, которые оказывают прямое воздействие на структуру и качество порошкового материала. К ним относятся: температурные диапазоны (1273-1373 К) и время выдержки (4-5 часов), удельное давление прессовки порошка (420-650 МПа) при создании заготовки, а также давление на спекаемую массу (0,5-2 МПа)[4].

Технологический процесс оказывает значительное влияние на структуру материала, от которой зависит главный критерий оценки качества – износостойкость. В общем случае технологический процесс изготовления деталей из металлокерамического материала можно представить следующим образом: подготовка смеси, подготовка подложки, нанесение покрытия, спекание, обработка [5], контроль.

Одним из определяющих качества является структура материала. Состав различных порошковых материалов и их процентное соотношение являются ключевыми в определении прочностных характеристик, таких как, твердость, коэффициент трения, теплопроводность и теплоемкость. Также необходимо учитывать экономическую эффективность применения тех или иных легирующих элементов, так как применение дорогостоящих компонентов не всегда приводит к пропорциональному увеличению качественных показателей. В связи с тем, что наблюдается патентная борьба, все чаще добавляются новые компоненты, зачастую не приводящие к заявленному повышению характеристик и качеству нового материала, однако приводящие к увеличению себестоимости и, как следствие, неконкурентоспособности продукции на мировом рынке.

Выводы

Недостаточность рекомендаций и широкий диапазон варьирования по сочетанию и процентному соотношению различных компонентов фрикционных металлокерамических материалов на основе железа и их влияние на показатели качества делают необходимым проведение исследований для конкретных условий работы материалов и деталей узлов. Поэтому исследования, связанные с повышением износостойкости ответственных деталей железнодорожного подвижного состава и определение качественных показателей фрикционного металлокерамического материала на основе железа работающего в условиях ударного трения, являются актуальными.

Обобщая и анализируя полученную информацию, можно сделать вывод о том, что для повышения износостойкости фрикционной пластины, необходимо выполнение следующих исследований:

1. Исследование состава и свойств фрикционных материалов
2. Исследование технологии получения детали
3. Исследование эксплуатационных характеристик

4. Разработка модели процесса работы узла с целью визуализации и конкретизации нагрузок, напряжений и деформаций в теле и контртеле узла.

Список литературы

1. *Беляев В.И., Ступин Д.А.* Сцепные и автосцепные устройства железнодорожного подвижного состава. – М.: Трансинфо, 2012. – 415 с.
2. Патент 2299257 Российская Федерация, МПК С 22 С 33/02. Металлокерамический фрикционный сплав / А.Г. Стриженок. – Брянск; заявл. 09.12.2005. – 5 с.
3. Методика испытания материалов на износостойкость / А.М. Марков, Д.А. Габец, А.В. Габец, В.Н. Некрасов, В.В. Каргин // Инновации в машиностроении – основа технического развития России. – Барнаул, 2014. – С. 253–258.
4. Вагоны: учебник для вузов железнодорожного транспорта / Л.А. Шадур, И.И. Челногов, Л.Н. Никольский, Е.Н. Никольский, В.Н. Котуранов, П.Г. Проскурнев, Г.А. Казанский, А.Л. Спиваковский, В.Ф. Девятков; под ред. Л.А. Шадура. – М.: Транспорт, 1980.
5. Патент 2131327 Российская Федерация. Инструмент для обработки деталей с напыленными металлопокрытиями / Е.Ю. Татаркин, А.А. Ситников, А.М. Марков, В.А. Федоров, В.В. Болгов. – Опул. 17.09.1997.

THE MAIN WARRANTS OF INCREASING THE DURABLE OF VITAL PARTS OF RAILWAY VEHICLES

Markov A. M.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: andmarkov@inbox.ru

Gabets A.V.², Ph.D. (Engineering), Development director

Gabets D. A.¹, Post-graduate student, e-mail: gabets22@mail.ru

Ivanov A. V.¹, Post-graduate student, e-mail: d.lenya.ne@yandex.ru

¹ I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

² Altai steel casting factory (ASCF), 116/52 Kalinina st., Barnaul, 656037, Russian Federation

Abstract

Development of railway vehicles means increasing of carriage traffic. This requires increased operational reliability of wagons units and details. The relatively low lifetime of individual nodes and components leads to material costs from demurrage and repair.

Reviewed detail absorbing device – a friction plate is specific. Friction plate operates in percussion friction. This mode has high requirements for surface hardness, frictional characteristics of the material.

As promising directions of the research can be distinguished hardening of the surface layer by coating alloying elements on that layer.

Technological processes of manufacture of the material indicate a high degree of their influence on the structure of the material. The main influence on operational properties of materials has the composition and percentage of components. The use of existing processes and recommendations complicated.

Therefore, the study associated with the composition and technology of obtaining sintered metal friction plate of the absorbing device, are relevant.

Keywords

Increasing the durable, absorbing device, friction plate, cermet, powder components, sintering technology

УДК 621.793.71

**СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ
Ni-Cr-Si-B, ДОПОЛНИТЕЛЬНО ЛЕГИРОВАННЫХ Nb**

*Е.Е. КОРНИЕНКО, канд. техн. наук, доцент
К.А. ГНИДАН, магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Корниенко Е.Е. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: kornienko_ee@mail.ru

Смесь порошков (98 мас. % порошка системы Ni-Cr-Si-B и 2 мас. % Nb) наносили на трубы из низкоуглеродистой стали при помощи воздушно-плазменного напыления. Полученные покрытия оплавляли в печи (температура нагрева – 1100 °С, время выдержки – 10 мин., охлаждение на воздухе). Методами оптической и растровой электронной микроскопии, а также микрорентгеноспектрального анализа показано, что в покрытиях до оплавления по границам частиц самофлюсующегося порошка равномерно распределены серые прослойки, которые представляют собой борид ниобия (NbB₂). Оплавленные покрытия характеризуются наличием дендритов твердого раствора γ -Ni, эвтектикой Ni-Ni₃B, карбидами ниобия NbC, боридами хрома CrB или CrB₂ и карбидам хрома Cr₇C₃ и Cr₂₃C₆. Установили, что NbC являются центрами кристаллизации, от которых в разном направлении растут тонкие ветви борида хрома. Установлено, что пластины борида хрома в легированных ниобием покрытиях дисперснее, чем в покрытиях без ниобия.

Ключевые слова: плазменное напыление, легирование, самофлюсующийся материал, Ni-Cr-Si-B.

Введение

Актуальной проблемой современного материаловедения является разработка новых материалов, обладающих комплексом высоких свойств. Известно, что сплавы системы Ni-Cr-Si-B характеризуются высокой твердостью и износостойкостью [1-8], а также коррозионной стойкостью [2-5, 8-11], что обуславливает их применение в таких отраслях промышленности, как машиностроение, авиастроение, нефтяная и угольная промышленность [3, 4, 12, 13].

Основными способами нанесения покрытий из самофлюсующихся сплавов являются технологии напыления (детонационное, газопламенное и плазменное [1, 6, 7, 9-11, 14-17]) и наплавки (лазерная и электродуговая [3, 13, 18, 19]). Высокие скорости охлаждения, свойственные этим способам, приводят к формированию значительных остаточных напряжений в покрытиях, что, в свою очередь, способствует снижению трещиностойкости [5]. Кроме того, в работе [20] показано, что трещины зарождаются и легко распространяются по грубым и хрупким включениям боридов и карбидов хрома (CrB, Cr₅B₃, Cr₇C₃), которые всегда присутствуют в покрытиях системы Ni-Cr-Si-B. К сожалению, решить проблему низкой трещиностойкости изменяя только технологические режимы, не удастся. Наиболее эффективным способом, в данном случае, является изменение структуры самофлюсующихся покрытий за счет легирования, что позволит снизить количество хрупких фаз.

На сегодняшний день выполнено значительное количество работ по легированию покрытий из самофлюсующихся сплавов, полученных лазерной наплавкой. В работах [15,

16] показано, что при легировании танталом формируется карбид тантала (TaC), который способствует уменьшению количества C в расплаве и карбид хрома (Cr_7C_3) не выделяется. Добавка оксида ванадия (V_2O_5) позволяет сформировать бориды ванадия (VB, VB_2 , V_2V_3 и V_3V_4), вместо хрупких боридов хрома (CrV_2 и CrB) [5]. Кроме того, образование боридов ванадия является основной причиной измельчения микроструктуры, что снижает восприимчивость к растрескиванию. В работе [17] показано, что измельчения частиц бориды хрома CrB можно достичь легированием до 10 вес. % Nb.

Целью данной работы является исследование структурных особенностей плазменных покрытий системы Ni-Cr-Si-V дополнительно легированных ниобием.

Методика проведения экспериментов

В качестве материала для нанесения покрытий использовали самофлюсующийся порошок на основе никеля (основа – Ni, 0,4 % C, 15 % Cr, 2 % Si, 2 % B, 3 % Fe), размерами 40...100 мкм и порошок ниобия (93,6 % Nb, 6,4 % Ta), размерами 5...40 мкм.

Смесь порошков (98 мас. % ПР-Н77Х15С3Р2 + 2 мас. % Nb) получали перемешиванием исходных компонентов в стальном стакане объёмом 250 мл в планетарной шаровой мельнице Fritsch Pulverisette 6. В качестве мелющих тел использовали стальные шары диаметром 10 мм. Соотношение масс шаров и порошковой смеси было равным 3:1. Режимы перемешивания: время измельчения – 30 мин., частота вращения опорного диска – 100 мин^{-1} .

Порошок указанного состава напыляли на трубы из низкоуглеродистой стали 20 с внутренним диаметром 25 мм и толщиной стенки 3 мм. Напыление покрытий проводили в Институте прикладной и теоретической механики СО РАН на установке плазменного напыления порошковых материалов «Термоплазма 50-01» с кольцевым вводом порошка. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа использовали воздух, в качестве защитного – смесь воздуха и пропан-бутана. Режимы напыления: сила тока – 140 А, напряжение – 265 В, дистанция напыления – 170 мм. Непосредственно перед напылением поверхность труб подвергали пескоструйной обработке.

Образцы с покрытиями оплавливали в лабораторных электрических печах камерного типа (СНОЛ-1,6.2,5.1/11-ИЗ). Режимы оплавления: температура нагрева – $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, выдержка – 10 мин., среда охлаждения – воздух. Для сравнения проводили оплавление образцов с покрытиями только из самофлюсующегося порошка на тех же режимах.

Для проведения металлографических исследований использовали оптический микроскоп Carl Zeiss AxioObserver A1m и растровый электронный микроскоп Carl Zeiss EVO 50 XVP с микроанализатором EDS X-Act. Образцами для структурных исследований выступали поперечные микрошлифы, запрессованные в полимерную матрицу и подготовленные по стандартной методике (шлифование абразивными бумагами и полирование суспензией, содержащей частицы оксида хрома). Для травления микроструктуры покрытий использовали раствор, состоящий из 10 мл HCl, 0.1 мл HNO_3 и 10 г $FeCl_3$. Микротвердость структурных составляющих в покрытиях оценивали на приборе Wolpert Group 402MVD при нагрузках 10 и 25 г.

Результаты исследований

В результате микроструктурных исследований было выявлено, что толщина полученных покрытий составляет 1200...1300 мкм. Ранее было показано, что материал самофлюсующихся плазменных покрытий характеризуется наличием слабо- и сильнодеформированных частиц порошка, а также оплавленных частиц, которые в процессе

напыления были нагреты до значений выше температуры плавления [21]. На рис. 1 приведено изображение покрытия системы Ni-Cr-Si-B, дополнительно легированного 2 % Nb. Видно, что по границам частиц самофлюсующегося порошка расположены светло- и темно-серые волнообразные прослойки шириной 0,5...2 мкм (рис. 1, а, отмечены стрелками). Более детальное изображение покрытия, полученное при помощи растровой электронной микроскопии, приведено на рис. 1, б. Согласно данным микрорентгеноспектрального анализа (табл. 1), можно предположить, что белые прослойки между частицами (рис. 1, б, участок 1) – это области, обогащенные танталом. Согласно анализу двойной диаграммы состояния Nb-B [22] - светло-серые области (рис. 1, б, участок 2) – борид ниобия (NbB₂). Химический состав участка 3 соответствует исходному химическому составу порошка. Средняя микротвердость полученных покрытий ~ 842 HV₂₅, что соответствует микротвердости самофлюсующихся покрытий без ниобия [23].

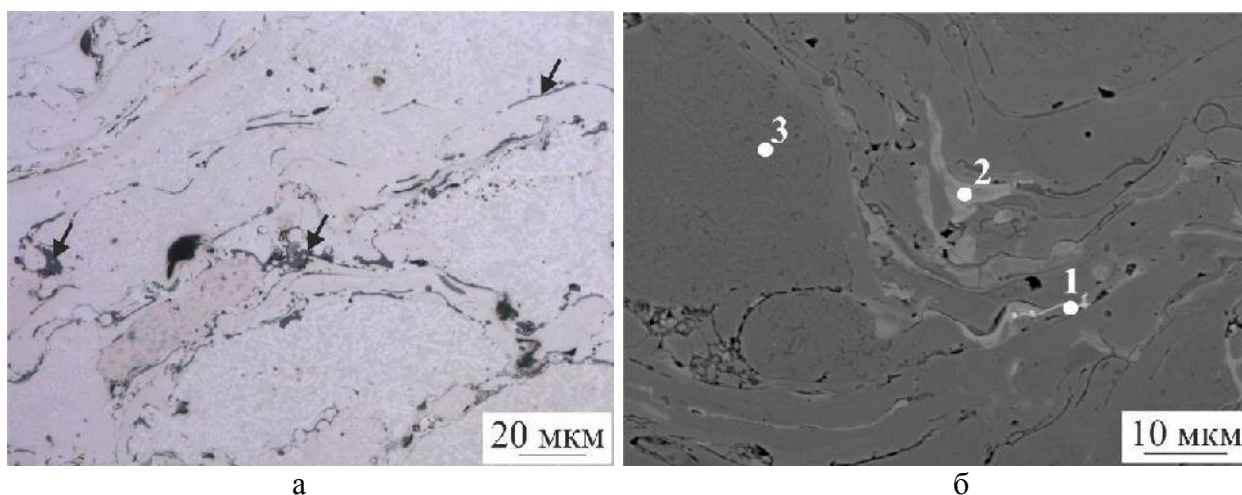


Рис. 1. Микроструктура самофлюсующегося покрытия, легированного 2 % Nb до оплавления: а – оптическая микроскопия; б – растровая электронная микроскопия.

Таблица 1

Результаты локального химического анализа

	Nb	Ta	Ni	Cr	Si	B	C	Fe
Участок 1 на рис. 1, б (вес. %)	-	66,95	28,15	4,9	-	-	-	-
Участок 2 на рис. 1, б (ат. %)	23,89	-	2,23	0,49	-	73,36	-	-
Участок 3 на рис. 1, б (вес. %)	-	-	77,48	16,86	3,49	-	-	-
Участок 1 на рис. 2, б (вес. %)	-	-	76,25	15,19	3,63	-	1,48	3,45
Участок 2 на рис. 2, б (ат. %)	-	-	47,07	3,71	-	39,5	8,03	1,69
Участок 4 на рис. 2, б (ат. %)	-	-	5,37	62,93	-	-	29,69	2,02
Участок 5 на рис. 2, в (ат. %)	37,82	-	1,8	3,69	0,61	-	55,98	0,1
Участок 6 на рис. 2, в (ат. %)	0,28	-	1,5	23,77	0,13	71,29	2,85	0,18

Изображение покрытия после оплавления представлено на рис. 2, а-в. Условно, покрытие можно разделить на 2 зоны: верхняя (рис. 2, а, А) – толщиной 1000...1500 мкм, средняя (рис. 2, а, В) – толщиной около 500 мкм и граница сплавления (рис. 2, а, С).

Фазовый состав верхней и средней зон одинаков. Для них характерно наличие дендритов, которые представляют собой твердый раствор Cr, Si и Fe в γ -Ni (рис. 2, б, участок 1). Междендритное пространство заполнено эвтектикой Ni-Ni₃B (рис. 2, б, участок 2). Участок 3 на рис. 2, б представляет собой тонкие пластины, растущие от центра. Более детальное изображение этого участка показано на рис. 2, в. Анализ данных, полученных при

помощи микрорентгеноспектрального анализа (табл. 1), позволяет предположить, что центром кристаллизации этих зон является карбид ниобия (NbC), от которого в разном направлении растут тонкие ветви боридов хрома (CrB или CrB₂). Карбид хрома (Cr₇C₃) (рис. 2, б, участок 4) выделяется в виде грубых включений свободной формы, тогда как карбид хрома Cr₂₃C₆ представляет собой шестигранные призмы. Значения микротвердости различных фаз приведены в таблице 2.

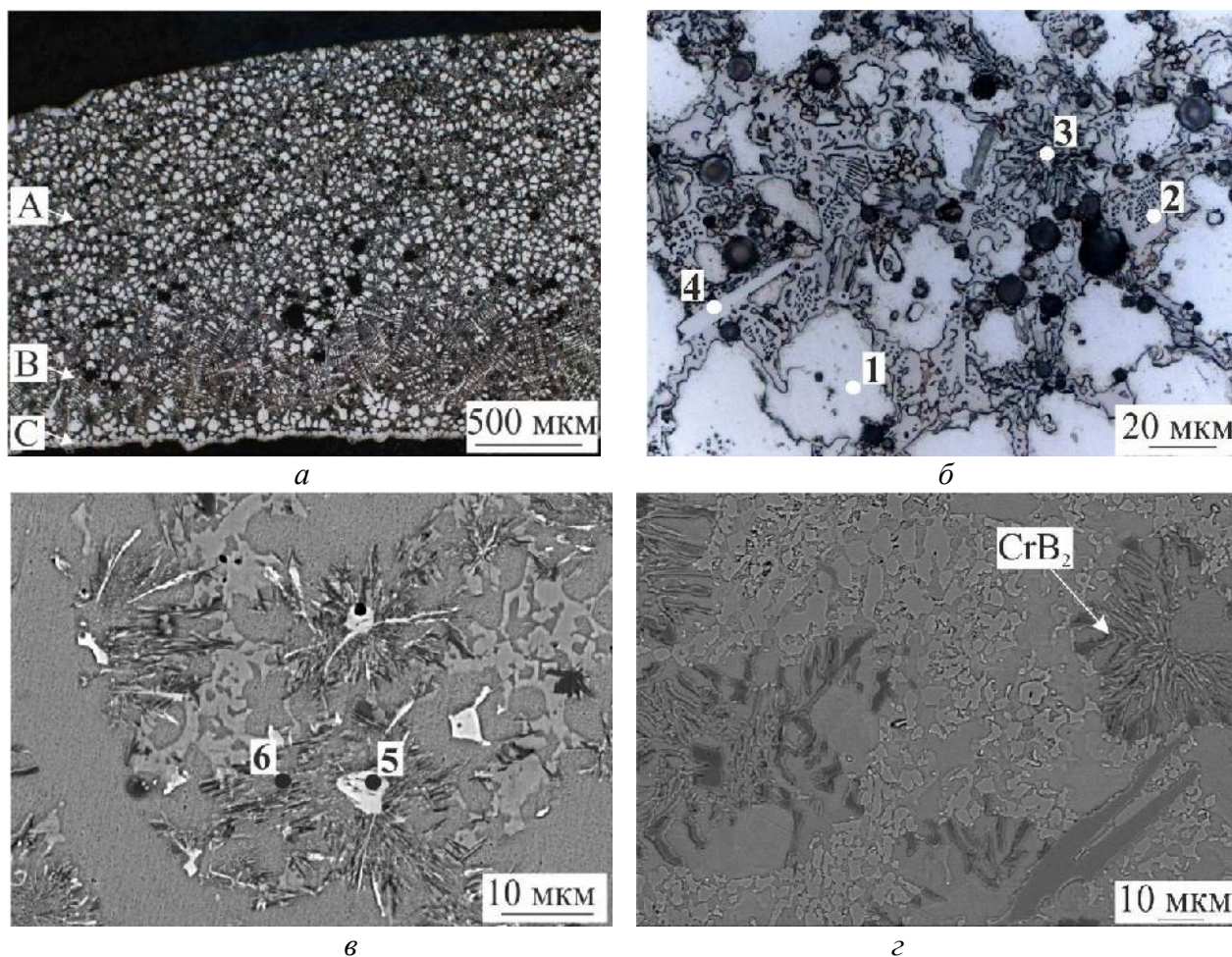


Рис. 2. Микроструктура легированного (а-в), и нелегированного (г) покрытий после оплавления: а – панорамное изображение, б – участок верхней зоны, в – участок средней зоны, а, б – оптическая микроскопия, в, г – растровая электронная микроскопия.

Таблица 2

Средние значения микротвердости покрытий и отдельных фаз.

Покрытие без оплавления	Покрытие после оплавления				
	Микротвердость , HV ₂₅	Ni + CrB/CrB ₂	Cr ₇ C ₃	γ-Ni	Эвтектика
Микротвердость, HV ₂₅		Микротвердость, HV ₁₀			
842	790	742	1086	257	806

Объемная доля и размеры выделяющихся фаз в верхней и средней зонах отличаются, поскольку отличаются условия их охлаждения. Жидкий металл, находящийся в средней зоне, кристаллизуется последним с наименьшей скоростью охлаждения. Такие условия являются наиболее благоприятными для выделения и роста высокотемпературных фаз: карбидов и боридов хрома и ниобия. Размеры частиц NbC в средней зоне больше, а объемная доля выше.

Оставшийся в расплаве углерод расходуется на образование карбидов хрома. Более низкие скорости охлаждения в средней зоне способствовали образованию крупных кристаллов Cr_7C_3 : их длина достигает 200 мкм, тогда как в верхней зоне не превышает 50 мкм. Объемная доля CrB/CrB_2 в средней зоне выше, а пластины – тоньше. Стоит отметить, что пластины борида хрома в легированных ниобием покрытиях дисперснее, чем в покрытиях без ниобия (рис. 2, г). Количество и размеры дендритов γ -твердого раствора Ni в средней зоне меньше, чем в верхней.

Вдоль границы сплавления γ -твердый раствор Ni образует сплошную полосу толщиной около 40...50 мкм. Микротвердость этой зоны ниже из-за перемешивания никеля с железом и диффузии атомов углерода и бора из покрытия в основной металл.

Выводы

1. На основании данных, полученных оптической и растровой электронной микроскопией, а также микрорентгеноспектрального анализа установлено, что в покрытиях до оплавления по границам частиц самофлюсующегося порошка равномерно распределены серые прослойки борида ниобия (NbB_2).

2. Показано, что после оплавления из-за разных условий охлаждения в покрытии образуется 2 зоны. Основными фазами этих зон являются дендриты твердого раствора γ -Ni, эвтектика Ni-Ni₃B, карбид ниобия NbC, борид хрома CrB или CrB_2 и карбиды хрома Cr_7C_3 и $Cr_{23}C_6$.

3. При помощи растровой электронной микроскопии было выявлено, что карбиды ниобия являются центрами кристаллизации, от которых в разном направлении растут тонкие пластины борида хрома. Объемная доля карбида ниобия и борида хрома в средней зоне выше. Установлено, что пластины борида хрома в легированных ниобием покрытиях дисперснее, чем в покрытиях без ниобия.

4. В результате измерения микротвердости было установлено, что микротвердость оплавленных покрытий несколько ниже, чем не оплавленных. Однако твердость покрытия в целом за счет формирования твердых фаз увеличивается.

Список литературы

1. Comparative examination of the microstructure and high temperature oxidation performance of NiCrBSi flame sprayed and pack cementation coatings / D. Chaliampalias, G. Vourlias, E. Pavlidou, S. Skolianos, K. Chrissafis, G. Stergioudis // *Applied Surface Science*. – 2009. – Vol. 255. – P. 3605–3612.
2. Hemmati I., Ocelik V., De Hosson J.Th.M. Effects of the alloy composition on phase constitution and properties of laser deposited Ni-Cr-B-Si coatings // *Physics Procedia*. – 2013. – Vol. 41. – P. 302–311.
3. Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni-Cr-Si-B alloy on AISI 304L stainless steel / C. Sudha, P. Shankar, R.V.S. Rao, R. Thirumurugesan, M. Vijayalakshmi, B. Raj // *Surface & Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202. – P. 2103–2112.
4. Zhanga Z., Wangb Z., Liang B. Wear characterization of thermal spray welded // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209. – P. 1368–1374.
5. Investigation on the microstructure and cracking susceptibility of laser-clad V2O5/NiCrBSiC alloy coatings / D. Wang, E. Liang, M. Chao, B. Yuan // *Surface & Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202. – P. 1371–1378.
6. Microstructural study of NiCrBSi coatings obtained by different processes / R. Gonzalez, M.A. Garcia, I. Penuelas, M. Cadenas, Ma. del Rocio Fernandez, A. Hernandez Battez, D. Felgueroso // *Wear*. – 2007. – Vol. 263. – P. 619–624.

7. Rolling contact fatigue mechanism of a plasma-sprayed and laser-remelted Ni alloy coating / X.C. Zhang, B.S. Xu, S.T. Tu, F.Z. Xuan, Y.K. Zhang, H.D. Wang, Y.X. Wu // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2009. – Vol. 32. – P. 84–96.
8. Effect of the scanning speed on microstructural evolution and wear behaviors of laser cladding NiCrBSi composite coatings / J.L. Chen, J. Li, R. Song, L.L. Bai, J.Z. Shao, C.C. Qu // *Optics & Laser Technology*. – 2015. – Vol. 72. – P. 86–99.
9. Corrosion mechanism of NiCrBSi coatings deposited by HVOF / W. Zhao, Y. Wang, L. Dong, K. Wu, J. Xue // *Surface & Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 190. – P. 293–298.
10. Lee C.H., Min K.O. Effects of heat treatment on the microstructure and properties of HVOF-sprayed Ni-Cr-W-Mo-B alloy coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – Vol. 132. – P. 49–57.
11. Zeng Z., Kuroda S., Era H. Comparison of oxidation behavior of Ni-20Cr alloy and Ni-base self-fluxing alloy during air plasma spraying // *Surface & Coatings Technology*. – 2009. – Vol. 204. – P. 69–77.
12. A study on microstructure and flame erosion mechanism of a graded Ni–Cr–B–Si coating prepared by laser cladding / H. Xuan, Q. Wang, S. Bai, Z. Liu, H. Sun, P. Yan // *Surface & Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 244. – P. 203–209.
13. Microstructure and wear properties of nickel-based surfacing deposited by plasma transferred arc welding / C. Guoqing, F. Xuesong, W. Yanhui, Z. Wenlong // *Surface & Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 228. – P. 276–282.
14. An investigation of the mechanical properties and wear resistance of NiCrBSi coatings carried out by in situ laser remelting / N. Serres, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade, F. Machi // *Wear*. – 2011. – Vol. 270. – P. 640–649.
15. Xiang H., Xu Y.D., Zhang L.T. Synthesis and microstructure of tantalum carbide and carbon composite by liquid precursor route // *Scripta Materialia*. – 2006. – Vol. 55. – P. 339–342.
16. Microstructure and wear behavior of laser clad NiCrBSi+Ta composite coating / M.J. Chao, W.L. Wang, E.J. Liang, D.X. Ouyang // *Surface & Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202. – P. 1918–1922.
17. Hemmati I., Ocelik V., De Hosson J.Th.M. Advances in laser surface engineering: tackling the cracking problem in laser-deposited Ni-Cr-B-Si-C alloys // *JOM*. – 2013. – Vol. 65 (6). – P. 741–748.
18. Effect of Ni-to-Fe ratio on structure and properties of Ni–Fe–B–Si–Nb coatings fabricated by laser processing / R. Li, Z. Li, J. Huang, P. Zhanga, Y. Zhua // *Applied Surface Science*. – 2011. – Vol. 257. – P. 3554–3557.
19. Effects of Co on the cracking susceptibility and the microstructure of Fe-Cr-Ni laser-clad layer / S. Wulina, J. Echigoya, Z. Beidi, X. Changsheng, C. Kun // *Surface and Coatings Technology*. – 2001. – Vol. 138. – P. 291–295.
20. Hemmati I., Ocelik V., De Hosson J.Th.M. Effects of the alloy composition on phase constitution and properties of laser deposited Ni-Cr-B-Si coatings // *Physics Procedia*. – 2013. – Vol. 41. – P. 302–311.
21. Air plasma sprayed coatings of self-fluxing powder materials / E.E. Kornienko, E.J. Lapushkina, V.I. Kuzmin, S.P. Vaschenko, I.P. Gulyaev, E.V. Kartaev, D.S. Sergachev, N. Kashapov, S. Sharifullin, I. Fayrushin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2014. – Vol. 567. – P. 012010.
22. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. В 3 т. Т. 1 / под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 996 с.
23. The effect of heat temperature on the structure of plasma coating of the Ni-Cr-Si-B system / E. Kornienko, A. Nikulina, E. Drobyaz, N. Plotnikova, E. Lapushkina, V. Kuz'min // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 788. – P. 252–258.

**STRUCTURAL FEATURES OF PLASMA COATINGS OF Ni-Cr-Si-B SYSTEM
ALLOYED Nb**

Kornienko E.E., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kornienko_ee@mail.ru
Gnidan K.A., Graduate student, e-mail: g.k.a@inbox.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The powders mixture (98 wt. % Ni-Cr-Si-B, 2 wt. % Nb) was coated onto steel tube (0.2 % C) with help air-plasma spraying. The obtained coatings were melted in furnace (heating temperature – 1100 °C, holding time - 10 min, cooling - air). The coatings research was carried out using optical microscopy, scanning electron microscopy and EDS analysis. In the coating before heating the gray interlayers of niobium boride (NbB₂) were uniformly distributed on the powder self-fluxing particles boundaries. The melted coatings are characterized by the presence of γ -Ni solid solution dendritic, eutectic of Ni-Ni₃B, niobium carbide (NbC), chromium borides (CrB or CrB₂) and chromium carbides (Cr₇C₃ and Cr₂₃C₆). It was established, that NbC are crystallization centers, from which plates of chromium boride grow in different directions. It was showed that in the coatings alloyed niobium chromium boride plates finer than plates in coatings without Nb.

Keywords

plasma spraying; alloying, self-fluxing material, Ni-Cr-Si-B

УДК 538.9

СКЛАДЧАТЫЕ СТРУКТУРЫ В $[\bar{1}11]$ - МОНОКРИСТАЛЛАХ НИКЕЛЯ*

Е.А. АЛФЁРОВА¹, канд. физ.-мат. наук, доцент
Д.В. ЛЫЧАГИН^{1,2} доктор физ.-мат. наук, профессор
Д.В. СОПРУНОВ¹, магистрант
(¹НИ ТПУ г. Томск,
²НИ ТГУ, г. Томск)

Е.А. Алфёрова - 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
e-mail: katerina525@mail.ru

Работа посвящена изучению особенностей складкообразования в $[\bar{1}11]$ -монокристаллах никеля в зависимости от кристаллогеометрических условий протекания деформации и схемы напряженного состояния. Обнаружено, что наиболее интенсивно складкообразование идет в местах наибольшей кривизны кристалла (области вогнутости и выпуклости) и морфология складок в разных зонах отличается. При этом показано, что октаэдрическое скольжение является неотъемлемой частью формирования складок с начальных степеней деформации. На основании анализа параметров складчатых структур, сформированных в различных зонах, определена, различная роль складчатых структур в зоне сжатия и растяжения. Складкообразование в зоне сжатия служит механизмом поверхностного и приповерхностного формоизменения в условиях уменьшения площади поверхности. Периодическое изменение рельефа в зоне растяжения обусловлено особенностями объемной организации деформации в монокристаллах исследуемой ориентации.

Ключевые слова: ГЦК-монокристалл, складкообразование, неоднородность пластической деформации, организация деформации, сдвиг

Введение

Картина деформационного рельефа, возникающая на поверхности деформированных металлических материалов, давно используется для оценки деформационных процессов протекающих в материале. Одним из наиболее интересных является вопрос формирования складок на поверхности. Известно, что процесс складкообразования и гофрирования имеет место при различных физических и технологических процессах и может играть как положительную, так и отрицательную роль. Например, гофрирование металлов (в том числе листовых материалов) и формирование складок это один из наиболее распространенных дефектов при обработке материалов давлением (штамповке, гибке, вытяжке и т.д.) на производстве [1]. Этой проблеме посвящен ряд работ В.В. Губернаторова с коллегами [2-5]. В этих работах немаловажная роль уделяется искажению слоев материала, что и способствует формированию гофра [5]. В работах академика В.Е. Панина с коллегами поверхностный слой рассматривается как самостоятельный структурный уровень, а процесс складкообразования анализируется с точки зрения физической мезомеханики [6-7]. В зарубежной литературе, например, [8] процесс формирования складок моделируется при штамповке листового материала. Работа нацелена на прогнозирование складкообразования в

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60007 мол_а_дк.

зависимости от технологических и конструктивных параметров системы. Работа [9] посвящена моделированию процесса складкообразования перед движущимся клином при выглаживании поверхности. Результаты математического моделирования процесса показали, что наибольшая величина деформации отмечается за клином, а в области складкообразования значимого увеличения величины деформации нет.

Поведение реальных металлических материалов под нагрузкой является сложным процессом, который протекает во взаимосвязанной многоуровневой системе и зависит от ряда внешних и внутренних факторов. Проведение экспериментов на монокристаллических объектах позволяет проанализировать влияние кристаллографической ориентации на неоднородность деформации и складкообразование, исключив влияние ориентации зерен и их границ на протекание деформации. Предыдущие исследования авторов показали, что складкообразование наиболее ярко проявляется в ГЦК монокристаллах с осью сжатия $[\bar{1}11]$ [10].

Настоящая работа направлена на изучение морфологии складчатых структур и выявлении их роли при пластической деформации $[\bar{1}11]$ -монокристаллов никеля.

Материал и методика

Экспериментальные исследования проводили на монокристаллах никеля с ориентацией оси сжатия $[\bar{1}11]$ и боковыми гранями (110) и $(1\bar{1}2)$. Деформирование сжатием проводили со скоростью $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ при комнатной температуре. Картину деформационного рельефа и его параметры получила с использованием оптической, конфокальной микроскопии. Данные по количественной оценке деформации получены методом делительных сеток. Более подробно методика изложена в [11].

Экспериментальные результаты и обсуждение

Картина деформационного рельефа $[\bar{1}11]$ -монокристаллов никеля представлена следами сдвига, макрополосами и складками. Наиболее интенсивно и с меньшей степенью деформации формирование складок осуществляется на боковой грани $(1\bar{1}2)$.

Исходная форма образца это тетрагональная призма. Согласно схеме распределения напряжений предложенной С.И. Губкиным [12] в центральной части образца действует схема всестороннего сжатия, а в приторцевых областях схема растяжения-сжатия (за счет приторцевого трения). После деформации кристалла сжатием он претерпел существенное формоизменение, что повлекло за собой и смену схемы напряженного состояния. На рис. 1 показан профиль сечения поверхности грани $(1\bar{1}2)$. На исследуемой боковой поверхности формируются зоны вогнутости – I и, в меньшей степени, III и зона выпуклости – II. При этом в зонах I, III преобладающим становятся напряжения сжатия, а в зоне II – напряжения растяжения. В обоих случаях можно наблюдать складки, но их морфология отличается (рис. 1, б-в). Отметим здесь, что подобный характер формоизменения кристалла с формированием зон I-III отмечался с начальными степенями деформации.

Аналогичное формоизменение с формированием складок наблюдается при штамповке, где также формируются места выпуклости и вогнутости металла, создающие области поверхностного растяжения и сжатия.

Рассмотрим морфологию складок, формирующихся в разных зонах. Отметим, что при анализе экспериментальных данных по эволюции складчатых структур было выявлено, что в области вогнутости складки развиваются с более ранних степеней деформации и всегда более интенсивно, чем в область выпуклости кристалла.

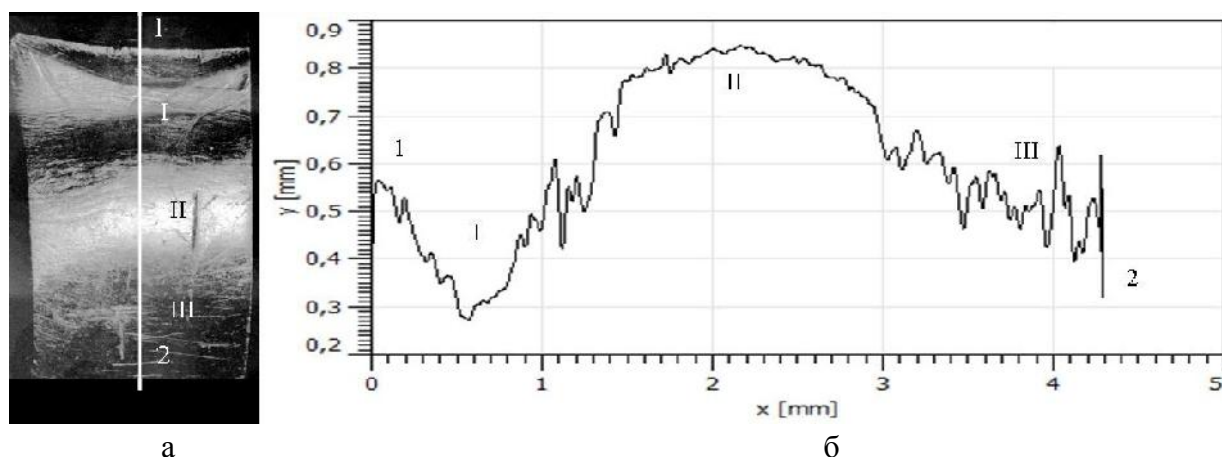


Рис. 1. $[\bar{1}11]$ -монокристалл никеля, боковая грань $(1\bar{1}2)$ с указанием секущей 1-2 (а), профиль поверхности вдоль секущей 1-2 (б), $\epsilon = 31\%$

На рис. 2 показан участок поверхности из зоны I (см. рис.1) и профили вдоль секущих при величине деформации 31%.

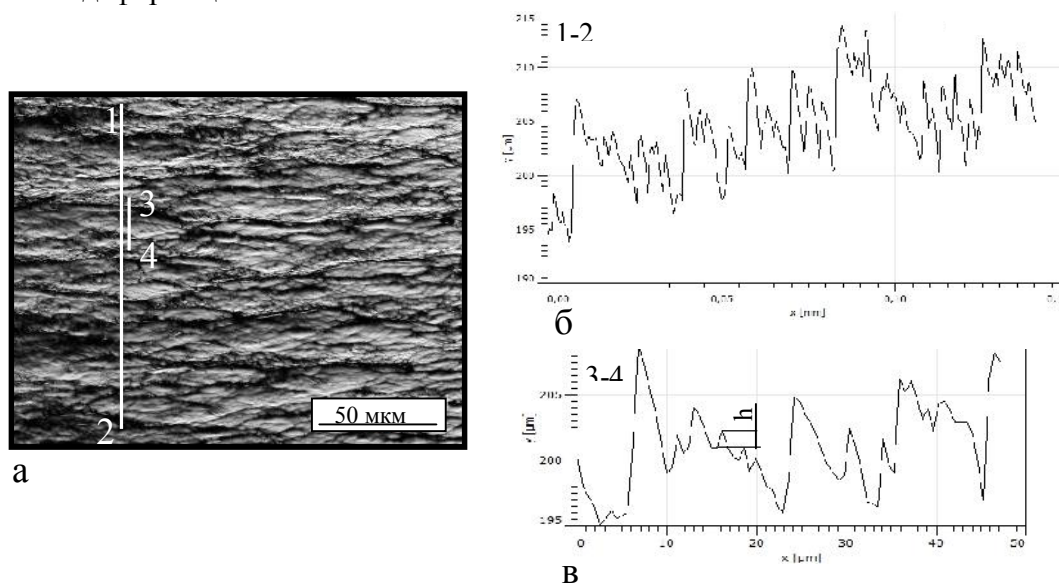


Рис. 2. Картина деформационного рельефа в зоне I (а) с указанием секущих, профили поверхности вдоль секущих (б, в), $[\bar{1}11]$ -монокристалл никеля, боковая грань $(1\bar{1}2)$, $\epsilon = 31\%$

В данном случае можно наблюдать измельченную складчатую структуру, при этом складки расположены очень плотно. Такой морфологии способствуют геометрические условия их формирования – зона сильного изгиба образца. Профиль поверхности в сечении имеет квазипериодический характер. При более детальном рассмотрении профиля можно выделить отдельные ступени сдвига (h на рис. 2, б), которые вероятнее всего сформированы отдельными микроступенями от выхода октаэдрических плоскостей на поверхность. Однако возможности применяемого метода не позволяют их разрешить. При оценке характеристик поверхности посредством параметров шероховатости были получены следующие значения $Ra = 1,6 \dots 2,5$ мкм, $Rz = 12,5 \dots 16$ мкм.

На рис. 3 приведены соответствующие результаты для зоны II. В данном случае можно наблюдать, что складки расположены очень редко, они имеют другую морфологию и представляют собой чередование областей выпуклости шириной порядка $40 \dots 70$ мкм и впадин шириной порядка $20 \dots 30$ мкм, при этом также можно различить отдельные ступени

сдвига. Параметры шероховатости поверхности в рассматриваемой области составляют $Ra=0,08...0,25$ мкм и $Rz=2...4$ мкм.

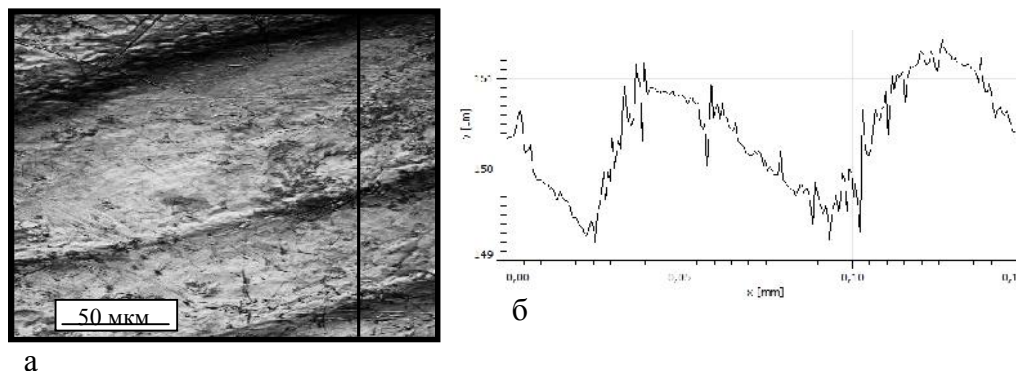


Рис. 3. Картина деформационного рельефа в зоне II (а) и профиль поверхности вдоль секущих (б), $[\bar{1}\bar{1}1]$ -монокристалл никеля, боковая грань $(1\bar{1}2)$, $\epsilon=31\%$

Детальное рассмотрение профиля складок показало, что октаэдрическое скольжение является неотъемлемой частью формирования складок. На профили поверхности всегда наблюдаются ступени сдвига. Для дальнейшего изучения морфологии складчатых структур был проанализирован параметр L_0 – длина растянутого профиля (длина, получающаяся, при растяжении всех выступов и впадин профиля в пределах базовой длины в прямую линию.). Измерения в обоих случаях проводились на отрезках длиной 150 мкм. Результаты показали, что в первом случае длина растянутого профиля составляет порядка 400...560 мкм, а во втором – 160...180 мкм, т.е. значения параметров L_0 отличаются в 2,5...3 раза. Анализ результатов показывает, что в зоне I поверхность более гофрированная, чем в зоне II. По всей вероятности, Это связано с различными условиями протекания деформации в зоне I и II. Значительное уменьшение площади боковой грани в зоне вогнутости I компенсируется интенсивным складкообразованием. Образование периодического рельефа в зоне выпуклости соответствует выходу макрополос деформации на исследуемую грань монокристалла. Закономерности формирования макрополос рассмотрены авторами в работе [10]. Способность складчатой структуры компенсировать приповерхностную неоднородность деформации подтверждается количественными данными. Величина компонент локальной деформации в данной области деформации следующая. При общей деформации образца 8%, средние значения компонент локальной деформации в области формирования складок (область вогнутости) составляют по компонентам X -2%, Y 9%, Z -7%, интенсивность деформации $\Gamma = 26\%$. В то время, в местах наибольшей локализации деформации достигает величин по компонентам X -45...5%, Y -20...25%, Z -55...35%. Кроме того, на боковой грани мы можем наблюдать чередование локальных областей сжатия и растяжения. Такие места с высокими значениями деформации возникают в области стыка различных элементов рельефа (складки и макрополосы, складки и системы следов сдвига, две системы макрополос и т.д.) или приторцевые зоны. В этих местах для обеспечения сохранения сплошности кристалла необходим дополнительный способ компенсации неоднородности деформации. Одним из таких способов и является процесс складкообразования. Более подробно вопрос влияния элементов рельефа в $[\bar{1}\bar{1}1]$ -монокристаллах никеля на неоднородность деформации обсуждался авторами, например, в работах [10, 11]. В работе [9], при моделировании процесса складкообразования, также были получены результаты, свидетельствующие о том, что в области складкообразования локализация деформации отсутствует.

Выводы

Резюмируя выше изложенное можно сказать, что важным аспектом при рассмотрении процесса складкообразования является симметричность ориентации направлений сдвига относительно приложенной нагрузки и свободных поверхностей. Несимметричность ориентации систем сдвига и отсутствие свободного выхода на боковые грани приводит к искривлению образца с формированием областей выпуклости и выгнутости. Это, в свою очередь, является одной из ключевых причин приводящей к складкообразованию. При этом в областях вогнутости, где реализуется схема сложного всестороннего сжатия, складкообразование протекает более интенсивно, с формированием более плотной складчатой структуры. Области складкообразования не являются местами локализации деформации, в случае если там не действуют дополнительные факторы способные увеличить локализацию. Следовательно, можно говорить о том, что складки являются итогом процесса приспособления кристалла к условиям пластической деформации протекающей внутри образца и являются дополнительным способом снижения приповерхностных напряжений и механизмом изменения формы поверхности. Последний вариант особенно актуален для мест вогнутости поверхности, где происходит значительное уменьшение ее площади. Формирование складчатого рельефа способно компенсировать поверхностные изменения. При этом образование складок осуществляется путем локальной активизации систем скольжения и развитием приповерхностных переориентаций [13].

В заключении авторы выражают благодарность к.т.н., м.н.с. ИФПМ СО РАН А.В. Филиппову за помощь в получении экспериментальных результатов.

Список литературы

1. *Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю.* Технология холодной штамповки. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
2. Явление гофрирования и формирования структуры и текстуры в металлических материалах при деформации и рекристаллизации: 2. Сплавы кубической сингонии / В.В. Губернаторов, Т.С. Сычева, Л.Р. Владимиров и др. // Физическая мезомеханика. – 2002. – № 5. – Т. 6. – С. 95–99.
3. Явление гофрирования и формирования структуры и текстуры в металлических материалах при деформации и рекристаллизации: 1. Геометрическая модель пластического течения структурно-однородных сред при прокатке / В.В. Губернаторов, Т.С. Сычева, Л.Р. Владимиров и др. // Физическая мезомеханика. – 2001. – № 4. – Т. 5. – С. 97–101.
4. О формировании полосовых структур в структурно-однородных материалах при деформации / В.В. Губернаторов, Б.К. Соколов, И.В. Гервасьева, Л.Р. Владимиров // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2. – № 1/2. – С. 157–162.
5. Новые аспекты течения металла в очаге деформации / В.В. Губернаторов, Б.К. Соколов, Л.Р. Владимиров, А.К. Сбитнев, И.В. Гервасьева // Доклады АН. – 1999. – Т. 364. – № 4. – С. 468–470.
6. *Panin V.E., Panin A.V.* Effect of the surface layer in a solid under deformation // Physical Mesomechanics. – 2005. – Vol. 8, N 5–6. – P. 7–15.
7. Formation of mesoscale folded structures on the surface of EK-181 steel polycrystals under uniaxial tension / A.V. Panin et. al. // Physical Mesomechanics. – 2011. – Vol. 14, N 4. – P. 57–68.
8. *Hamdan M.N., Al-Qaisia A.A., Abdallah S.* Parametric study of dynamic wrinkling in a thin sheet on elastic foundation // International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application. – 2012. – Vol. 1. – P. 55–66.

9. *Narayan K. Sundaram, Yang Guo, Srinivasan Chandrasekar.* Mesoscale folding, instability, and disruption of laminar flow in metal surfaces // *Physical Review Letters, PRL.* – 2012. – Vol. 109 (10). – P. 106001.

10. *Лычагин Д.В., Алферова Е.А., Старенченко В.А.* Влияние кристаллогеометрической установки на развитие макрополос и неоднородность деформации в $[\bar{1}11]$ -монокристаллах никеля // *Физическая мезомеханика.* – 2010. – Т. 13, № 3. – С. 75–88.

11. Выявление мест локализации в монокристаллах никеля при сжатии / *Д.В. Лычагин, Е.А. Алферова, В.А. Старенченко, А.Д. Лычагин, А.В. Чумаевский* // *Физическая мезомеханика.* – 2014. – Т. 17, № 5. – С. 85–97.

12. *Губкин С.И.* Теория обработки металлов давлением. – М.: Металлургиздат, 1947. – 532 с.

13. *Alfyorova E.A., Lychagin D.V., Popov A.A.* Patterns of folded structure formation in the maximum bending zone of $[111]$ FCC single crystals // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2015. – Vol. 91. – P. 012024.

THE FOLDING STRUCTURE IN $[\bar{1}11]$ -NICKEL SINGLE CRYSTAL

Alfyorova E.A.¹, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, e-mail: katerina525@mail.ru
Lychagin D.V.^{1,2}, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: dvl-tomsk@mail.ru
Soprunov D.V.¹ Graduate students, e-mail: boss.soprunov@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

² National Research Tomsk State University, 36 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Abstract

This article examines the characteristics of folding in $[\bar{1}11]$ -nickel single crystal. The aim of the study is establishment of the regularities of folding and its role in plastic deformation. We explore how the folding depends on the crystallography, geometry of crystal and scheme of the state of stress. We applied a set of modern methods. There is optical and confocal microscopy for determine the morphology and the parameters of the relief.

We found that the most intensive folding goes to places of greatest curvature of the crystal (the area of concave and convex). The morphology of folds in various zones is different. Octahedral slip is an integral part of the formation of folds with the initial deformation.

We analyzed the morphological parameters of the folded structures in different zones and suppose that more dense folds can relax higher stresses.

The article presents experimental data on the magnitude of inhomogeneous deformation in the folds. They confirm that the folded structures lower the heterogeneity of deformation.

Therefore, the folds are additional way organization deformation in the crystal along with octahedral slip.

The experimental results presented in this paper can be considered as model in the study of metal forming processes.

Keywords

Fcc-single crystal, folding, heterogeneity of plastic deformation, organization of deformation, shift

Funding

The reported study was funded by RFBR, according to the research project No. 16-32-60007 mol_a_dk

УДК 539.3

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА В АМОРФНЫХ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ***

*А.В. ЯКОВЛЕВ, канд. физ.-мат. наук, доцент
Т.Н. ПЛУЖНИКОВА, канд. физ.-мат. наук, доцент
В.А. ФЕДОРОВ, доктор физ.-мат. наук, профессор
А.Д. БЕРЕЗНЕР, аспирант
Д.Ю. ФЕДОТОВ, ассистент
(ТГУ им. Г.Р. Державина, г. Тамбов)*

Яковлев А.В. – 392000, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33,
Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,
e-mail: DAK-83@mail.ru

В работе исследована эволюция полос сдвига в аморфных металлических сплавах при локальном механическом воздействии. Установлены закономерности деформационного рельефа, формируемого на поверхности металлических стекол. Определена максимальная скорость роста полосы сдвига. Установлен характер изменения рельефа в зависимости от состава. Показано изменение деформационного рельефа в зависимости от вида внешнего воздействия.

Ключевые слова: пластичность, отжиг, аморфный металлический сплав, структурная релаксация, нанокристаллы, агрессивная среда.

Введение

Аморфные металлические сплавы (АМС) или металлические стекла (МС) являются перспективными материалами для современных отраслей науки и техники. МС на протяжении последних десятилетий являются предметом пристального внимания исследователей благодаря набору уникальных свойств. Одними из важных качеств АМС являются высокие твердость и прочность, значения которых в данных материалах практически близки в теоретическим. В частности, объемные АМС, изготовленные из чугуна с добавками от 0,2 до 2,0 % (масс.) бора имеют значения модуля Юнга $122 \div 132$, предел прочности $3400 \div 3680$ и твердость $H_V 950 \div 110$ ГПа, и эти свойства еще несколько повышаются после отжига [1]. Изменение магнитных свойств этих материалов возможно путем варьирования химического состава. МС являются принципиально новыми материалами. В них отсутствуют макроскопические дефекты, присущие сплавам, охлаждаемым с обычными скоростями, такие, как ликвация, сегрегации, включения и другие неоднородности. В связи с чем развитие коррозионных процессов, происходящее, как правило, на неоднородностях структуры, в МС затруднено.

В настоящее время известны аморфные состояния для многих металлических систем [2]. Под действием различного рода внешних факторов таких как облучение, механические и/или термические воздействия, химическая обработка в МС осуществляется переход от метастабильного равновесия к новому, более равновесному состоянию, сопровождающийся изменением совокупности свойств МС, в частности, существенным снижением макроскопической пластичности [3]. Поэтому одной из значимых проблем при исследовании

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-31-00432).

неупорядоченных сред остается проблема контроля изменений их физических и механических характеристик.

В рамках указанных проблем, комплексное исследование закономерностей эволюции полос сдвига в МС, подвергнутых воздействию внешних факторов является актуальным направлением прикладных и фундаментальных исследований.

Цель работы: исследование закономерностей формирования деформационного рельефа аморфных сплавов при локальном механическом воздействии.

Материалы и методы экспериментального исследования

Исследования проводили на ленточных МС, находящихся в исходном состоянии. Использовали ленточные аморфные сплавы на основе Со, полученные методом спиннингования. Толщина лент 20 мкм. Исследования проводили на образцах с размерами 3,5×90 мм. Индентирование МС проводили на микротвердомере ПМТ-3. Индентирование ленточных МС осуществляли со стороны бесконтактной поверхности ленты в специальном устройстве [4]. При воздействии индентора возникает упругий прогиб ленты. Перед индентированием часть образцов отжигали в печи при разных температурах и выдержке 20 мин [5], а часть выдерживали в 20 % растворе азотной кислоты в течение 1, 10, 12 и 20 минут.

Результаты и их обсуждение

В результате воздействия механической нагрузки на поверхность ленточных МС образуется зона деформирования. Разработанная методика позволяет наблюдать деформацию на поверхности противоположной поверхности деформирования. Изучение противоположной индентированию поверхности МС показало, что наблюдается ступенчатая деформационная структура. В центре области индентирования создается максимальное деформирование, проявляющейся в виде полос сдвига, радиально расходящихся от отпечатка рис. 1. Высота полос достигает 0,3-0,5 мкм. В зоне отпечатка деформационные полосы пересекаются, ветвятся. Наблюдали как правоступенчатый, так и левоступенчатый относительно направления роста полосы деформационный рельеф. Максимальная высота ступеней наблюдается в области наибольшей деформации и равномерно спадает до нуля по мере удаления от области индентирования. Деформация локализована в полосах сдвига. Таким образом, установлено, что полосы сдвига, возникающие на поверхности МС при микроиндентировании имеют характерные особенности, отличающие их от полос сдвига, образующихся при сжатии, растяжении, разрушении и прокатке, в частности расположение полос и их геометрические параметры.

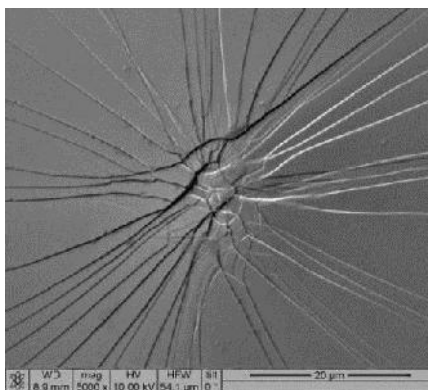


Рис. 1. Деформационный рельеф поверхности на стороне противоположной воздействию индентора в сплаве АМАГ – 180 (80% Со)

В ходе экспериментов было установлено, что рельеф, описанный выше формируется не мгновенно, а в течение некоторого промежутка времени. Динамика роста полос сдвига показана на рис. 2. Скорость роста полос сдвига достигала 0,2 мм/с. Скорость нарастания количества полос составляет в среднем ~ 50 полос/с.

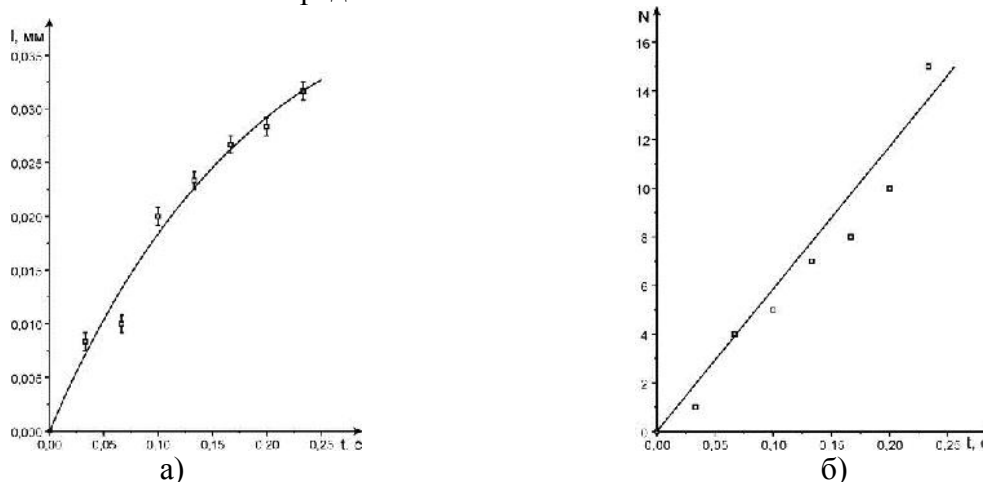


Рис. 2. Характеристики формирования рельефа при микроиндентировании: а) скорость роста длины полосы, б) скорость увеличения количества полос

С целью выявления влияния состава на характер деформации аморфных сплавов далее было проведено исследование полос сдвига на сплавах с различным содержанием кобальта. Была построена зависимость количества полос от содержания кобальта (рис. 3). Видно, что наблюдается тенденция к снижению количества полос с увеличением концентрации кобальта, что говорит о снижении способности сплавов к пластическому течению. Это может быть связано с количественным соотношением составляющих исследованных сплавов, а именно с увеличением содержания основы (Co) уменьшается количество пластифицирующих элементов (Ni, Mn), что приводит к снижению пластичности.

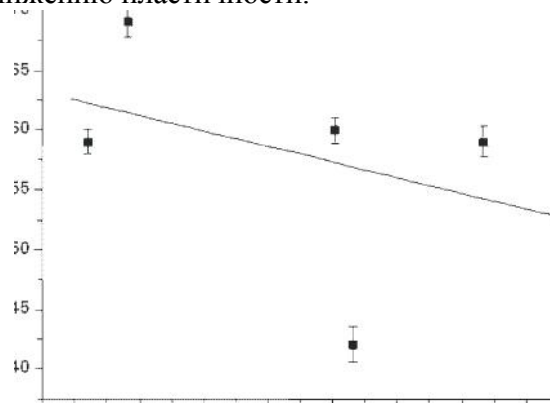


Рис. 3. Зависимость количества полос от содержания кобальта

Таким образом установлено, что деформационный рельеф, формируемый на поверхности металлических стекол, зависит от состава исследуемых сплавов.

Далее было исследовано влияние внешних факторов на деформационный рельеф. В результате комбинированного воздействия индентора и нагрева, индентора и кислоты на поверхности образцов образуется различного рода деформационный рельеф. Качественно деформационные рельефы аналогичны рельефам, формируемым в образце находящемся в исходном состоянии, но имеют особенности, связанные с изменением структурного состояния, инициируемого внешними воздействиями. На отожженных образцах пластическое течение имеет преимущественное направление, что обусловлено

неоднородностью МС и наведенным структурным состоянием. МС находятся в метастабильном состоянии, в них происходят процессы структурной релаксации (СР), приводящие к атомным перестройкам. В нашем эксперименте в образцах МС происходят конкурирующие процессы СР и начинающейся кристаллизации. Вместе они приводят к изменению структурного состояния, чем и обусловлены особенности деформационного рельефа поверхности отожженных образцов. Рельеф, формируемый на поверхности образцов подверженных влиянию кислоты и нагрузки также имеет отличия. На поверхности образцов наблюдается сетчатая структура, на некоторых выделяется преимущественное направление пластического течения. На всех образцах наблюдается питинговая коррозия, которая также влияет на пластическое течение. В частности, наблюдается увеличение длины полос сдвига при переходе через очаг питинговой коррозии.

С целью количественной оценки внешних влияний на морфологию рельефа для сплава с содержанием кобальта ~ 80 % были построены зависимости длины и количества полос сдвига от температуры (рис. 4). Видно, что повышение температуры не приводит к изменению картины деформационного рельефа. Число полос сдвига остается практически постоянным, это связано с тем, что величина прогиба поверхности при деформировании индентором определяется величиной приложенной нагрузки и не зависит от температуры. Длина полос уменьшается незначительно не более чем на 20 % и может быть связана с процессами структурной релаксации, локализующихся на границах полос сдвига и процессами топологического упорядочивания.

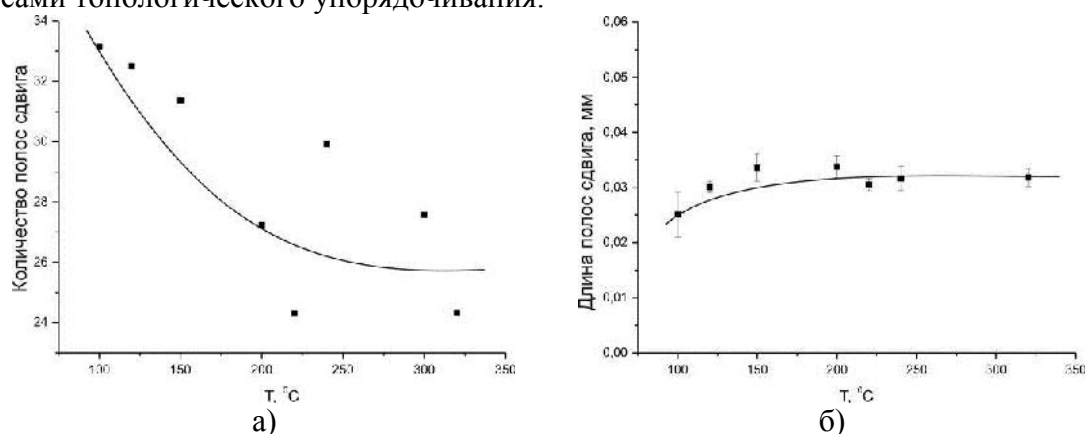


Рис. 4. Зависимости изменения количества полос сдвига – а), длины полос сдвига – б) от температуры для сплава марки АМАГ – 180 (80% Со)

Таким образом, характер деформационного рельефа, формируемого при локальном воздействии на образцах МС, подверженных дополнительному влиянию отжига и кислот отличается от рельефа, формируемого на образце в исходном состоянии, что обусловлено изменением структурного состояния, инициируемого этими воздействиями.

Выводы

В работе установлены закономерности формирования деформационного рельефа при локальном деформировании, заключающиеся в образовании деформационной розетки. Определена максимальная скорость роста полосы сдвига составляющая 0,2 мм/с. Определены морфологические особенности полос сдвига и их геометрические параметры. Установлена, зависимость деформационного рельефа от состава исследуемых сплавов. Воздействие внешних факторов приводит к изменению морфологии рельефа, что обусловлено структурными состояниями, инициируемыми этими факторами. В частности,

усложняется вид деформационной розетки, появляются преимущественные направления роста полос, уменьшается их длина и их количество.

Список литературы

1. Inoue A., Wang X.M. Bulk amorphous FC20 (Fe–C–Si) alloys with small amounts of B and their crystallized structure and mechanical properties // *Acta Materialia*. – 2000. – Vol. 48, iss. 6. – P. 1383–1395.
2. Берлев, А.Е., Ота М., Хоник В.А. Ползучесть массивного металлического стекла $Zr_{52,5}Ti_5Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}$ // Вестник Тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки. – 2003. – Т. 8, вып. 4. – С. 522–524.
3. Рельеф, формируемый на поверхности объемных и ленточных металлических стекол при микроиндентировании / А.В. Яковлев, В.А. Федоров, Т.Н. Плужникова, Ю.В. Черемисина, Д.А. Колесников, И.Ю. Гончаров, О.Н. Марадудина // Вестник Тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки. – 2010. – Т. 15, вып. 3. – С. 1101–1102.
4. Глезер А.М., Молотилев Б.В. Структура и механические свойства аморфных сплавов. – М.: Металлургия, 1992. – 208 с.
5. Оптимизация режимов отжига металлических стекол / А.В. Яковлев, В.А. Федоров, А.П. Храбров, Г.А. Барышев // XVII Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященные 90-летию со дня рождения профессора А.Н. Орлова, Санкт-Петербург, 10–12 апреля 2007 г.: сборник материалов. – Санкт-Петербург, 2007. – Ч. 1. – С. 72–73.

LAWS OF RELIEF FORMATION IN AMORPHOUS METAL ALLOYS UNDER LOCAL DEFORMATION

Yakovlev A.V., Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, e-mail: DAK-83@mail.ru
Pluzhnikova T.N., Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor,
e-mail: plushnik@mail.ru
Fedorov V.A., D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru
Berezner A.D., Post-graduate Student, e-mail: qwert1009@mail.ru
Fedotov D.Yu., Assistant, e-mail: dmitry_989@mail.ru

Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 33 International st., Tambov, 392000,
Russian Federation

Abstract

We have studied the evolution of shear bands in amorphous metal alloys at local mechanical stress. We investigated laws of the strain relief, forming on the metallic glasses surface. We have determined the maximum shear bands growth rate. We determined mechanisms of the relief changes in composition. We have observed change of the strain relief in the dependence with external influence value.

Keywords

plasticity, annealing, amorphous metallic alloy, structural relaxation, nanocrystal, aggressive environment

УДК 620.17

**ВЗАИМОСВЯЗЬ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВДАВЛИВАНИИ СФЕРИЧЕСКОГО
ИНДЕНТОРА С ДЕФОРМАЦИЕЙ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ***

*П.М. ОГАР, доктор техн. наук, профессор
Д.Б. ГОРОХОВ, канд. техн. наук, доцент
(БРГУ, г. Братск)*

Огар П.М. – 665709, г. Братск, ул. Макаренко 40,
Братский государственный университет,
e-mail: ogar@brstu.ru

Статья посвящена определению деформации при внедрении сферы и ее взаимосвязи с деформацией при растяжении. Рассмотрены методы определения контактной деформации. Указано, что в последнее время для определения деформации широко используется конечно-элементный анализ, который учитывает эффекты «sink-in/pile-up». Описан энергетический подход к определению деформации при вдавливании сферы. Представлены соответствующие графические зависимости.

Ключевые слова: диаграмма растяжения, деформация, внедрение сферы, диаграмма вдавливания, степенной закон Холломона, экспонента упрочнения.

Введение

Вопрос об оценке величины деформации при вдавливании сферического индентора и взаимосвязи ее с деформацией при растяжении является ключевым при разработке методов безобразцового определения свойств материалов по параметрам твердости.

Для описания истинных напряжений при растяжении (сжатии) в настоящее время широко используется степенной закон Холломона (Hollomon's power law)

$$S = \begin{cases} E\varepsilon, \varepsilon \leq \varepsilon_y; \\ E\varepsilon_y^{1-n} \varepsilon^n, \varepsilon \geq \varepsilon_y; \end{cases} \quad (1)$$

где E – модуль упругости; ε – деформация при растяжении (сжатии); $\varepsilon_y = \sigma_y/E$, $\sigma_y \approx S_y$ – предел текучести.

Абсурд ситуации состоит в том, что, несмотря на значительные различия в оценке величины деформации при вдавливании сферы разными исследователями [1], получены удовлетворительные результаты в определении механических свойств по параметрам твердости.

Методы определения деформации

Для удобства дальнейшего изложения материала приведем краткий обзор выражений. Более подробно вопрос рассмотрен в работе [1].

* Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки России в рамках госзадания №2014/10 (проект № 1754).

Благодаря обширному анализу экспериментальных данных в 1951 г. Д. Тейбор для описания деформации при внедрении сферы предложил выражение

$$\varepsilon_p = 0,2 \frac{d}{D} = 0,2 \frac{a_c}{R} = \beta \sin \gamma, \quad (2)$$

где $d = 2a_c$ – диаметр отпечатка; $D = 2R$ – диаметр индентора; $\beta = 0,2$; γ – половина угла вдавливания индентора в материал.

Соответствующее напряжение описывается выражением

$$\sigma_t = \frac{p_m}{\psi}, \quad (3)$$

где p_m – среднее давление, ψ – ограничивающий фактор, для упругого идеально пластичного тела $\psi = 3$.

Подход Тейбора Д. впоследствии был модифицирован для упругопластической области Франсисом Х. А., затем с минимальными изменениями Хаггагом Ф. В.: упругости материала индентора и испытываемого образца соответственно.

В работе [2] авторами было предложено

$$\varepsilon_r = \left(\frac{\alpha}{\sqrt{1 - (a_c/R)^2}} \right) \left(\frac{a_c}{R} \right) = \alpha \operatorname{tg} \gamma, \quad (4)$$

где $\alpha \approx 0,14$.

Средняя степень деформации при вдавливании шара в плоскость по Марковцу [3]

$$\Psi_n = \frac{t}{D} = 0,5 \left(1 - \sqrt{1 - (d/D)^2} \right), \quad (5)$$

где t – величина внедрения шара.

Данное соотношение использовано при определении $H_{0,2}$ и $\sigma_{0,2}$ по ГОСТ 22762-77. Общая деформация в лунке $\Psi_n = 0,2\%$ достигается при $d/D = 0,09$.

Выражение (5) использовано также для определения деформации В.М. Шабановым [4].

В работе [5] для количественной оценки средней пластической деформации применялись следующее выражение

$$\Psi^{\text{ср}} = \frac{t}{R} = 1 - \sqrt{1 - (d/D)^2}. \quad (6)$$

где $R = 0,5D$.

Между $(d/D)_e$ на пределе прочности и индексом Майера m существует однозначная связь [5]

$$\left(\frac{d}{D} \right)_e = \frac{[m(m-2)]^{0,5}}{m-1}. \quad (7)$$

Индекс Майера используется также в работах С.И. Булычева [6,7], где при исследовании корреляции диаграмм твердости и растяжения исходят из эмпирического закона Майера. Диаграммы истинных напряжений S и HM сравниваются, используя их степенные аппроксимации:

$$S = K\varepsilon^n; \quad HM = B(d/D)^{m-2}. \quad (8)$$

При этом деформация описывается зависимостью [6, 7]

$$\varepsilon = \alpha(d/D)^\beta, \quad (9)$$

где согласно [6]:

$$\alpha = 0,15 + 1,2(m-2), \quad \beta = 1,2[1 + (m-2)^{1,7}]; \quad (10)$$

согласно [7]:

$$\alpha = 0.15 + 1.83(m - 2)^{1.4}, \quad \beta = 1.18 + (m - 2)^{1.6}. \quad (11)$$

Выражение (9) позволяет записать зависимость Майера в виде:

$$HM = B(d/D)^{m-2} = B^*[\alpha(d/D)^\beta]^{m-2} = K\varepsilon^n, \quad (12)$$

где $S = HM/3$; $B^*/3 = K$; $B^* \alpha^{\frac{m-2}{\beta}} = B$; $\frac{m-2}{\beta} = n$.

Таким образом осуществляется переход от диаграмм растяжения к диаграммам твердости и наоборот по С.И. Булычеву.

В работах [8] автором был сделан вывод, что деформацию следует рассчитывать по формуле

$$\varepsilon = k_\varepsilon \sqrt{\frac{h}{R}}, \quad (13)$$

где $k_\varepsilon = 0,11$, h – величина внедрения сферы от уровня исходной поверхности.

Для оценки характеристик упрочняемого материала методом сферического индентирования в последние годы широко используется конечно-элементный анализ [9-11]. В указанных работах искомые параметры, как правило, являются функциями от ε_y , n (см. выражение (1)) и отношения $\bar{h} = h_r = h/R$.

Описание исследований

Целью исследований является определение взаимосвязи деформации растяжения с деформацией при вдавливании сферического индентора, учитывая последние достижения в области конечно-элементного моделирования при упругопластическом внедрении сферы [9-11].

Важной характеристикой при описании упругопластического контакта является параметр $c^2 = h_c/h$, который определяется эффектами «sink-in / pile-up», т.е. упругим продавливанием материала и пластическим вытеснением материала вокруг отпечатка. В этом плане отличается работа [10], в которой параметр c^2 представлен в виде

$$c^2(\varepsilon_y, n, \bar{h}) = M^{\frac{2}{N}} (2\bar{h})^{\frac{2}{N}-1}, \quad (14)$$

где $M = M(\varepsilon_y, n)$, $N = N(\varepsilon_y, n)$.

Относительный радиус $\bar{a} = a/R$ площади контакта определяется выражением

$$\bar{a}(\varepsilon_y, n, \bar{h}) = \sqrt{2\bar{h}_c(\varepsilon_y, n, \bar{h}) - \bar{h}_c^2(\varepsilon_y, n, \bar{h})} \quad (15)$$

где $\bar{h}_c(\varepsilon_y, n, \bar{h}) = c^2(\varepsilon_y, n, \bar{h}) \cdot \bar{h}$.

Для определения относительной нагрузки, приложенной к индентору, удобно использовать результаты работы [11]:

$$\bar{P} = \frac{P}{E^* R^2} = \bar{P}(\varepsilon_y, n, \bar{h}) = e^{-B} \bar{h}^A, \quad (16)$$

где $A = A(\varepsilon_y, n)$; $B = B(\varepsilon_y, n)$;

Для определения индекса Майера m в выражениях (10) и (11) используем закон Майера в виде:

$$P = Ad^m. \quad (17)$$

Из выражения (17)

$$m = \frac{\lg(P_2/P_1)}{\lg(d_2/d_1)} \quad (18)$$

Следует отметить, что $\lg(P_2/P_1) = \lg(\bar{P}_2/\bar{P}_1)$, а $\lg(d_2/d_1) = \lg(a_2/a_1)$, где

$$a_i = \sqrt{2Rc^2h_i - (c^2h_i)^2};$$

Зависимости индекса Майера от экспоненты упрочнения представлены на рис. 1.

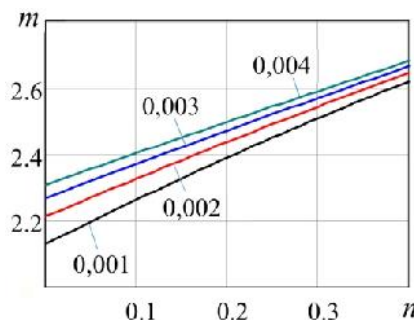


Рис. 1. Зависимость индекса Майера m от экспоненты упрочнения для разных значений ε_y .

Если закон Майера представить в виде (12), то константа $B = B(\varepsilon_y, n)$ определяется выражением

$$\frac{B(\varepsilon_y, n)}{E^*} = B_E(\varepsilon_y, n) = \frac{e^{-B(\varepsilon_y, n)}}{\pi} \bar{h}_2^{A(\varepsilon_y, n)} a_r(\varepsilon_y, n, \bar{h}_z)^{-m(\varepsilon_y, n)} \quad (19)$$

С помощью константы $B(\varepsilon_y, n)$ осуществляется переход от диаграмм твердости к диаграммам растяжения и наоборот.

Если деформация описывается зависимостью (9), то

$$\beta = (m-2)/n; \quad \alpha (d/D)_e^\beta = \varepsilon_u - \frac{\sigma(\varepsilon_u)}{E^*} = \varepsilon_u - \varepsilon_y^{1-n} \varepsilon_u^n \quad (20)$$

$$\alpha = \frac{n - \varepsilon_y^{1-n} n^n}{(d/D)_e^\beta}; \quad (21)$$

так как согласно данным [12] $\varepsilon_u = n$.

Подставляя выражение (21) в (9), получим

$$\varepsilon - \varepsilon_u^{1-n} \varepsilon^n = \varepsilon_p = (n - \varepsilon_u^{1-n} n^n) \left(\frac{(a/R)}{(a/R)_e} \right)^\beta. \quad (22)$$

На рис. 2 представлены зависимости деформации от $a_r = a/R$ (рис. 2а) и от \bar{h} (рис. 2б). Как следует из рис. 2б, функция $\varepsilon(\bar{h})$ может быть выпуклой при $m(\varepsilon_y, n) < n$ и вогнутой при $m(\varepsilon_y, n) > n$.

В работе [13] предложен новый подход к определению деформации при вдавливании сферы, в котором используется энергетическая концепция твердости [14-16]. Метод основывается на допущении о том, что в пределах в пределах равномерной деформации при одноосном растяжении и вдавливании шара на пластическое вытеснение части объема материала за пределы исходного объема при одинаковой деформации затрачивается одинаковая удельная энергия.

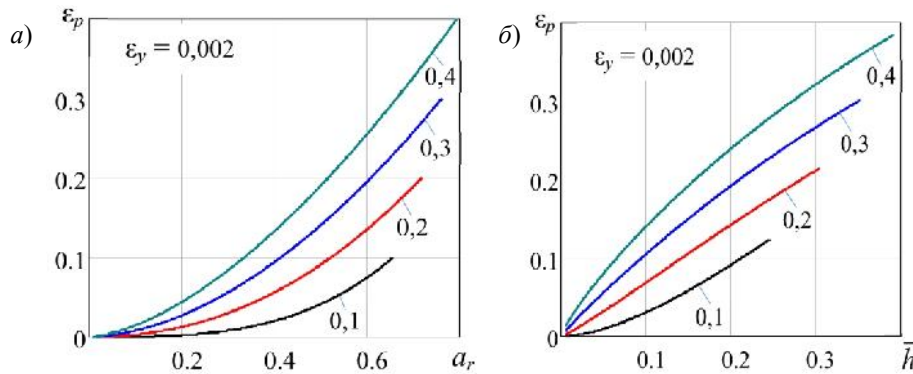


Рис. 2. Зависимость деформации от a_r (а) и от \bar{h} (б).

Для одноосного растяжения образец с начальной длиной l_0 и сечением F_0 после приложения нагрузки P удлинится на величину $\epsilon_p l_0$, а сечение становится $F = F_0 / (1 + \epsilon_p)$, где ϵ_p – остаточная пластическая деформация. Удельная энергия изменения объема равна отношению выполненной работы $A_p = P \Delta l = S F_0 \epsilon_p l_0 / (1 + \epsilon_p)$ к вытесненному объему материала $\Delta V = F \Delta l = F_0 l_0 \epsilon_p / (1 + \epsilon_p)$

$$\Delta E = \frac{A_p}{\Delta V} = S, \tag{23}$$

где S – истинное напряжение.

При вдавливании сферы удельная энергия пластического вытеснения материала равна энергетической твердости [13]

$$\frac{H_E}{E^*} = C_p \cdot \frac{\bar{P}}{\bar{h}}, \tag{24}$$

где $C_p \approx 0,17...0,19$ [15, 16].

При вдавливании сферы только часть энергии Ψ_e затрачивается на пластическое вытеснение материала от уровня исходной поверхности. Согласно принятому допущению $\Psi_e = H_E / S$. При $\epsilon = \epsilon_u = n$

$$\Psi_e(\epsilon_y, n, \bar{h}) = \frac{E^* H_E(\epsilon_y, n, \bar{h}_e)}{E \epsilon_y^{1-n} \epsilon_u^n}, \tag{25}$$

где \bar{h}_e определяется из выражения

$$\left(\frac{a}{R}\right)_e = \sqrt{2c^2(\epsilon_y, n, \bar{h}_e)\bar{h}_e - (c^2(\epsilon_y, n, \bar{h}_e)\bar{h}_e)^2}. \tag{26}$$

Для определения $(a/R)_e = (d/D)_e$ следует использовать выражение (7).

Учитывая, что $S(\epsilon) = \frac{E^* H_E(\epsilon_y, n, \bar{h})}{E \Psi_e(\epsilon_y, n, \bar{h})}$, для остаточной пластической деформации

получим

$$\epsilon_p = \epsilon_u \left(\frac{H_E(\epsilon_y, n, \bar{h})}{H_E(\epsilon_y, n, \bar{h}_e)} \right)^{\frac{1}{n}} - \epsilon_y^{1-n} \epsilon_u^{1-n} \frac{H_E(\epsilon_y, n, \bar{h})}{H_E(\epsilon_y, n, \bar{h}_e)} \tag{27}$$

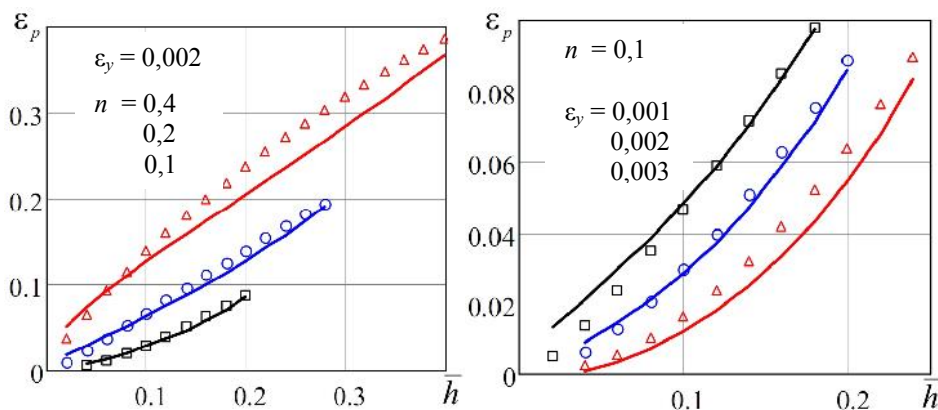


Рис. 3. Зависимости деформации ε_p от относительного внедрения сферы \bar{h} для разных значений ε_y и n .

На рис. 3 сплошными линиями представлены зависимости деформации ε от относительного внедрения сферы \bar{h} для разных значений характеристик материала ε_y и n . Результаты расчетов по выражению (9) приведены точками.

Заключение

1. Из приведенного обзора следует, что величина деформации при вдавливании сферы в большинстве случаев определяется геометрическими параметрами и может отличаться в разы.

2. Используя результаты конечно-элементного анализа для определения индекса Майера показано, что функция $\varepsilon(\bar{h})$ может быть выпуклой при $m(\varepsilon_y, n) < n$ и вогнутой при $m(\varepsilon_y, n) - 2 < n$. Подход с использованием закона Майера является более информативным и предпочтительным, так как учитывает также свойства испытываемого материала.

3. Предложен энергетический подход к определению деформации при вдавливании сферы, при использовании которого получены близкие результаты с методом, основанном на законе Майера. При этом индекс Майера m не входит в расчетные формулы в явном виде, он используется только для определения $(a/R)_e$.

Список литературы

1. Огар П.М., Горохов Д.Б. Обзор методов определения упругопластической деформации при внедрении сферы // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 3. – С. 15–22.
2. Ahn J.-H., Kwon D. Derivation of plastic stress-strain relationship from ball indentations: Examination of strain definition and pileup effect // Journal of Materials Research. – 2001. – Vol. 16. – P. 3170–3178.
3. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
4. Шабанов В.М. Экспресс-диагностика технического состояния металла элементов конструкций АЭС методом кинетического индентирования // Технологии техногенной безопасности. – 2013. – № 3 (39). – С. 1–7.

5. Матюнин В.М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов. – М.: Изд-во МЭИ, 2006. – 214 с.
6. Булычев С.И. Переход от диаграмм вдавливания к диаграммам растяжения с учетом упрочненного поверхностного слоя // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – № 2. – С. 43–48.
7. Булычев С.И. Твердость и гистерезис на пределе текучести // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 1. – С. 41–45.
8. Ковалев А.П. Оценка несущей способности поверхностного слоя деталей вдавливанием сферического индентора // Технология машиностроения. – 2007. – № 9. – С. 50–53.
9. Lee H., Lee J.H., Pharr G.M. A numerical approach to spherical indentation techniques for material property evaluation // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2005. – Vol. 53. – P. 2037–2069.
10. Influence of penetration depth and mechanical properties on contact radius determination for spherical indentation / X. Hernot, O. Bartier, Y. Bekouche, R. El Abdi, G. Mauvoisin // International Journal of Solids and Structures. – 2006. – N 43. – P. 4136–4153.
11. Collin J.M, Mauvoisin G, Pilvin P. Materials characterization by instrumented indentation using two different approaches // Materials and Design. – 2010. – Vol. 32. – P. 636–640.
12. ASTM E646-07e1, Standard test method for tensile strain-hardening exponents (n -Values) of metallic sheet materials. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007. – URL: <http://www.astm.org/Standards/E646.htm> (accessed: 23.03.2016).
13. Огар П.М., Горохов Д.Б. Новый подход к определению деформации при упругопластическом внедрении сферического индентора // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 4. – С. 15–22.
14. Огар П.М., Тарасов В.А., Федоров И.Б. Энергетическая концепция твердости при кинетическом индентировании сферой // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2 (22). – С. 36–41.
15. Ogar P.M., Tarasov V.A., Gorokhov D.B. Energy concept of hardness by the kinetic sphere indentation // Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 1061–1062. – P. 579–583.
16. Ogar P.M., Gorokhov D.B., Fedorov I.B. Energy approach to material hardness determination // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 170–176.

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE DEFORMATION OF A SPHERICAL INDENTER UNDER INDENTATION AND THE DEFORMATION UNDER TENSION

Ogar P.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: ogar@brstu.ru

Gorokhov D.B., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: gorokhov@brstu.ru

Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

Abstract

The paper is devoted to the definition of the deformation under indentation of the sphere and its relationship with the tensile deformation. The methods of determining the deformation of the contact are considered. It is shown that in the last time to determine the deformation, the finite element analysis taking into account the effects of «sink-in / pile-up» is widely used. The energy approach of to the determination of the sphere indentation deformation is described. The equations to determine the deformation of the sphere indentation are obtained and the corresponding graphic relations are shown.

Keywords

tension diagram, deformation, sphere indentation, indentation diagram, Hollomon power law.

УДК 669-15:621.793.6

**ПОВЕРХНОСТНОЕ НАСЫЩЕНИЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ БОРОМ
И АЛЮМИНИЕМ ИЗ ОБМАЗОК В УСЛОВИЯХ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ***

*И.П. ПОЛЯНСКИЙ¹, инженер
И.Г. СИЗОВ¹, доктор техн. наук, профессор
У.Л. МИШИГДОРЖИЙН¹, канд. техн. наук, с.н.с.
К. ЛЕЙЕНС², доктор техн. наук, профессор
Б. ФЕТТЕР², доктор техн. наук, ведущий инженер
(¹ВСГУТУ, г. Улан-Удэ,
²ТУ, г. Дрезден)*

Полянский И.П. – 670013, Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
e-mail: i.polyansky@mail.ru

В работе проведено исследование изотермического и термоциклического бороалитирования стали 20, установлен интервал температур термоциклирования образцов в обмазках, дан сравнительный анализ микроструктур в зависимости от режима обработки, исследовано распределение микротвердости и элементного состава по глубине диффузионного слоя, исследована жаростойкость бороалитированных слоев на стали 20.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, бороалитирование в обмазках, термоциклирование, микротвердость, рентгеноспектральный микроанализ, жаростойкость.

Введение

Для повышения эксплуатационных свойств и снижения себестоимости технологической оснастки в машиностроительной отрасли разрабатывают новые способы получения покрытий или слоев на рабочей поверхности с высоким комплексом свойств. Одним из таких эффективных способов является химико-термическая обработка (ХТО). Широкий диапазон химических элементов, входящих в состав насыщающей смеси, позволяет получить на поверхности диффузионные слои с повышенными механическими свойствами, в сравнении с традиционными методами термической обработки, и экономически выгодными, в сравнении с легированием железоуглеродистых сплавов. Одним из недостатков ХТО является длительная выдержка при высокой температуре. Это способствует росту зерна в структуре, что в свою очередь отрицательно влияет на механические свойства материала. Указанный недостаток можно устранить химико-термоциклической обработкой (ХТЦО). Известно положительное влияние термоциклирования на процессы борирования, азотирования, цементации, нитроцементации [1].

Процессы ХТО достаточно хорошо изучены. Тем не менее, продолжается активное изучение процессов в области многокомпонентного насыщения поверхности сталей: борохромирование, борованадирование, ванадийалитирование, хромоалитирование, алюмосилицирование и т.д., которые по сравнению с однокомпонентным насыщением позволяют получить более широкий спектр требуемых свойств.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (Конкурс – МК-2015)

Одним из таких перспективных методов является бороалитирование. Последовательное или совместное насыщение бором и алюминием позволяет получить на поверхности слои с высокой стойкостью к окислительной среде при высоких температурах и высокой износостойкостью.

Бороалитирование осуществляют различными методами: порошковым, в обмазках и суспензиях (шликерный), газовым, жидким [2-7]. В условиях, когда производство не серийное или требуется обработка только отдельных участков деталей целесообразно использовать шликерный метод, который так же позволяет совместить ХТО с последующей термической обработкой [3].

Цель данной работы заключалась в исследовании процесса бороалитирования в обмазках в условиях термоциклического нагрева.

Материалы и методы исследования

В работе использовали образцы из стали 20, на которые наносили обмазку, состоящую из карбида бора, алюминия и фтористого натрия в качестве активатора. При высоких температурах карбид бора активно взаимодействует с кислородом и образует на поверхности стеклообразную пленку борного ангидрида, которая изолирует активную обмазку и образец от окисления. Толщину обмазки выбирали согласно [8]: обмазка на основе карбида бора толщиной 3 мм эффективно действует приблизительно 4 ч при температуре 930 °С. Если температура составит 950 °С, то ее толщина должна составлять 4 - 6 мм.

Ранее авторами был установлен интервал соотношения компонентов в составе обмазки для одновременного насыщения бором и алюминием равный (вес.%): В₄С – 78-88; Al – 18-8; NaF – 4 [9,10].

Бороалитирование проводили двумя способами: изотермическим и термоциклическим. Термоциклирование осуществляли по трем режимам с 4, 8 и 16 циклами. Изотермическую обработку проводили при 950 °С, термоциклирование осуществляли в интервале температур 650 – 950 °С, общее время процессов составляло 4 ч. Скорость нагрева и охлаждения, определенная при помощи термопары «хромель-алюмель» и милливольтметра, составила 0,4 и 1,6 град/сек соответственно. Охлаждение между циклами проводили на воздухе.

Металлографический анализ проводили на оборудовании Института материаловедения Технического университета г. Дрезден. Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3М. Рентгеноспектральный микроанализ проводили на растровом электронном микроскопе JSM-6510LV JEOL с системой микроанализа INCA Energy 350 в Центре коллективного пользования «Прогресс» ВСГУТУ.

Жаростойкость образцов с бороалитированными слоями определяли весовым методом по увеличению массы при T=1000 °С в течение 50 ч. (ГОСТ 6130-71 «Металлы. Методы определения жаростойкости»). Изменение массы регистрировали на аналитических весах через каждые 5 ч испытаний на жаростойкость.

Результаты и обсуждение

Согласно [11] при ХТО возможно образование трех типов слоев:

1. Игольчатого строения, когда в насыщающей смеси небольшое содержание алюминийсодержащего вещества. В этом случае алюминий растворяется в небольшом количестве в бориде железа или по стыкам боридных игл и не образует самостоятельных фаз с железом.

2. Конгломератного строения, состоящих из боридных и алюминидных фаз. Бориды неправильной формы беспорядочно располагаются в алитированной части слоя. Основу таких слоев последовательно составляют алюминиды железа: Fe_2Al_5 , $FeAl_3$, $FeAl$, Fe_3Al и α -твердого раствора алюминия в железе и бориды железа FeB и Fe_2B .

3. С преимущественно алитированной составляющей: α -твердого раствора алюминия в железе и алюминидов железа, чаще всего Fe_2Al_5 . Бориды железа располагаются в виде цепочек кристаллов в переходной зоне между диффузионным слоем и основным металлом.

После обработки в смеси состава (вес.%): B_4C – 78, Al – 8 и NaF – 4, были получены бороалитированные слои, которые можно отнести ко второму и третьему типу (рис.1). Кристаллы игольчатой формы расположены в нижней и верхней части слоя. Причем, кристаллы в верхней части слоя ориентированы под разными углами относительно направления диффузии, а кристаллы на границе слой-основа - в направлении диффузии.

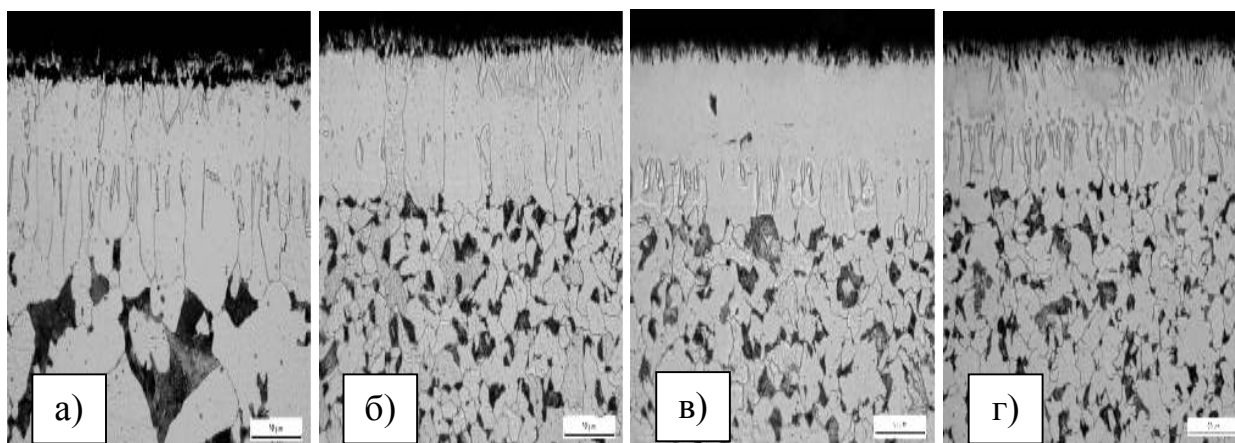


Рис. 1. Микроструктуры бороалитированных слоев на стали 20: а) изотермический нагрев, б) термоциклирование (4 цикла), в) термоциклирование (8 циклов), г) термоциклирование (16 циклов).

При проведении качественного и количественного анализа диффузионного слоя было установлено, что максимальное содержание бора в игольчатых кристаллах составляет около 17% после изотермической обработки. После обработки по режиму с 4 циклами - в среднем 12%, минимальное содержание бора в кристаллах наблюдается после обработки по режиму с 8 циклами и соответствует 4,8%, после обработки по режиму с 16 циклами среднее значение содержания бора составило 9,5%. Известно что, содержание бора в бориде железа составляет 16,23% (FeB) и 8,83% (Fe_2B) [12].

Содержание алюминия на поверхности слоя после различных обработок отличается. Так, после изотермической обработки оно составляет 5,6% Al , после обработки по режиму с 4 циклами – 3,1% Al , после обработок по режимам с 8 и 16 циклами – 6,5-6,8%. Далее, по мере удаления от поверхности концентрация алюминия плавно снижается.

В целом, увеличение количества циклов приводит к линейному снижению толщины диффузионного слоя со 120 мкм при изотермическом бороалитировании до 60 мкм при термоциклировании с 16 циклами. Это связано с уменьшением суммарного времени при температуре насыщения (950°C) во время термоциклирования.

Микроструктура основного металла различается по величине зерна в зависимости от обработки. Балл зерна после изотермического бороалитирования соответствуют номеру 3, согласно ГОСТ 5639-82. После термоциклического бороалитирования по всем режимам балл зерна соответствует номерам 6 и 7.

Микротвердость слоя в алитированной части на стали 20 при изотермическом и термоциклическом режиме с 4 циклами составляет 450-500 HV0.05, что соответствует

алюминиду FeAl и Fe_3Al , а после обработки по режимам с 8 и 16 циклами – 800-850 HV0.05, что соответствует алюминидам FeAl_3 и Fe_2Al_5 .

Микротвердость игольчатых кристаллов расположенных в верхней части слоя составляет 2200-2300 HV0.05, что соответствует предельному значению микротвердости борида железа FeB [12].

Известно, что для повышения жаростойкости на поверхности стали должны образовываться фазы с высоким содержанием алюминия [13,14]. В работе [15] исследовали термоциклическое бороалитирование в порошковых смесях. Авторами было установлено, что содержание фазы Fe_2Al_5 в слое выше после термоциклирования, по сравнению с изотермической выдержкой на низкоуглеродистых сталях. Так, при непрерывной выдержке количество Fe_2Al_5 постепенно снижается, а количество FeAl увеличивается в результате самодиффузии железа к поверхности и диффузии алюминия в обратном направлении. При термоциклировании же скорость диффузии насыщающих элементов не постоянна, что приводит к аккумулярованию фазы Fe_2Al_5 на поверхности слоя.

Исследование жаростойкости образцов на стали 20 показало что, наиболее стойкими к окислительной среде по сравнению с изотермическим способом оказались образцы, обработанные по режимам с 8 и 16 циклами (рис.2). Это объясняется повышенным содержанием алюминия в слое после обработки по указанным режимам.

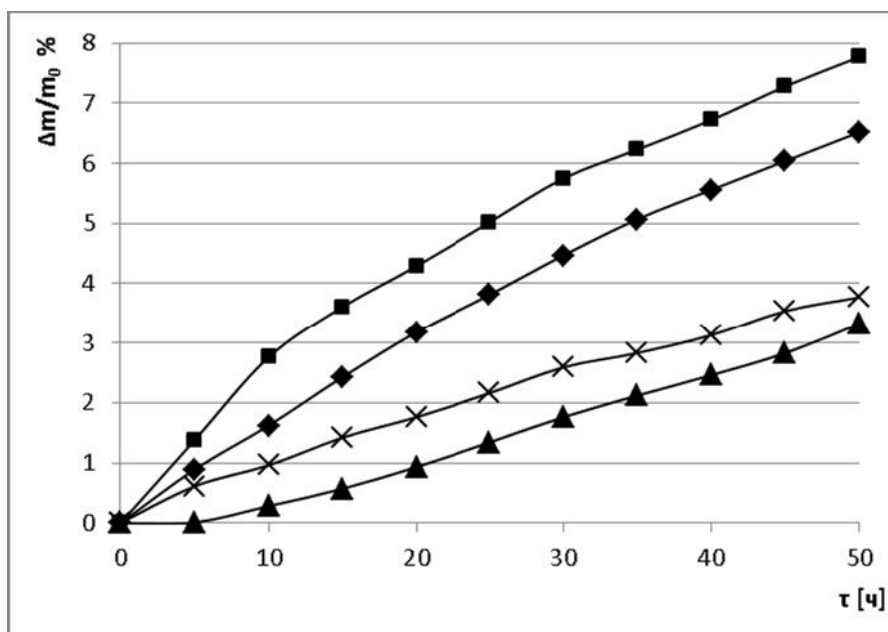


Рис. 2. Кинетика окисления стали 20 после различных способов бороалитирования:

♦ – изотермический, ■ – термоциклирование 4 цикла, ▲ – термоциклирование 8 циклов, × – термоциклирование 16 циклов.

Изменение массы определяли по следующей формуле:

$$\Delta m/m_0 = ((m_i - m_0) / m_0) * 100\%,$$

где m_i – масса образца через каждые 5 часов испытаний на жаростойкость, m_0 – масса образца до испытаний на жаростойкость.

Выводы

1. Установлено, что совмещение термоциклирования с химико-термической обработкой при бороалитировании из образцов оказывает положительное влияние на свойства стали 20 за счет воздействия на структуру основного металла и повышения жаростойкости поверхностного слоя.

2. Исследования показали, что методом термоциклирования можно управлять процессом формирования бороалитированного слоя для получения требуемой структуры и свойств.

В статье использованы результаты стажировки к.т.н. Мишигдоржийн У.Л. в институте материаловедения Технического университета г. Дрезден в 2014-2015 гг. Авторы признательны сотрудникам и студентам института материаловедения, внесших вклад в совместную работу: Тамаре Фридрих (физик-лаборант), Керстин Хабиш (студент).

Список литературы

1. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. – Л.: Машиностроение, 1989. – 255 с.
2. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Г.В. Борисенко, Л.А. Васильев, Л.Г. Ворошнин и др. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
3. Aluminizing and boroaluminizing treatments of Mar-M247 and their effect on hot corrosion resistance in Na₂SO₄-NaCl molten salt / J.H. Cho et al. // Metals and Materials International. – 2003. – Vol. 9 (3). – P. 303–310.
4. Influence of thermocycle boroaluminizing on strength of steel C30 / I.G. Sizov, U.L. Mishigdorzhiiyn, Ch. Leyens, B. Vetter, T. Furmann // Surface Engineering. – 2014. – Vol. 30 (2). – P. 129–133.
5. Boroaluminide coatings on ferritic–martensitic steel deposited by low-temperature pack cementation / S.A. Tsipas, H. Omar, F.H. Perez, D.N. Tsipas // Surface & Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202. – P. 3263–3271.
6. Ворошнин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А. Теория и технология химико-термической обработки. – М.; Минск: Новое знание, 2010. – 304 с.
7. Boro-aluminising of P91 steel by pack cementation for protection against steam oxidation / H. Omar, S.A. Tsipas, N. Maragoudakis, N. Michailidis // Corrosion Engineering, Science and Technology. – 2011. – Vol. 46 (6). – P. 697–700.
8. Ситкевич М.В., Бельский Е.И. Совмещенные процессы химико-термической обработки с использованием обмазок. – Минск: Высшая школа, 1987. – 156 с.
9. Патент 2459011 Российская Федерация, МПК С 23 С 8/72. Обмазка для бороалитирования стальных изделий / И.Г. Сизов, И.П. Полянский, У.Л. Мишигдоржийн, Д.М. Махаров; заявитель и патентообладатель Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления. – № 2011125888/02; заявл. 23.06.2011; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23. – 8 с.
10. Влияние состава насыщающих обмазок на структуру и свойства бороалитированного слоя / И.Г. Сизов, И.П. Полянский, У.Л. Мишигдоржийн, Д.М. Махаров // Обработка металлов, технология, оборудование, инструменты. – 2013. – № 1 (58). – С. 22–26.
11. Химико-термическая обработка инструментальных материалов / Е.И. Бельский, М.В. Ситкевич, Е.И. Понкратин, В.А. Стефанович. – Минск: Наука и техника, 1986. – 247 с.
12. Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г. Пластичность борированных слоев. – М.: Физматлит, 2010. – 384 с.
13. Badaruddin M. Improvement of high temperature oxidation of low carbon steel exposed to ethanol combustion product at 700°C by hot-dip aluminizing coating // Makara Journal of technology Series. – 2011. – Vol. 15 (2). – P. 137–141.
14. Schütze M., Quadackers W.J. Novel approaches to improving high temperature corrosion resistance. – Cambridge, UK.: Woodhead Publishing, 2008. – P. 176–191. – (European Federation of Corrosion Publication; Nr. 47).
15. Sizov I.G., Mishigdorzhiiyn U.L., Maharov D.M. A study of thermocycling boroaluminizing of carbon steel // Metal Science and Heat Treatment. – 2012. – Vol. 53 (11–12). – P. 592–597.

**SURFACE SATURATION OF LOW-CARBON STEEL WITH BORON
AND ALUMINUM FROM PASTES IN THERMOCYCLING**

Polyansky I. P.¹, Engineer, e-mail: i.polyansky@mail.ru

Sizov I. G.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: sigperlit@mail.ru

Mishigdorzhyn U. L.¹, Ph.D, Senior Researcher, e-mail: druh@mail.ru

Leyens C.², D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: christoph.leyens@tu-dresden.de

Vetter B.², D.Sc. (Engineering), Principal engineer, e-mail: birgit.vetter@tu-dresden.de

¹ East Siberia State University of Technology and Management, 40V Kluchevskaya st., Ulan-Ude, 670013, Russian Federation

² Technische Universität Dresden, 10 Helmholtzstraße, Dresden, 01069, Germany

Abstract

Isothermal and thermocycle boroaluminizing of the steel 20 is carried out, the thermocycling temperature range of the coated samples is determined, the comparative analysis of microstructures according to the treatment mode is given, the distribution of microhardness and the elemental composition of the diffusion layer depth are studied, oxidation of the boroaluminized layers on the steel 20 is investigated.

It is found that the combination of chemical and thermocycle treatments contributes to a better formation of the boroaluminized layer, particularly, it produces a more aluminum enriched phase in the diffusion layer, such as FeAl₃ and Fe₂Al₅, which in turn leads to an increase in microhardness and oxidizing environment resistance at high temperatures. Also it is established that thermocycle treatment brings to the structure refinement of a saturable material, which has a positive effect on mechanical properties of the substrate.

Keywords

thermochemical treatment, paste boroaluminizing, thermocycling, microhardness, electron microprobe analysis, oxidation resistance

Funding

The work was supported by the Russian President's grant for state support of young Russian scientists - PhD (Competition - MK-2015)

УДК 338.45

**АНАЛИЗ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ
МАШИНОСТРОЕНИЯ: ПУТИ СОТРУДНИЧЕСТВА С УНИВЕРСИТЕТСКИМ
КОМПЛЕКСОМ**

**Г.А. АБСАЛЯМОВА, аспирант
(АлтГТУ, г. Барнаул)**

Абсалямова Г.А. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: rozina128@mail.ru

В статье дан краткий анализ инновационной деятельности российских предприятий машиностроительного комплекса и выявлены факторы, препятствующие увеличению инновационной активности указанных предприятий. В качестве методологии выбраны статистические методы обработки и анализа статистических данных. Основной целью исследования является поиск точек соприкосновения машиностроительных предприятий с университетами при осуществлении инновационной деятельности. Результатом статьи является обозначение пути сотрудничества предприятий с вузовской наукой.

Ключевые слова: экономика знаний, инновационная деятельность, инновационная активность, глобальный индекс инноваций, университет

Введение

В качестве основного целевого ориентира в Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года указано создание конкурентоспособной экономики знаний и высоких технологий, основанных на инновациях [1].

Понятие «экономика, основанная на знаниях» в современной научной литературе, является синонимом инновационной экономике. Это обстоятельство подчеркивает зависимость развитых мировых экономик от знаний, информации и высокой квалификации трудовых ресурсов.

Знания, являющиеся атрибутом постиндустриального общества, определяют главные отличительные черты этого общества, в котором [2]:

- 1) центральная роль принадлежит теоретическому знанию, которое становится основой технологических инноваций;
- 2) создается новая интегральная технология, позволяющая находить более эффективные подходы к экономическим и проблемам общества;
- 3) происходит переход от производства товаров к производству услуг;
- 4) наука достигает своего зрелого состояния;

Экономика, основанная на знаниях, предполагает создание знания, воплощающимся в научной информации, научно-исследовательских разработках и инновациях. Инновация, в широком смысле, всегда подразумевает использование знаний. Это может быть использование новых знаний; использование существующих знаний, но новым образом (новая комбинация знаний и др.) [3].

Система экономики знаний представляет собой совокупность институциональных единиц, деятельность которых направлена на воспроизводство знаний, научной информации и нововведений. В качестве подобной институциональной единицы инновационной экономики выступает университетский комплекс со своим образовательным, научно-исследовательским и инновационным потенциалом.

Сегодня, широко признается, что инновации являются ключевым фактором укрепления позиций на рынке товаров и услуг; роста производительности труда и эффективности производства. Что касается машиностроительного промышленного комплекса, то в условиях экономики знаний конкурентоспособными являются предприятия, которые активно ведут инвестиционную и инновационную деятельность.

Исходя из вышесказанного, целесообразным является проанализировать инновационную деятельность предприятий машиностроительного комплекса и объем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) вузов; выявить факторы, являющиеся препятствиями для инновационной деятельности; обозначить точки соприкосновения предприятий с университетами в процессе осуществления инновационной деятельности.

Методологический подход

В качестве основного методологического подхода будем использовать статистические методы обработки и анализа статистических данных. В качестве информационной базы для выявления и анализа инновационных процессов в машиностроительной отрасли и в секторе высшего образования будем использовать статистические данные об инновационном, кадровом и инфраструктурном потенциале организаций данной групповой принадлежности. Источниками информации для анализа являются статистические сборники [5,6], информационно-аналитические материалы по результатам проведения мониторинга эффективности образовательных организаций высшего образования [8], а также данные федеральной службы государственной статистики [7].

Результаты исследования

Россия значительно уступает развитым странам мира в уровне инновационной деятельности, о чем свидетельствует показатель развития инноваций по версии международной организации INSEAD. Выборочные данные для сравнения по некоторым странам представлены на рисунке 1.

Другим показателем инновационной деятельности предприятий является инновационная активность, которая определяется как отношение предприятий, осуществляющих инновации в отчетному к общему числу предприятий. Данные по машиностроительным предприятиям в динамике за 2010-2014 гг. в разрезе видов экономической деятельности представлены в таблице 1.

Как видно из данных таблицы 1 наибольшей инновационной активностью из машиностроительной отрасли отличаются предприятия, занятые производством электронного оборудования (около 30%). Также следует заметить, что показатели инновационной активности машиностроительных предприятий выше средних значений аналогичных показателей в целом по отрасли «обрабатывающие производства» на 1-15 пунктов в зависимости от вида экономической деятельности.

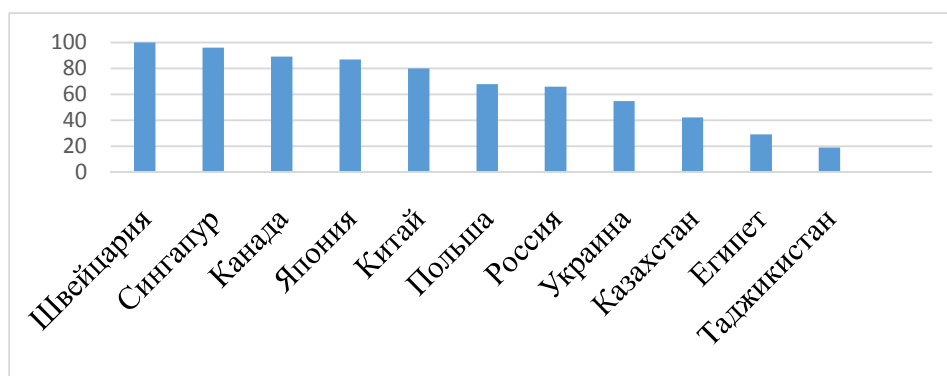


Рис. 1. Глобальному индексу инноваций стран мира (Global Innovation Index), 2015 год [9]

Таблица 1

Инновационная активность предприятий промышленности по видам экономической деятельности, Россия

	2010	2011	2012	2013	2014
Добыча полезных ископаемых	7,8	8,4	8,2	7,6	7,5
Обрабатывающие производства	13	13,3	13,4	13,3	13,6
Металлургическое производство и производство готовых металлических изделий	14,9	15,4	15,6	14,8	14,7
Производство машин и оборудования	17,1	17,7	16,7	15,9	15,9
Производство электрооборудования, электронного и оптического оборудования	26	26,5	27,9	26,9	28,3
Производство транспортных средств и оборудования	21,4	21,4	21,8	21,5	21,2
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	5,4	5,6	5,6	5,3	5,1

Однако, учитывая слабые позиции России на международной арене (о чем свидетельствуют данные глобального индекса инноваций, рис.1), а также направленность вектора экономического развития на инновации и научные знания, следует отметить особую актуальность задачи повышения инновационной активности предприятий машиностроительного комплекса [4].

В результате проведенного исследования был выделен ряд факторов, препятствующих инновационной деятельности машиностроительных предприятий, среди которых можно выделить следующие:

- чрезмерные риски;
- недостаток внутренних финансовых средств предприятия;
- отсутствие внешних источников финансирования (в том числе поддержка государства);
- нехватка квалифицированных специалистов;
- неопределенный рыночный спрос на инновационные товары /услуги;
- отсутствие или слабость инфраструктуры.

Многие из этих факторов имеет рыночную природу и предприятия повлиять на них самостоятельно не имеют возможности, однако такие проблемы, как отсутствие или недостаток квалифицированных специалистов, слабость инфраструктуры и частично

некоторые другие могут быть решены путем консолидации усилий предприятий и университетов.

Как видно, из анализа структуры, динамики и числа организаций, выполнявших научные исследования и разработки (рис. 2), количество конструкторских бюро, проектных организаций и опытных заводов из года в год сокращается. Число же университетов, напротив, увеличивается. Также заметен рост организаций и предприятий, в структуре которых создаются подразделения, занимающиеся НИОКР.

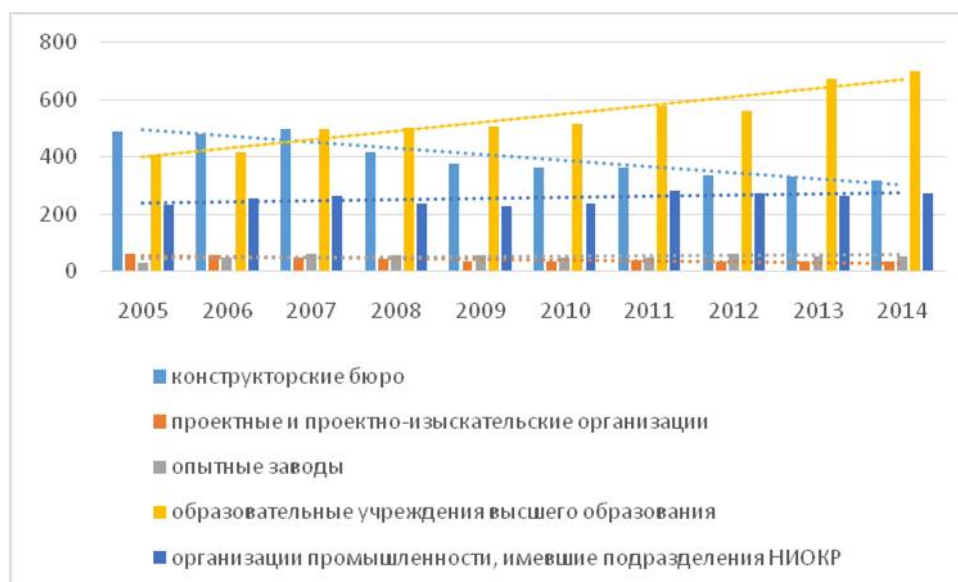


Рис. 2. Организации, выполнявшие НИОКР, по типам организаций по Российской Федерации

Численность персонала, занятого научными исследованиями и разработками в этих организациях по субъектам РФ (для исследования были взяты данные по Томской, Новосибирской и Кемеровской областям, Алтайскому краю) представлена в таблице 2. Анализ этих данных и их сопоставление с данными таблицы 3 по показателю «численность научно-педагогических работников» приводит к выводу, что большая часть работников, занятых научными исследованиями и разработками работает в организациях высшего образования.

Таблица 2

Численность персонала, занятого научными исследованиями и разработками, по субъектам Российской Федерации, чел.

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Сибирский федеральный округ	56427	53956	53463	53024	52794	52685	53769	54151
Алтайский край	2731	2267	2054	1955	2182	2714	3122	3137
Кемеровская область	1496	1327	1336	1258	1231	1097	1232	1475
Новосибирская область	22561	21597	21622	21615	21569	21590	21444	21638
Томская область	8511	8374	8560	8687	8795	8802	8684	8914
Итого:	35299	33565	33572	33515	33777	34203	34482	35164

Таблица 3

Показатели научно-исследовательской и инновационной деятельности технических университетов Сибири

Показатель	Ед. изм.	ТПУ	НГТУ	АлтГТУ	КузГТУ
1.Общий НИОКР	тыс. руб.	2141377	252337,5	68135,8	66293,8
2. Удельный вес доходов от НИОКР в общих доходах образовательной организации	%	30,33	10,51	5,44	6,94
3. Количество малых инновационных предприятий	ед.	51	25	31	12
4. Численность научно-педагогических работников	чел.	1671	1212	768	602
5. Площадь помещений, занимаемая научно-исследовательскими подразделениями	кв.м	27725	-	9609	575

Выводы

Таким образом, проведенный анализ инновационной деятельности машиностроительных мероприятий позволил сделать вывод о том, что перед российскими предприятиями машиностроительного комплекса на сегодняшний день стоит задача увеличения инновационной активности. Путь сотрудничества с вузовской наукой позволит облегчить решение указанной проблемы за счет увеличения кадрового и инфраструктурного потенциала.

Дальнейшее исследование данного вопроса следует вести в русле более детального рассмотрения путей сотрудничества предприятий и университетов в процессе осуществления ими инновационной деятельности.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 17 ноября 2008 г. № 1662-р «О Концепции долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2020 года».
2. Белл Д. Грядущее постиндустриальное общество: опыт социального прогнозирования: пер. с англ. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Academia, 2004. – 788 с.
3. Руководство Осло: рекомендации по сбору и анализу данных по инновациям: пер. с англ. / ГУ «Центр исследований и статистики науки». – 3-е изд. – М.: ЦИСН, 2006. – 191 с.
4. Создание учебно-производственных центров на базе промышленных предприятий Алтайского края / Г.А. Розина, В.А. Бородин, А.М. Марков, Е.К. Ганеман // Вестник алтайской науки. – 2015. – № 1. – С. 42–50.
5. Индикаторы инновационной деятельности: 2015: статистический сборник. – М.: НИУ ВШЭ, 2015. – 320 с.
6. Наука. Инновации. Информационное общество: 2015: краткий статистический сборник. – М.: НИУ ВШЭ, 2015. – 80 с.
7. Федеральная служба государственной статистики: web-сайт. – URL: <http://www.gks.ru/> (дата обращения: 23.03.2016).

8. Информационно-аналитические материалы по результатам проведения мониторинга эффективности образовательных организаций высшего образования. – URL: <http://indicators.miccedu.ru/monitoring/> (дата обращения: 23.03.2016).

9. The Global Innovation Index. – URL: <https://www.globalinnovationindex.org/> (accessed: 23.03.2016).

ANALYSIS OF INNOVATION ACTIVITY OF ENGINEERING COMPANIES: COOPERATION WITH UNIVERSITY

Absalyamova G. A., Ph.D. student, e-mail: rozina128@mail.ru

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038,
Russian Federation

Abstract

The article gives a brief analysis of innovation activity of Russian engineering enterprises. Were identified barriers to improve the innovative activity of the enterprises. As the main methodological approach were used statistical methods of processing and analysis of statistical data. As an information base to identify innovative processes in the engineering industry was used statistics on innovations, human and infrastructure potential of enterprises. The main goal of this research is to find common points of engineering enterprises with universities in the implementation of innovation. The result of this research is to find ways of cooperation between enterprises and University science.

Keywords

knowledge economy, innovation, innovative activity, global innovation index, university

УДК621:658.512

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ПО ПРИБЫЛИ

В.Н. БАТУРИН, канд. техн. наук, доцент
Д.В. БАТУРИН, аспирант
(ВСГУТУ, г. Улан-Удэ)

Батуринов В.Н. - 670013, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40В, строение 1,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
e-mail : vn_baturin@mail.ru

В статье представлена используемая на предприятии практическая методика обоснования выбора технологических решений, использующая для оценки ряд новых критериев, в том числе уровень прибыли. Они учитывают в комплексе как изменение себестоимости изготовления деталей, так и затрат времени на их обработку. Это позволяет обосновать перевод деталей на дорогостоящие высокопроизводительные комплексы и грамотно планировать производство. Методика может эффективно применяться в многономенклатурных машиностроительных производствах. Подробно разобран пример.

Ключевые слова: технологическое решение, моделирование затрат, информационная база, оптимизация планирования, уровень прибыли.

Введение

Машиностроительные предприятия региона Восточной Сибири и Забайкалья представлены заводами, которые производят летательные аппараты, электрические и гидравлические приборы, мостовые конструкции, производят ремонт подвижного состава для железных дорог и т.д. Большинство из них имеют специфику многономенклатурного производства. В последние годы машиностроительные предприятия по причинам физического и морального износа оборудования обновили основные фонды, закупив высокопроизводительные программные комплексы Японии, Кореи, Германии, Швейцарии и других стран. Для технологического обеспечения станков были приобретены приспособления, режущие и измерительные инструменты и устройства, а также технологические комплектующие. Поэтому в настоящее время станочный парк заводских цехов представлен оборудованием, которое значительно отличается по возрасту, стоимости и производительности.

Теория

При изготовлении на программных центрах точность деталей выше, ниже процент брака, уменьшен риск травматизма станочников, стала выше культура производства. Однако, детали, изготовленные на программных станках, могут оказаться дороже. Очень важно, если каждая партия изготавливаемых деталей будет попадать на такие станки, где производственные расходы на изготовление минимальны. Однако для практической реализации такой возможности существуют следующие проблемы:

1. У технологов, принимающих решения о выборе технологической траектории движения каждой изготавливаемой партии деталей, практически отсутствует мотивация для выбора лучшего решения. Она должна базироваться на четком регламентированном механизме действий служб и работников, который должен быть на предприятии. Этот механизм должен включать в себя:

- использование технологами критериев оптимизации;
- наличие программы, с помощью которой технологи могут производить вычисления и выбирать лучшее решение;
- наличие предписания на соответствующую учебу технологов по выбору технологических решений. Это мотивирует их работу.

В настоящее время технологи могут в лучшем случае оценивать только получаемые ими временные затраты. Чтобы рассчитать слагаемые себестоимости технологом, необходимы дополнительные многочисленные сведения, которыми они не располагают.

2. На машиностроительных предприятиях нашего региона нет четкой методики для реализации блока оптимизации при планировании производства. В литературных источниках в большинстве случаев выбор осуществляется по минимальной себестоимости технологического решения и не зависит от затрат времени. Это неправильно в условиях использования высокопроизводительного оборудования, которое позволяет в несколько раз сокращать время изготовления изделия при незначительном увеличении его себестоимости. Должна быть проведена теоретическая работа в этом направлении, благодаря которой будет разработана методика для разных производственных условий.

3. Нужен программный пакет оптимизации выбора технологических решений, который выполняет следующие этапы работ:

- содержит необходимую часть производственной информационной базы цеха, которая достаточна для определения основных слагаемых себестоимости изготовления детали (изделия);
- моделирует основные стоимостные затраты на обработку детали, например стоимость одной минуты работы на определенном рабочем месте (станке), стоимость операции, усредненные значения прибыли, получаемые в единицу времени (в час) и другие экономические показатели.

4. Необходимо внедрение блока оптимизации выбора технологического решения, как составной части системы бережливого производства.

Результаты исследования

Блок оптимизации выбора технологических решений может быть разработан по-разному как теоретически, так технически и программно. С течением времени блок будет отрабатываться, корректироваться и совершенствоваться. Однако нас интересует подход к решению проблемы оптимизации обоснования выбора технологических решений, тем более что в литературных источниках до конца этот вопрос не изучен и не отработан. Поэтому в исследованиях представляют научную новизну:

1. Непосредственно методика проведения обоснования выбора технологического решения, использующая для оценивания разные критерии в зависимости от производственных условий и ситуации;

2. Используемые для оценивания выбора технологических решений критерии, которые выбираются в зависимости от условий и ситуации и которые учитывают как стоимостные, так и временные затраты на производство.

Рассмотрим на примере, как может быть реализован блок оптимизации выбора технологических решений для задач планирования производства на Улан-Удэнском обществе с ограниченной ответственностью «Предприятие «Аэротех». В целях защиты прав интеллектуальной собственности и разработок предприятия, будет представлен структурно фрагмент информационной производственной базы участка предприятия без указания имеющихся конкретных моделей оборудования и средств технологического оснащения. Все расчеты экономических параметров представляются в виде математических моделей и формул, которые в достаточной мере характеризуют технологические решения и дают возможность сравнивать их между собой, но не используются обычно в точных экономических и бухгалтерских расчетах.

Моделирование основных стоимостных затрат на механическую обработку детали может быть выражено суммой основных слагаемых себестоимости механической обработки:

1. Затрат на заработную плату $C_{зп}$, руб.;
2. Затрат на электроэнергию $C_{э}$, руб.;
3. Затрат на амортизацию оборудования, C_a , руб.;
4. Затрат на ремонт и содержание оборудования, C_p , руб.;
5. Затрат на используемые режущие инструменты, $C_{и}$, руб.

В расчетах примем число рабочих дней в году $D = 250$ р.д., средний период стойкости режущего инструмента – 1 час, а стоимость 1 кВт/час – 3 рубля.

На механическом участке «Предприятия «Аэротех» в основном изготавливают шланги и трубопроводы, а также соединительные детали гидравлических систем летательных аппаратов. Конструкция этих деталей содержит ряд симметричных поверхностей и элементов типа «тела вращения» и для их изготовления в основном используются металлорежущие станки токарной группы, которые в большинстве своем представлены недорогими универсальными токарно-винторезными и токарно-револьверными станками, а также отечественными токарными программными станками на базе универсальных. Однако, за последние 10 лет предприятием были закуплены современные импортные программные станки и комплексы Японии, Кореи и Германии. Эти станки отличаются высокими скоростями, производительностью и высокой стоимостью. В силу этих причин детали, которые переводят для обработки на эти центры с одной стороны по времени изготавливаются в несколько раз быстрее, однако благодаря значительному увеличению расходов на амортизацию оборудования, на его ремонт и содержание, а также на используемое дорогостоящее технологическое оснащение стоимостные расходы на производство этих деталей либо снижаются незначительно, либо возрастают.

После заполнения величин времени обработки программа рассчитывает стоимость обработки детали $C_{обр}$. Проанализируем выполненные расчеты. Стоимость минуты работы самая низкая получилась по расчетам на 4-м станке: $C_{мин.} = 3,97$ руб. По времени самая быстрая обработка детали получилась на 3, 5, 7 и 13-м станках: $T_{обр.} = 2$ мин. Самая меньшая стоимость обработки детали также получилась на 4-м станке (универсальном) $C_{обр.} = 29,79$ рублей при времени обработки детали - $T_{обр.} = 7,5$ минут. Проанализируем значения величины минутной прибыли $\Pi_{мин}$, которую мы получим с каждого рабочего места за одну минуту обработки нашей детали:

$$\Pi_{мин} = \Pi_d / T_{обр.},$$

где Π_d - прибыль с детали, руб.

Для определения величины прибыли с детали Π_d мы поступим следующим образом. Предположим, что значение нормы прибыли будет равно 20% от себестоимости. Минимальная себестоимость обработки получается по 4-му варианту: $C_{обр.} = 29,79$ рублей. Тогда прибыль с детали по 4-му варианту равна $\Pi_d = 0,2 \cdot C_{обр.} = 0,2 \cdot 29,79 = 5,96$ рублей. Выше этого значения прибыль брать не будем, так как в противном случае для всех

остальных вариантов ее значение было бы больше, что привело бы к повышению рыночной стоимости детали и в целом всего изделия, что допустить нежелательно. Значит, для всех остальных случаев прибыль с детали будет меньше на величину проигрыша по себестоимости. Из таблицы видно, например, что для первого варианта проигрыш по себестоимости составляет $34,13 - 29,79 = 4,34$ рубля. Тогда Прибыль с детали по первому варианту будет меньше на эту величину, т.е. $\Pi_d = 5,96 - 4,34 = 1,62$ рубля. Аналогично рассчитываются значения прибыли с детали по всем остальным вариантам изготовления. Варианты с отрицательным значением величины прибыли с детали нужно рассматривать как проигрышные. Однако для вариантов 1,2,4,5,6,8,10,11 и 13 прибыль существует. Они могут быть использованы для изготовления детали. Для окончательного анализа выбора лучшего варианта определим величину минутной прибыли $\Pi_{мин}$. Анализ показывает, что минутная прибыль $\Pi_{мин}$ больше не для 4-го варианта, когда деталь обрабатывается на универсальном станке, а для варианта 2 - при обработке детали на программном комплексе стоимостью в 12000 000 рублей. В этом случае деталь будет изготовлена за время $T_{обр.} = 2.9$ минуты (меньше 4-го варианта на $7,5 - 2,9=4,6$ минуты), стоимость ее обработки примерно составит $C_{обр.} = 32,24$ рубля, что больше 4-го варианта на $32,24-29,79=2,45$ рубля.

Таблица

Производственная база механического участка ООО «Предприятие «Аэротех»

№	Наим. об-ния	Модель оборудования	Стоимость оборудования, руб.	Срок амортизации, лет	Мощность оборудования, кВт	Сменность работы	Средняя стоимость инструмента, руб.
1		2	3	4	5	6	7
1		...	300000	3	12	1	300
2		...	1200000	5	25	2	2000
3		...	10000000	7	25	2	2000
4		...	250000	3	10	1	300
5		...	8000000	6	25	2	2000
6		...	400000	3	15	2	300
7		...	12000000	7	20	2	2000
8		...	280000	3	12	1	300
9		...	350000	3	12	1	300
10		...	200000	3	12	1	300
11		...	220000	3	12	1	300
12		...	300000	3	14	1	300
13		...	9500000	7	25	2	2000
14		...	320000	3	12	1	300
№	Период стойкости инструмента, час	Среднее число переточек	Средняя часовая тарифная ставка, руб./час	Средние начисления на зарплату и доплаты, %	Затраты на зп в минуту, руб./мин	Затраты на электроэнергию в минуту, руб./мин	Затраты на амортизацию в минуту, руб./мин
1	8	9	10	11	12	13	14
1	1	4	50	1,8	1,50	0,60	0,83
2	1	4	60	1,8	1,80	1,25	1,00
3	1	4	60	1,7	1,70	1,25	5,95
4	1	4	50	1,8	1,50	0,50	0,69
5	1	4	60	1,7	1,70	1,25	5,56
6	1	4	50	1,8	1,50	0,75	0,56
7	1	4	60	1,8	1,80	1,00	7,14
8	1	3	55	1,7	1,56	0,60	0,78
9	1	3	55	1,8	1,65	0,60	0,97
10	1	3	50	1,8	1,50	0,60	0,56
11	1	4	50	1,8	1,50	0,60	0,61
12	1	4	50	1,8	1,50	0,70	0,83
13	1	4	60	1,9	1,90	1,25	5,65
14	1	3	50	1,7	1,42	0,60	0,89

Продолжение таблицы

	Затраты на ремонт и содержание в минуту, руб./мин	Затраты на реж. инструмент в минуту, руб./мин	Средняя стоимость минуты работы, руб./мин	Смоделированное время обработки, мин.	Стоимость обработки С _{обр.} , руб.	Прибыль с детали П _{д.} , руб.	Прибыль в минуту П _{мин.} , руб.
	15	16	17	18	19	20	21
1	0,33	1,00	4,27	8	34,13	1,62	0,20
2	0,40	6,67	11,12	2,9	32,24	3,51	1,21
3	2,38	6,67	17,95	2	35,90	-0,15	-0,07
4	0,28	1,00	3,97	7,5	29,79	5,96	0,79
5	2,22	6,67	17,39	2	34,79	0,96	0,48
6	0,22	1,00	4,03	8	32,22	3,53	0,44
7	2,86	6,67	19,47	2	38,93	-3,18	-1,59
8	0,31	1,25	4,50	7	31,48	4,27	0,61
9	0,39	1,25	4,86	8	38,89	-3,14	-0,39
10	0,22	1,25	4,13	8	33,02	2,73	0,34
11	0,24	1,00	3,96	9	35,60	0,15	0,02
12	0,33	1,00	4,37	10	43,67	-7,92	-0,79
13	2,26	6,67	17,73	2	35,47	0,28	0,14
14	0,36	1,25	4,51	12	54,13	-18,38	-1,53

Прибыль с детали для второго варианта равна $P_d = 5,96 - 2,45 = 3,51$ рубля. Тогда значение минутной прибыли для варианта 2 будет равно $P_{мин.} = P_d / T_{обр.} = 3,51 / 2,9 = 1,21$ рубля в минуту. Для варианта 4 оно равно $0,79$ руб. /мин. Значит по прибыли, которая учитывает и тот фактор, что вариант 2 производится значительно быстрее экономически выгоднее принять изготовление детали на программном центре (вариант 2). Если сравнить варианты 4 и 2 по условной прибыли за смену, то при таком режиме работы сменная прибыль по четвертому варианту составила бы 379,2 рубля, а по второму варианту 580,8 рубля.

Выводы

Таким образом, внедрение блока оптимизации обоснования выбора решений на машиностроительных предприятиях нашего региона позволит более рационально планировать производство изделий, более грамотно применять при этом дорогостоящее оборудование, экономя при этом значительные средства.

Список литературы

1. Курсовое проектирование по технологии машиностроения / под ред. А.Ф. Горбачевич, В.А. Шкред. – М.: Альянс, 2007.
2. Батурин В.Н. Оптимизация решений в задачах проектирования многономенклатурных производств: монография. – Улан-Удэ: ВСГУТУ, 2012.
3. Батурин Д.В., Батурин В.Н. Обоснование выбора технологических решений в условиях современного развития промышленных предприятий Забайкалья // Вестник ВСГУТУ. – 2015. – № 3. – С. 77–85.
4. Womack J., Jones D. Lean thinking: banish waste and create wealth in your corporation. – New York: Simon & Schuster, 1996.
5. Орлов А.И. Эконометрика: учебник. – М.: Экзамен, 2002. – 576 с.

6. *Womack J., Jones D. Lean solutions: how companies and customers can create value and wealth together.* – New York: Simon & Schuster, 2005. – 368 p.

OPTIMIZATION OF PRODUCTION PLANNING OF PARTS FOR PROFIT

Baturin V.N., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: vn_baturin@mail.ru.

Baturin D. V., Ph.D. student, e-mail: d.v.baturin@yandex.ru

East Siberia State University of Technology and Management, 40V Klyuchevskaya st., Ulan-Ude, 670013, Russian Federation

Abstract

The article presents the company used practical technique justify the selection of technological solutions used to evaluate a number of new criteria, including the level of earnings. The criteria used to account for the complex as a change in the cost of the manufacture of parts and time spent on their treatment. It allows you to justify the transfer of parts for expensive high-performance systems and well-planned production. The technique can be effectively applied in multinomenclature engineering industries. Analyze in detail an example.

Keywords

technological solution, cost modeling, information base, optimization of planning, the level of profits

УДК 621.7:658.51

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*С.И. ПЕТРУШИН, доктор техн. наук, профессор
Р.Х. ГУБАЙДУЛИНА, канд. техн. наук, доцент
(ЮТИ ТПУ, г. Юрга)*

Петрушин С.И. – 652055, г. Юрга, Кемеровской обл., ул. Ленинградская, 26,
Юргинский технологический институт
Национального исследовательского Томского политехнического университета,
e-mail: victory_28@mail.ru

Рассмотрена проблема оптимальной организации жизненного цикла изделий на примере машиностроительной отрасли, в основе которой лежит положение об экономически обоснованном сроке службы изделия. Разработаны принципы и предложены методики оптимизации этапов эксплуатации, проектирования, изготовления и утилизации машины. Показано, что конструкция машины и технология ее изготовления экономически взаимосвязаны через величину максимально возможной прибыли предприятия. Установлено, что изготовление машины должно быть организовано по принципу массового быстросменного производства, а утилизация изделий должна осуществляться заводом-изготовителем и играть роль звена обратной связи. Изложенные в данной работе принципы могут быть положены в основу разработки автоматизированной PLM-системы.

Ключевые слова: организация машиностроения, жизненный цикл изделия, прибыль предприятия, утилизация машины.

Введение

Экономические проблемы последних лет требуют поиска эффективных направлений развития промышленного производства и, прежде всего, машиностроения. Сейчас появился такой комплексный показатель времени существования изделий машиностроения, как «жизненный цикл изделия» (ЖЦИ), который состоит из этапов: проектирование, производство, эксплуатация и утилизация. Введение понятия ЖЦИ связано с разработкой информационных технологий, обслуживающих этапы проектирования и изготовления изделий (CAD/CAM/CAE/PDM-системы) [1]. В то же время приходят к необходимости создания глобальной автоматизированной системы, охватывающей весь ЖЦИ, которая обозначается PLM (Products Lifecycle Management). Существующие подходы к разработке PLM – систем [1 - 4] носят частный характер и не учитывают реальные бизнес - процессы.

Цель данной работы заключается в разработке принципов рациональной организации машиностроительного производства, которые позволят повысить его прибыльность.

Методика

Нами разработан новый путь определения эффективности и оптимальности производства изделий машиностроения, который основан на существовании экономически

обоснованного срока службы машины (ЭОСС) [5]. Он принят в качестве критерия оптимальности на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации изделия.

Согласно предлагаемой концепции [5 - 7], текущие приведенные затраты на эксплуатацию изделия E определяются формулой:

$$E = C(\tau) + \frac{K}{\tau + 1}, \quad (1)$$

где $C(\tau)$ – текущая себестоимость эксплуатации машины, у.е.с./у.е.в. (у.е.с. – условные единицы стоимости; у.е.в. – условные единицы времени эксплуатации τ); K – затраты на приобретение изделия (цена машины), у.е.с..

При прямо пропорциональной зависимости себестоимости от времени эксплуатации уравнение (1) примет следующий вид:

$$E = C_K \tau + \frac{K}{\tau + 1}, \quad (2)$$

где C_K – коэффициент текущих затрат на эксплуатацию, у.е.с/(у.е.в)².

Выражения (1) и (2) имеют минимум удельных приведенных затрат потребителя при определенном сроке эксплуатации изделия T_E , который является ЭОСС. После этого срока эксплуатировать машину становится нерентабельно, и она подлежит замене. Значение T_E определяется из (2) путем приравнивания к нулю первой производной:

$$T_E = \sqrt{K/C_K}, \text{ у.е.в.} \quad (3)$$

Соотношение (3) устанавливает оптимальную связь между ценой изделия и его ЭОСС. Для минимизации издержек потребителя машина должна эксплуатироваться в течение периода, задаваемого выражением (3). Если задан T_E и установлены расходы на эксплуатацию C_K , то для минимизации суммарных затрат производителя и потребителя цена изделия K должна иметь вполне определенную величину, превышение или уменьшение которой приводит к проигрышу либо потребителя, либо производителя вместе с продавцом [7]. Эта цена является оптимальной (справедливой) и ее можно рассчитать по выражению:

$$K_{OPT} = C_K T_E^2 \quad (4)$$

При выполнении условий (3) или (4) экономические интересы потребителя и производителя изделия совпадают, и они задают ограничения для этапа изготовления машины в виде ее справедливой цены и для этапа проектирования изделия, потому что величина C_K определяется конструкцией машины.

Этап проектирования изделия должен быть направлен на обеспечение его ЭОСС и требуемых текущих затрат на эксплуатацию. Оптимальной является конструкция, спроектированная на принципах равнопрочности, равномерного изнашивания и других параметрах, которые обеспечивают равномерное распределение эксплуатационных свойств (равная жесткость, равномерная коррозионная стойкость и др.) [8]. При разработке конструкции машины необходим активный поиск наиболее оптимальной формы деталей, узлов и машины в целом и оптимального распределения физико-механических свойств конструкционного материала. Идеальное изделие может быть спроектировано только путем одновременной оптимизации формы и материала [9]. Это позволяет принудительно ограничить срок службы изделия величиной ЭОСС. Тогда перед потребителем встанет задача своевременного приобретения новой машины, а изготовитель сможет точно планировать объемы и перспективы своего производства.

Результаты и обсуждение

Организация этапа ЖЦИ, которая связана с технологической подготовкой производства, базируется на количестве выпускаемых изделий. Минимально рентабельная программа выпуска оценивается по значению справедливой цены машины [10]:

$$N_{\min} = \frac{2K_M}{C_K T_E^2 - C_M}, \text{ штук} \quad (5)$$

где K_M – первоначальные затраты, необходимые для организации производства новых машин, у.е.с.; C_M – себестоимость изготовления одного изделия, у.е.с..

При $N \geq N_{\min}$ производитель начинает получать прибыль, а при $N = N_{\max}$ изделие снимается с производства. Примем в качестве «морального износа» машины T_M календарный период времени ЖЦИ от момента выпуска первого экземпляра до момента снятия данной модели с производства. Тогда максимальная программа выпуска изделия равна:

$$N_{\max} = T_M / t, \text{ штук} \quad (6)$$

где t – интервал времени, через который периодически производится выпуск изделий (такт выпуска) [11].

Если величины N_{\min} и N_{\max} определены, то на основании формул (5) и (6) величина плановой прибыли предприятия P равна [8]:

$$P = \frac{T_M}{t} \left[\frac{T_M}{2t} (C_K T_E^2 - C_M) - K_M \right]. \quad (7)$$

Из (7) следует, что прибыль предприятия будет возрастать с увеличением разницы между ценой изделия и его себестоимостью, с уменьшением капитальных вложений на организацию производства, с увеличением периода морального износа машины и с уменьшением такта выпуска изделий. Причем два последних пути являются наиболее эффективными, так как величины T_M и t влияют на прибыль во второй степени.

Момент перевода производства на выпуск нового изделия должен совпадать с окончанием периода морального износа выпускаемой машины [12]. Определение величины T_M является важной задачей маркетинговых исследований рынка, так как по ней рассчитывается оптимальная программа выпуска изделия и величина ожидаемой прибыли согласно (6) и (7). В [12] сделан анализ существующих методов перехода на новые модели машины и сделан вывод о необходимости организации этапа изготовления изделий по принципу массового быстросменного производства. Главное отличие этого типа производства заключается в том, что оптимальный срок службы материальной производственной базы должен быть равен периоду морального износа выпускаемого изделия. Тогда разработанный подход для этапа эксплуатации машины полностью применим для функционирования предприятия, где под изделием понимается весь комплекс литейного, кузнечно-прессового, металлорежущего, сборочного, подъемно-транспортного и иного вспомогательного оборудования и оснастки, используемого для изготовления машины определенной конструкции [13]. Это означает применимость формул (1) – (4) для организации перехода на новое изделие. Так оптимальный размер капитальных вложений в производство новой машины равен

$$K_{M.OPT} = S_M T_M^2, \quad (8)$$

где S_M – коэффициент текущих затрат (себестоимости) на обслуживание функционирования нового производства, у.е.с./у.е.в.².

Подставив (8) в (7), получим выражение для расчета прибыли машиностроительной фирмы, которая функционирует в соответствии со сформулированным принципом оптимального перехода на выпуск новой машины (полная замена производственной базы в момент смены изделия):

$$P = \frac{T_M}{t} \left[\frac{T_M}{2t} (C_K T_E^2 - C_M) - S_M T_M^2 \right]. \tag{9}$$

На рис.1 приведены результаты расчетов прибыли по (9) в зависимости от величин T_M и t для следующих условий: цена изделия $C_K T_E^2 = 1000$ у.е.с.; себестоимость изделия $C_M = 800$ у.е.с.; коэффициент текущих производственных затрат $S_M = 10$ у.е.с./ $(\text{у.е.в.})^2$. Из рис. 1 следует, что для каждого значения такта выпуска существует максимум прибыли и соответствующее ему оптимальное значение времени морального износа машины. Для получения максимальной прибыли, необходимо одновременно обеспечить требуемую величину морального износа машины на этапе проектирования и соответствующий ему такт выпуска на этапе изготовления.

Величина максимальной прибыли определится из (9) следующим образом:

$$P_{\max} = \frac{(C_K T_E^2 - C_M)^3}{54 S_M^2 t^4}, \text{ у.е.с.} \tag{10}$$

Из формулы (10) и рис. 1 следует, что наибольший прирост прибыли машиностроительной фирмы обеспечивается при снижении такта выпуска машины, то есть при переходе к массовому быстросменному производству. Для этого производственная база предприятия должна быть разделена на две равноценные части, из которых в данный момент времени функционирует лишь одна, которая выпускает традиционные изделия. В это же время во второй части происходит создание и оснащение производства для выпуска нового изделия с заранее определённым тактом выпуска.

В момент достижения первой машиной морального износа происходит быстрый переход на выпуск новой машины, а прежнее производство подлежит полному демонтажу с последующей организацией производства более перспективного изделия. Основное производство должно состоять из автоматических, роторных линий и автоматизированного оборудования, время работы которых синхронизировано в соответствии с заданным тактом выпуска изделий.

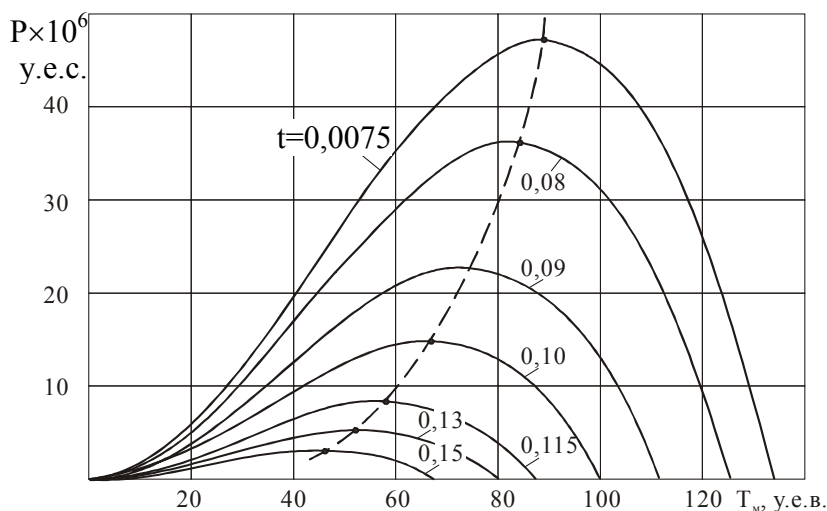


Рис. 1. Влияние периода морального износа машины и такта выпуска на прибыль предприятия

Для устойчивого функционирования основного производства необходимо создание соответствующей материальной базы вспомогательного производства, главная задача которого заключается в проектировании и изготовлении средств технологического оснащения для производства новой машины.

Завершающим этапом ЖЦИ является утилизация машины [14]. Отработавшее свой срок службы изделие должно возвращаться производителю, и подвергаться утилизации на заводе-изготовителе. Это позволит, во-первых, повысить конкурентоспособность продукции, а во-вторых – разрешить экологические проблемы, связанные с выпуском и эксплуатацией данных изделий. Вернув свою изношенную машину, изготовитель имеет возможность получить информацию о закономерностях «физического износа» изделия и определить величину C_E в приведенных выше формулах. Поэтому утилизация играет важную роль обратной связи для замыкания ЖЦИ. На рис.2 приведен пример функционирования замкнутого ЖЦИ.

Все управление ЖЦИ сосредоточено в блоке маркетинга [14, 15]. Главная задача маркетинга заключается в разработке технико-экономического обоснования и технического задания (ТЗ) на проектирование изделия. В его обязанности должны также входить: определение ЭОСС машины T_E , периода морального износа данной конструкции машины T_M , оптимальной программы выпуска изделий N , плановой цены изделия K_{OPT} , лимитов текущих расходов S_M и капитальных вложений в производство, оптимальной величины такта выпуска изделий t , плановой прибыли предприятия P_{max} и других микроэкономических показателей.

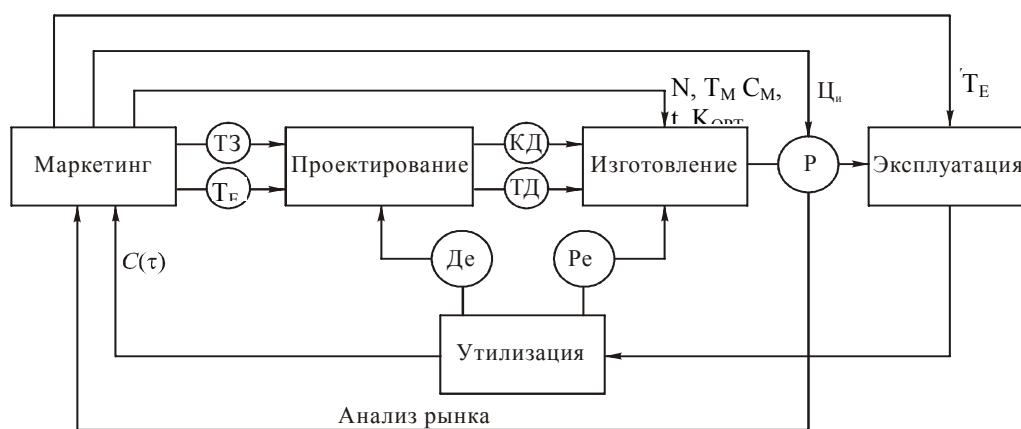


Рис. 2. Структура замкнутого ЖЦИ: ТЗ – техническое задание; КД – конструкторская документация; ТД – технологическая документация; Р – рынок; Де – дефектация; Ре – реновация

Определённая на этом этапе величина T_E должна являться основой для оптимального конструирования машины по критерию равного запаса надёжности и одновременно – рекомендацией для потребителя в техническом паспорте на эксплуатацию изделия (см.рис.2). Цена продажи изделия и её изменение в зависимости от текущей ситуации, основанные на принципах определения справедливой для производителя и потребителя цены, передаётся рынку, а через обратную связь производится её непрерывный мониторинг. Блок маркетинга управляет также стратегическим планированием этапа изготовления, определяя через величину морального износа T_M момент перехода на изготовление нового изделия. Для решения этих задач данный блок получает от службы утилизации оперативную информацию по текущим затратам на эксплуатацию изделия $C(\tau)$.

Этап проектирования содержит блоки CAD/CAM конструкторской и технологической подготовки производства. При этом через обратную связь он получает статистическую информацию о дефектах утилизированных изделий, которая позволяет оперативно вносить изменения в конструкторскую (КД) и технологическую (ТД) документацию (см. рис.2).

На этапе эксплуатации изделие переходит в собственность потребителя. Процесс оптимизации всего ЖЦИ требует постоянной и тесной связи между производителем и потребителем после совершения акта купли–продажи. Это обусловлено, с одной стороны, необходимостью сервисного обслуживания эксплуатируемого изделия, а с другой – вполне понятным стремлением производителя сохранить ранее завоеванные рынки сбыта и не потерять заказчика. Особенно актуальна такая взаимосвязь в момент времени, когда изделие у потребителя выработает свой ЭОСС, и возникает вопрос о его замене.

Служба утилизации изделия проводит также сортировку частей изношенной машины, которые могут быть восстановлены и повторно использованы или переработаны в исходный материал.

Выводы

1. Основой для оптимальной организации машиностроительного производства является экономически обоснованный срок службы изделия, которому соответствует минимум суммарных затрат потребителя и производителя машины.

2. Конструкция машины и технология ее изготовления экономически взаимосвязаны через величину максимально возможной прибыли предприятия.

3. Изготовление машины должно быть организовано по принципу массового быстросменного производства. При этом основное производство должно состоять из двух равноценных попеременно работающих частей, обслуживаемых вспомогательным производством.

4. Утилизация изделий должна осуществляться заводом-изготовителем и играть роль звена обратной связи для превращения всего ЖЦИ в устойчиво функционирующую самоорганизующуюся систему.

5. Изложенные в данной работе принципы могут быть положены в основу разработки автоматизированной PLM-системы.

Список литературы

1. *Zheng Qing-chun, Hu Ya-hui, Lv Hui-juan.* Research on management for manufacturing information and integrated technology oriented to PDM/PLM // *Zuhe jichuang yu zidonghua jiaogong jishu = Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique.* – 2008. – Vol. 7. – P. 84–86.

2. *Трифонов Д.С.* Внедрение PLM – это, прежде всего, наведение порядка на предприятии // *CAD/CAM/CAE Observer.* – 2008. – № 7. – С. 19–21.

3. *Тейлор Д.* PLM-решения для автомобилестроения // *CAD/CAM/CAE Observer.* – 2008. – № 7. – С. 28–29.

4. *Шалумов А.С., Никишин С.И., Носков В.Н.* Введение в CALS-технологии. – Ковров: Изд-во КГТА, 2002. – 137 с.

5. *Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х.* Организация жизненного цикла изделий машиностроения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – 200 с.

6. *Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х.* Оптимизация этапа эксплуатации изделий машиностроения // Вестник машиностроения. – 2010. – № 7. – С. 68–72.
7. *Амелькин С.А., Логунова Н.Ю., Прокопьев Е.А.* Определение оптимального срока использования оборудования // Автоматизация и современные технологии. – 2006. – № 10. – С. 3–7.
8. *Petrushin S.I., Gubaydulina R.X., Grubiy S.V.* Optimization of products life cycle // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 770. – P. 662–669.
9. *Petrushin S.I., Gubaydulina R.X.* New principles of mechanical engineering organization // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST–2012): Proceedings: in 2 vol., Tomsk, 18–21 September 2012. – Tomsk, 2012. – Vol. 2. – P. 129–132.
10. *Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х.* Определение оптимальной программы выпуска изделий машиностроения // Вестник машиностроения. – 2011. – № 2. – С. 80–85.
11. Технология машиностроения. В 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения / под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 1997. – 564 с.
12. *Губайдулина Р.Х., Петрушин С.И.* Организация перехода на производство нового изделия // Организатор производства. – 2015 – № 1 (64). – С. 90–95.
13. *Петрушин С.И.* Выбор оптимальной технологии изготовления изделий машиностроения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 182 с.
14. *Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х.* Утилизация как замыкающий этап жизненного цикла изделия машиностроения // Вестник машиностроения. – 2012. – № 9. – С. 82–85.
15. Расчеты экономической эффективности новой техники: справочник / под ред. К.М. Великанова. – Л.: Машиностроение, 1990. – 448 с.

MAIN PRINCIPLES OF APPROPRIATE ORGANIZATION OF MECHANICAL ENGINEERING PRODUCTION

Petrushin S.I., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: psi@tpu.ru
Gubaidulina R.H., Ph.D. (Engineering), Associate Professor

Yurga Institute of Technology, TPU Affiliate, 26 Leningradskaya st., Yurga, 652055, Russian Federation

Abstract

The problem of optimal organization of the life cycle of products in the engineering industry, which is based on the provision on reasonable life of the product. Developed principles and proposed methods of optimization stages of exploitation, design, manufacture and recycling machine. It is shown that the machine design and technology of its manufacture is economically interconnected through the maximum possible profit of the enterprise. It is established that the machine manufacturer should be organized on the principle of quick mass production, and disposal of products should be carried out by the manufacturer and to play the role of a feedback loop. Set out here the principles can be the basis for the development of an automated PLM system.

Keywords

Management in machinery manufacturing, product lifecycle, business profits, disposal of machinery

УДК 629.932

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ**

*А.М. МАРКОВ, доктор техн. наук, профессор
М.И. МАРКОВА, канд. техн. наук, доцент
О.Б. ДРОНОВА, канд. экон. наук, доцент
(АлтГТУ, г. Барнаул)*

Дронова О.Б. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: suholga.08@mail.ru

В условиях внедрения нового изделия и отсутствия полностью разработанной технологической документации вызывает сложность разработки календарно-плановых нормативов (КПН), позволяющих произвести взаимную увязку календарных планов и согласование работы взаимосвязанных рабочих мест. В условиях серийного производства используются оптимальный размер партии и показатели распределения годовой производственной программы завода по плановым периодам, по результатам которых составляется поддетальная месячная производственная программа цехов, график запуска и выпуска партий деталей, поддетально-пооперационный календарный план-график. В мелкосерийном производстве целесообразно принять размер партии деталей равным сменному заданию. В работе представлена методика определения очередности запуска групп деталей в производство в течение смены. При этом группирование деталей производится на основании присвоенного им кода ЕСКД, а размер партий групп соответствует сменному заданию.

Ключевые слова: группы деталей, размер партии, последовательный запуск групп деталей в производство, параллельно-последовательный запуск групп деталей в производство.

Введение

Вопросы управления технологической подготовкой производства при широкой номенклатуре изделий предприятия в условиях быстрой сменяемости продукции машиностроения являются актуальными и их решение позволяет предприятию эффективно и обоснованно перераспределять свои ресурсы [1, 2]. Особенно значимой становится роль технологической подготовки производства в ситуации внедрения нового изделия [3, 4]. На этом этапе для плановых служб предприятия возникает существенное множество задач, которые необходимо выполнить с минимальными потерями времени. Помимо разработки технологических процессов (ТП), проектирования технологической оснастки и ее изготовления, выверки и отладки спроектированной технологии и изготовленного технологического оснащения необходимо проводить оперативно-календарное планирование, основой которого являются КПН, позволяющие произвести взаимную увязку календарных планов и согласование работы взаимосвязанных рабочих мест, участков, цехов и обеспечивающие наиболее эффективное использование оборудования, материальных и денежных ресурсов предприятия. Рассчитанные оптимальный размер партии и результаты распределения годовой производственной программы предприятия по плановым периодам используются для

составления подетальной месячной производственной программы цехов, графика запуска и выпуска партий деталей, подетально-пооперационного календарного плана-графика.

Естественно, производственная программа каждого планового периода может быть выполнена лишь в рамках имеющихся фондов времени оборудования, трудовых и других ресурсов.

В данной работе решена задача определения периодичности запуска групп деталей в производство на основании присвоенного им кода ЕСКД. При этом размер партий групп соответствует сменному заданию.

Теория и методы

При разработке методики запуска деталей в производство всем обрабатываемым и вновь вводимым деталям присваивается код ЕСКД, по которым они группируются.

Группа деталей с одним кодом ЕСКД имеет один маршрут обработки.

При составлении сменного задания преследуется цель определения очередности запуска партий деталей из различных классификационных групп по имеющемуся на участке оборудованию.

Рассмотрим ситуацию, когда маршруты механообработки деталей разных квалификационных групп совпадают. Алгоритм определения очередности запуска-выпуска групп деталей по станкам предполагает два основных варианта. Выбор варианта запуска основан на установлении того варианта, при котором производственный цикл механообработки будет минимальным. И в первом и во втором варианте передача деталей с операции на операцию осуществляется в размере сменного задания. Это позволяет сократить время на транспортировку между операциями и производственный цикл обработки.

Первый вариант запуска – последовательный запуск групп деталей. Предварительно группы деталей ранжируются по трудоемкости обработки: первой в запуск идет самая трудоемкая деталь, потом менее трудоемкая и т.д. (рисунок 1).

Последовательный вариант предполагает, что сначала одна партия (самой трудоемкой детали) запускается в производство сразу на все имеющееся оборудование на операции, потом после переналадки – другая и т.д.

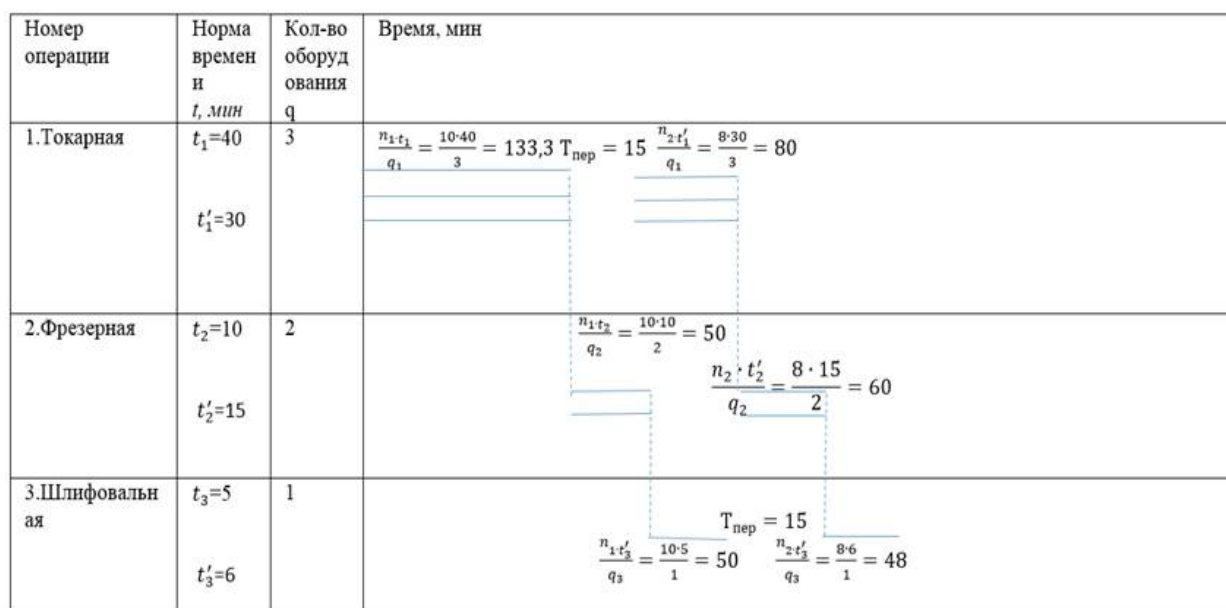


Рис. 1. Последовательный запуск групп деталей в производство

В этом случае длительность производственного цикла обработки всех групп деталей определяется по формуле:

$$T_{\text{пр}} = (k * n_{\text{max}} - n_{\text{max}}) * \left(\frac{t_m}{q_m}\right)_{\text{max}} + n \left(\frac{t_1}{q_1} + \frac{t_2}{q_2} + \dots + \frac{t_m}{q_m}\right) + T_{\text{пер}} * m, \quad (1)$$

где n_{max} – максимальное сменное задание по группе деталей; k – количество групп;

$\left(\frac{t_m}{q_m}\right)_{\text{max}}$ – операционный цикл максимальной продолжительности;

$\left(\frac{t_1}{q_1} + \frac{t_2}{q_2} + \dots + \frac{t_m}{q_m}\right)$ – сумма самых продолжительных по времени операционных циклов из каждого ТП закрепленных k -тых групп. Например, самая продолжительная токарная из всех токарных, самая продолжительная фрезерная и т.д. – в результате получается скомпонованный ТП.

m – максимальное количество операций в скомпонованном техпроцессе;

$T_{\text{пер}}$ – время на переналадку при переходе с обработки одной партии деталей на другую.

Второй вариант – параллельно-последовательный запуск групп деталей.

Здесь возможны также несколько вариантов запуска групп на отдельную операцию в зависимости от количества оборудования на данной операции.

а) Если количество оборудования на операции ТП равно количеству групп. Он предполагает, что партии различных групп деталей запускаются в производство параллельно: на каждую единицу оборудования назначаются детали из разных групп. Например, как на фрезерной операции на рисунке 2.

б) Если количество оборудования на операции ТП больше количества групп. Деталь, имеющая самый продолжительный операционный цикл, запускается на большее количество оборудования так, чтобы оставшееся количество станков было равно оставшемуся числу групп. Для самой трудоемкой детали организация аналогично первому варианту запуска. Оставшиеся группы запускаются как в варианте (а), т.е. по группе на станок. Например, как на токарной операции на рисунке 2.

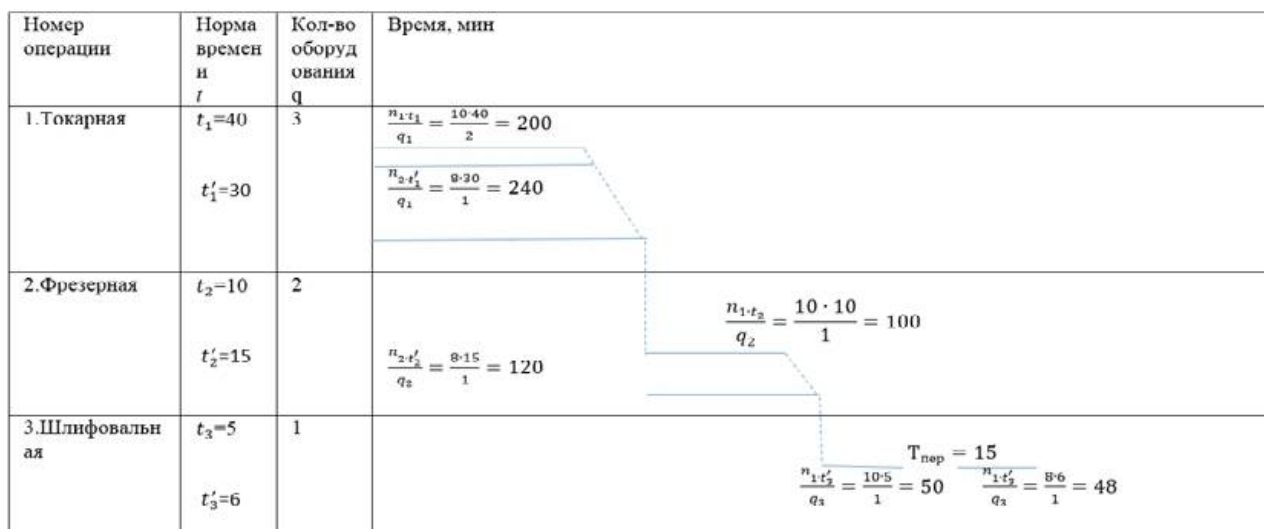


Рис. 2. Параллельно-последовательный запуск групп деталей в производство

в) Если количество оборудования на операции менее количества групп, то организация аналогична первому варианту запуска. Деталь, имеющая самый продолжительный операционный цикл, запускается первой на имеющееся количество оборудования. Остальные детали запускаются после переналадки.

г) Если на операции одна единица оборудования то, как и в предыдущем варианте партии запускаются последовательно после предварительной переналадки. Например, как на шлифовальной операции на рисунке 2.

Результаты и обсуждение

На основании методики запуска групп деталей в производство была разработана программа для расчета длительности производственного цикла обработки при последовательном запуске деталей. Созданный макрос на VBA, встроенной в Office Excel, позволяет определить продолжительность обработки групп деталей, входящих в сменное задание. На рисунке 3 представлен лист Excel с исходными данными: количеством оборудования по операциям, количеством деталей в группах, нормам времени по операциям, временем переналадки станка при переходе от обработки партии одной группы деталей к другой.

	1	2	3	4	5
1	Исходные данные:				
2	Количество операций	3	Токарная	Фрезерная	Шлифовальная
3	Количество станков		3	2	1
4	Количество деталей в группе:				
5	Деталь 1	10			
6	Деталь 2	12			
7	Время обработки:				
8	Деталь 1		5	7	10
9	Деталь 2		4	5	7
10	Время переналадки				
11	Деталь 1		2	3	4
12	Деталь 2		1	2	2
13	Размер партии для транспортиро	1			

Рис. 3. Исходные данные для расчета длительности цикла

На рисунке 4 представлен графический расчет длительности производственного цикла обработки. Его можно определить по продолжительности интервала в столбце 1 (каждая ячейка Excel представляет собой одну минуту), вдоль которого автоматически заполняются отрезки – продолжительности обработки партий всех групп деталей, входящих в сменное задание. Изменяя исходные данные макрос позволяет интерактивно перестраивать длины отрезков и соответственно пересчитывать продолжительность цикла.

деталей. В любом случае деталь, имеющая самый продолжительный операционный цикл, запускается первой на имеющееся оборудование.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Текущее время	П (-) - перенала дка; Номер- номер группы	Номер детали из группы	Деталь 1	Деталь 2	Токарный2	Деталь 1	Деталь 2	Токарный3	Деталь 1	Деталь 2	Фрезерный1	Деталь 1	Деталь 2	Фрезерный2	Деталь 1	Деталь 2	Шлифов.1	Деталь 1
Время	Токарный1	Деталь 1	Деталь 2	Токарный2	Деталь 1	Деталь 2	Токарный3	Деталь 1	Деталь 2	Фрезерный1	Деталь 1	Деталь 2	Фрезерный2	Деталь 1	Деталь 2	Шлифов.1	Деталь 1	Де
0	-1				-1					-1								
1	-1				-1					-1								
2	1	1			1	2			1	3								
3	1	1			1	2			1	3								
4	1	1			1	2			1	3								
5	1	1			1	2			1	3								
6	1	1			1	2			1	3								
7	1	4			1	5			1	6	-1			-1				
8	1	4			1	5			1	6	-1			-1				
9	1	4			1	5			1	6	-1			-1				
10	1	4			1	5			1	6	1	1		1	2			
11	1	4			1	5			1	6	1	1		1	2			
12	1	7			1	8			1	9	1	1		1	2			
13	1	7			1	8			1	9	1	1		1	2			
14	1	7			1	8			1	9	1	1		1	2			
15	1	7			1	8			1	9	1	1		1	2			
16	1	7			1	8			1	9	1	1		1	2			
17	1	7			1	8			1	9	1	1		1	2			
18	1	7			1	8			1	9	1	1		1	2			
19	1	7			1	8			1	9	1	1		1	2			
20	1	10			-2				-2		1	3		1	4			-1
21	1	10			2			1	2		2	1	3		1	4		-1
22	1	10			2			1	2		2	1	3		1	4		-1
23	1	10			2			1	2		2	1	3		1	4		-1
24	1	10			2			1	2		2	1	3		1	4		1
25	2				2			4	2		5	1	3		1	4		1
26	2		3		2			4	2		5	1	3		1	4		1
27	2		3		2			4	2		5	1	3		1	4		1
28	2		3		2			4	2		5	1	3		1	4		1
29	2		3		2			6	2		7	1	5		1	6		1
30	2		3		2			6	2		7	1	5		1	6		1
31	2		3		2			6	2		7	1	5		1	6		1
32	2		3		2			6	2		7	1	5		1	6		1
33	2		3		2			6	2		7	1	5		1	6		1

Рис. 4. Графический расчет длительности производственного цикла обработки семенного задания

Выводы

Установлено, что возможны несколько вариантов запуска групп на отдельную операцию в зависимости от количества оборудования на данной операции. Можно выделить два основных варианта – последовательный и параллельно-последовательный запуск групп

Методика определения периодичности запуска групп деталей в производство на основании присвоенного им кода ЕСКД прошла апробацию на примере участка валов, оборудование которого расположено по ходу следования техпроцесса (токарное, фрезерное, шлифовальное). При этом размер партий групп соответствовал сменному заданию и использовался последовательный вариант запуска групп на отдельную операцию.

Список литературы

1. Дронова О.Б. Методические основы планирования ресурсов организации при процессном подходе к управлению // Вестник Алтайской науки. – 2014. – № 2/3. – С. 249–254.
2. Марков А.М., Маркова М.И., Плетнева Е.М. Алгоритм проектирования группового технологического процесса механической обработки деталей // Обработка металлов (технология, оборудование инструменты). – 2012. – № 4 – С. 5–9.
3. Марков А.М., Маркова М.И., Дронова О.Б. Определение прогнозной трудоемкости изделий на основе квалиметрического анализа деталей // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 126–131.

4. *Маркова М.И., Марков А.М.* Оценка качества технологических операций механической обработки // Управление качеством образования, продукции и окружающей среды: материалы VIII всероссийской научно-практической конференции. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2014. – С. 83–85.

TECHNOLOGICAL PREPRODUCTION FOR MECHANICAL WORKING

Markov A. M., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: andmarkov@inbox.ru

Markova M. I., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: margarita-markova@inbox.ru

Dronova O. B., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: suholga.08@mail.ru

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

Abstract

The serial machinery use the optimal size of the party and the plant's annual production program distribution figures for the planning period, the results of which are compiled detailed monthly production program of workpiece, launch schedule and release lots of details, exploded-out functional calendar schedule. In small-scale production it is advisable to take a lot size of parts equal to the job change. The paper presents a method of determining the priority of launching groups of parts in mechanical working during the shift. This grouping is based on details of their assigned ESKD code, and the size of lots of groups corresponds to job change.

Keywords

group of parts, batch size, start serial groups of pieces in mechanical working, launch serializer groups of pieces in mechanical working.

УДК 338.32.053.3:681.3.06

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МЕТОДА СПРАВЕДЛИВОЙ ЦЕНЫ ОПЦИОНА****С.В. ЛУКИНА, доктор техн. наук, профессор
(МГТУ «СТАНКИН», г. Москва)**

Лукина С.В. – 127055, г.Москва, Вадковский переулок, 1,
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
e-mail: lukina_sv@mail.ru

Рассматривается методика моделирования и исследования эффективности инновационной деятельности промышленного предприятия с использованием метода справедливой цены опциона. Под опционом принят комплекс инновационных мероприятий по внедрению в производственную структуру предприятия вычислительных, автоматизационных и информационно–коммуникационных средств, обусловленных использованием цифровых технологий и производств, позволяющих повысить эффективность производственных процессов, качество и конкурентоспособность выпускаемой продукции. Структуризация методики представлена системой многослойных граф-моделей, объединяющих формирование исходной информации; конфигурирование вариантов опциона; формирование совокупности технико-экономических, производственных и финансовых критериев.

Ключевые слова: промышленное предприятие, инновационная деятельность, метод справедливой оценки опциона, математическая модель, граф-модель.

Введение

В настоящее время уровень технического и технологического развития предприятий, их конкурентоспособность в значительной степени определяется степенью автоматизации и информационно–коммуникационной оснащенности производственных процессов и производств [1,3, 11-13].

Сложность задачи производственного управления в этом случае определяется необходимостью выявления и установления большого количества сложных взаимосвязей между параметрами производственных процессов, средств технологического оснащения технологических операций и параметрами оценки эффективности производственной деятельности промышленных предприятий с учетом динамически изменяющихся факторов внешней среды [4-6]. Центральной задачей при этом является процедура синтеза вариантов решения проблемы с последующей оценкой альтернатив по выбранным критериям с учетом принятых ограничений [6-9].

Целью работы является повышение эффективности разработки проектных решений в области автоматизации и информационно – коммуникационной оснащенности производственных процессов и производств путем моделирования и исследования инновационной деятельности промышленного предприятия с использованием метода справедливой цены опциона.

Постановка задачи

Экономический эффект от внедрения автоматизационных и информационно-коммуникационных средств можно разделить на прямой и косвенный. Под прямой экономической эффективностью следует понимать экономию материально-трудовых ресурсов и повышение уровня качества произведенной продукции, полученные от оптимизации производственной деятельности предприятия. Косвенная эффективность достигается оптимизацией внепроизводственной деятельности предприятия, определяющей сокращение затрат на функции управления предприятием. В рамках данной работы рассматривается моделирование и исследование прямой экономической эффективности.

Структура разработанной методики моделирования и исследования производственной деятельности промышленного предприятия определена в виде гипер-графа [6], каждое ребро которого характеризует множество слоев процессов разработки, реализации и оценки инновационного решения, а глубина каждого слоя - совокупность способов решения рассматриваемой задачи (рис.1).

Укрупнено производственная деятельность предприятия может быть определена технической подготовкой производства (ребро v_1 гипер-графа), характеризующей разработку мероприятий по улучшению качественных характеристик выпускаемой продукции, подготовке и формированию комплекса технических и технологических средств автоматизации ее изготовления (вершины v_{11}, \dots, v_{1n} гипер-графа); совокупностью технологических процессов изготовления продукции (ребро v_2 гипер-графа), основанных на эксплуатации средств оснащения технологических операций (вершины v_{21}, \dots, v_{2n} гипер-графа); комплексом внутри- и внепроизводственных логистических мероприятий, обеспечивающих выполнение производственных заданий (ребро v_3 гипер-графа).

Эффективность производственной деятельности промышленного предприятия может быть определена методом справедливой оценки опциона (Real Option Valuation, ROV) [2,14,15], позволяющим исследовать весь комплекс проводимых мероприятий в течение жизненного цикла инновации. Тогда инвестиционную стоимость предприятия следует рассчитывать по выражению:

$$C_{ин} = C_{пр} + C_{опц}, \quad (1)$$

где $C_{пр}$ - стоимость предприятия без учета стоимости опциона; $C_{опц}$ - стоимость опциона.

В рамках данной работы под опционом принят комплекс инновационных мероприятий по внедрению в производственную структуру вычислительных, автоматизационных и информационно-коммуникационных средств, позволяющих повысить эффективность производственных процессов, качество и конкурентоспособность выпускаемой продукции.

При исследовании модели (1) в работе принято допущение, согласно которому на начальных этапах принятия решения стоимость $C_{пр}$ является величиной постоянной, влияющей только на абсолютное значение $C_{ин}$, и не влияет на выбор варианта развития опциона [2].

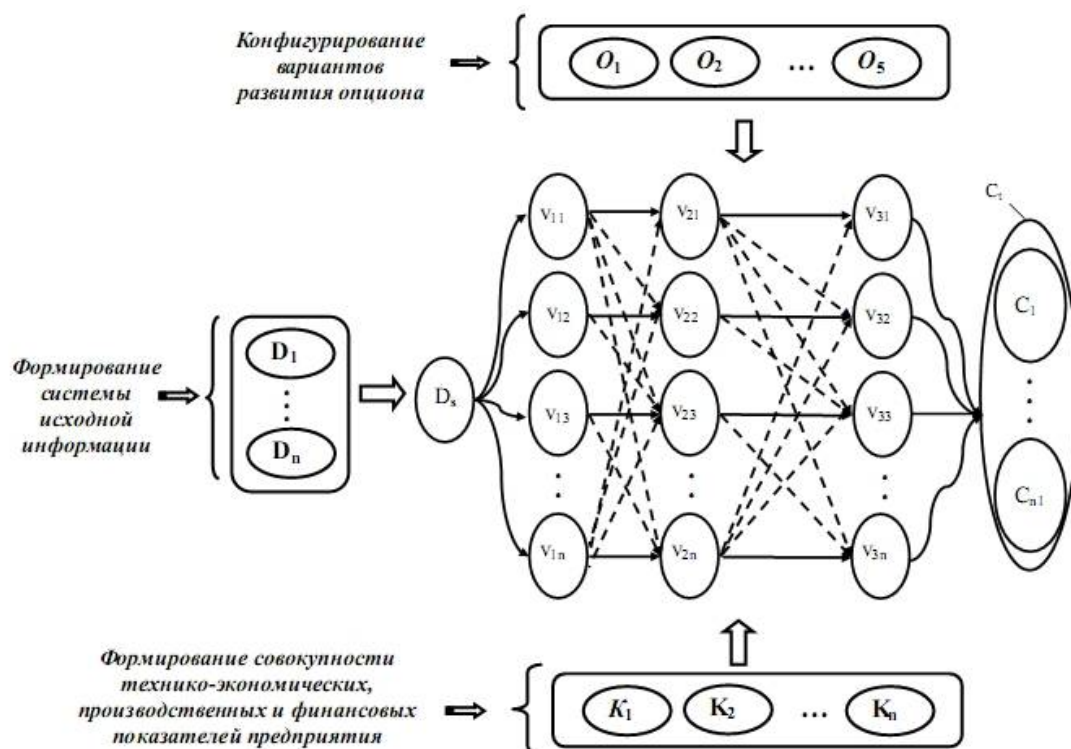


Рис.1. Гипер-граф

При выборе решений рассматривались следующие варианты развития опциона (ребро O гипер-графа):

- опцион на развитие, добавляющий ценность исследуемому предприятию, так как позволяет получить дополнительную прибыль (опцион CALL) (вершина O_1);
- опцион на тиражирование опыта деятельности, показывающий возможность использования предшествующего опыта в будущих проектах развития предприятия (вершина O_2);
- опцион на отсрочку начала проекта, определяющий возможность отложить инвестиции до получения новой информации, необходимой для принятия взвешенного решения (вершина O_3);
- опцион на сокращение и на выход из бизнеса в случае убыточности предприятия (опцион PUT) (вершина O_4);
- опцион на переключение и временную остановку бизнеса в случае действия совокупности неблагоприятных факторов (вершина O_5).

В своей базовой постановке стоимость опциона CALL определяется моделью Блэка-Шоудза [2]:

$$C_{опц} = PN(d_1) - Se^{-rt}N(d_2), \quad (2)$$

где P - стоимость активов предприятия; S – цена исполнения опциона; t - время исполнения опциона; r - безрисковая процентная ставка; e – экспонента (2,7183); σ - среднее квадратичное отклонение стоимости активов предприятия.

$$\text{Здесь: } d_1 = \frac{\ln\left(\frac{P}{S}\right) + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right)t}{\sigma\sqrt{t}}, \quad d_2 = d_1 - \sigma\sqrt{t}.$$

Модель (2) реализуется для следующих допущений:

- цена активов предприятия является непрерывной величиной;
- среднеквадратичное отклонение известно и не меняется в течении жизни опциона;
- подлежащий актив (проект автоматизации и информатизации предприятия) не торгуется открыто на рынке.

Рассмотрим предметную направленность ребер гипер-графа. Формирование системы исходной информации (ребро D) в общем случае объединяет группы параметров элементов производственной системы предприятия, доступных для использования в рамках действующих или проектируемых процессов, таких как: исходная информация по обрабатываемым деталям; базы данных по существующим средствам оснащения на предприятии (база данных станочного оборудования, номенклатуры инструмента и приспособлений) и коэффициентам их загрузки; базы данных по существующим технологическим процессам; существующая среда технической поддержки производства; САД/САМ/САЕ-инструменты 3D-моделирования; САПР ТП, АСУПП и т.д.; информация по свободным оборотным средствам предприятия и т.д.[8]: $D = \bigcup_i^{n_D} D_i$.

Множество возможных вариантов инновационных решений (ребро v) моделируется совокупностью обходных путей графа, формируемых при последовательных переходах между слоями от ребра D_s , содержащего исходную информацию, к ребру C_t , характеризующему выбор оптимального варианта инновационного решения [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^m v_{ij} = 1, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \\ \sum_{i=1}^n v_{ij} = 1, \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\} \\ v_{ij} = \{0, 1\}, \quad (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}) \end{array} \right. \quad (3)$$

Сформированная математическая модель (3) определена на множестве Булевых переменных и может быть реализована использованием методов линейного программирования.

Выбор эффективного инновационного решения следует осуществлять на основе анализа совокупности оценочных критериев (ребро K), определяющих технико-экономические, производственные и финансовые показатели промышленного предприятия [6,7,8], а так же частные показатели качества и конкурентоспособности объектов производства с учетом заданного варианта опциона.

Выводы

В результате проведенных исследований сформирована методика моделирования и исследования эффективности производственной деятельности промышленного предприятия, адаптированная для оценки проектных инновационных решений по автоматизации производства.

Основу методики составляет гиперграф, характеризующий этапы разработки, реализации и оценки инновационных решений, с учетом заданного варианта опциона.

Список литературы

1. Волкова Г.Д. Когнитивное моделирование в техносфере // Вестник МГТУ Станкин. – 2014. – № 1 (28). – С. 148–151.
2. Ковалев В.В. Введение в финансовый менеджмент. – М.: Финансы и статистика, 1999. – 168 с.
3. Косов М.Г. Современные подходы к осмыслению понятия «техническое» // Вестник МГТУ Станкин. – 2014. – № 1 (28). – С. 156–159.
4. Лукина С.В. Методика оптимизации производственной деятельности промышленного предприятия на основе комплекса прогностических моделей формирования и выбора проектных инновационных решений в области высокотехнологичных производств // Вестник МГТУ Станкин. – 2015. – № 1 (32). – С. 125–129.
5. Лукина С.В. Прогностическое моделирование проектных инновационных решений по конфигурации средств оснащения высокотехнологичных производств // Инновации. – 2015. – № 8. – С. 68–71.
6. Лукина С.В. Разработка комплекса прогностических моделей формирования и выбора проектных инновационных решений в области высокотехнологичных производств // Актуальные проблемы машиностроения. – 2015. – № 2. – С. 451–456.
7. Лукина С.В., Гирко В.В. Методика автоматизированного синтеза инновационных управленческих решений // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2013. – Т. 5, № 1 (15). – С. 242–250.
8. Лукина С.В., Гирко В.В. Методика формирования и выбора управленческих решений по совокупности частных критериев оценки эффективности производственной деятельности промышленного предприятия // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – С. 320.
9. Методика сравнительной стоимости и качества инновационных решений на проектных этапах жизненного цикла высокотехнологичных изделий машиностроительного производства / С.В. Лукина, М.В. Крутякова, Н.П. Соловьева, В.В. Гирко // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2012. – Т. 2, № 2. – С. 118–124.
10. Лукина С.В., Макаров В.М., Крутякова М.В. Оптимизация стоимости инновационных решений на проектных этапах жизненного цикла высокотехнологичных изделий машиностроения // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 324–330.
11. Макаров В.М., Лукина С.В. Автоматизация как метод эффективного техпереворужения предприятия // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии, Модернизация. – 2012. – № 6 (74). – С. 10–13.
12. Макаров В.М., Лукина С.В. Научоемкий инжиниринг в задачах техпереворужения // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2013. – № 8 (86). – С. 16–20.
13. Макаров В.М., Лукина С.В. Программы развития – экспертный подход // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2014. – № 9 (97). – С. 19–23.
14. Smit J.T.J., Silvius A.J.G. Dynamic investment planning: valuing intuition in the new economy // Proceedings of 4th European Conference on Software Measurement and ICT Control, FESMA-DASMA. – Heidelberg, Germany, 2001. – P. 186–192.
15. Smit Han T.J., Trigeorgis L. Strategic investment: real options and games. – Princeton: Princeton University Press, 2004. – 504 p. – ISBN 9780691010397.

**RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF THE INNOVATIVE ACTIVITY
OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISES WITH THE USING OF THE METHOD
OF REAL OPTION VALUATION**

Lukina S. V. D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: Lukina_sv@mail.ru

Moscow State University of Technology «Stankin», 1 Vadkovsky per., Moscow, 127055, Russian Federation

Abstract

The technique of modeling and study of production activity of the industrial enterprise using the method of Real Option Valuation (ROV). Option is a complex of an innovative solutions for implementation in the industrial enterprise structure of the computer technologies, the automation and the of information and the communication tools, arising from the use of digital technologies and mashines. It allows to increase efficiency of productions, quality and competitiveness of products. Structurization of a complex is presented by system of the multilayered graph-models uniting formation of initial information; configuration options of the option; formation of set of technical and economic, production and financial criteria.

Keywords

industrial enterprise, innovative activities, method of Real Option Valuation (ROV), mathematical model, graph-model

УДК 621.7

**ИНТЕРАКТИВНАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА – ВИРТУАЛЬНЫЙ
ТРЕНАЖЕР «ЛИСТОВАЯ ПРОКАТКА»**

*Л.В. РАДИОНОВА, канд. техн. наук, доцент
А.Д. ЧЕРНЫШЕВ, аспирант
Р.А. ЛИСОВСКИЙ, магистрант
(ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск)*

Чернышев А.Д. – 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76,
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет),
e-mail: fis6en@gmail.com

В статье приведен опыт по применению современных компьютерных технологий для повышения уровня и качества образования при подготовке специалистов для машиностроительной и металлургической отрасли. Используя программы Unity3D, SolidWorks и Visual Studio, был создан интерактивный виртуальный тренажер «Листовая прокатка». В статье приведено краткое описание модулей, входящих в состав тренажера, а именно: «Основные положения», где доступно и систематизировано дана информация по теории и технологии листовой прокатки; модуль механика «Листовой прокатный стан», позволяющий изучить оборудование стана холодной прокатки листа; модуль технолога «Холодная листовая прокатка», в основе которого лежит математическая модель процесса холодной листовой прокатки, обеспечивающая возможность проведения аналитических исследований, а также модуль «Проверка знаний», в составе которого задачи и тесты, позволяющие получить объективную информацию об уровне полученных знаний.

Ключевые слова: прокатный стан, холодная листовая прокатка, интерактивная образовательная система, виртуальный тренажер, Unity3D, SolidWorks, Visual Studio.

Введение

С развитием компьютерных технологий все больше возможностей появляется для создания интерактивных виртуальных лабораторных стендов, установок и тренажеров. Использование таких технологий в ходе обучения позволяет не только уменьшить финансовые затраты, но и повысить привлекательность образовательного процесса [1]. Кроме того, дифференцированное, органичное и осознанное использование как виртуальных лабораторных стендов, так и реальных лабораторных стендов позволяет оптимизировать и интенсифицировать учебный процесс. Однако нужно отметить, что использование интерактивных лабораторных установок должно быть дифференцированным и в коем случае не замещать в полном объеме реальные лабораторные и практические занятия. Для овладения всеми необходимыми знаниями и умениями, студент должен иметь возможность работать с реальными объектами. Там же, где в силу объективных причин нет такой возможности, из-за масштабов оборудования, сложности и опасности процессов, вполне целесообразно прибегнуть к симуляции реальных объектов.

В учебных планах технических ВУЗов, колледжей и техникумов готовящих специалистов в области металлургического машиностроения большое внимание уделяется

курсам «Металлургическое оборудование» и «Металлургические технологии». Одним из ключевых объектов который изучают в рамках данных курсов является стан холодной листовой прокатки. Традиционно для понимания принципа работы, устройства, энергетических показателей стана на лекционных и практических занятиях используется учебно-методическая литература, схемы, слайды и фильмы. Это обусловлено тем, что многие образовательные учреждения не могут себе позволить иметь в распоряжении действующий прокатный стан по различным причинам.

С целью повышения уровня обеспеченности образовательных учреждений лабораторной и практической базой путем внедрения инновационных разработок был создан интерактивный виртуальный тренажер «Листовая прокатка», который призван повысить качество подготовки специалистов для машиностроительной и металлургической отраслей.

Описание интерактивного виртуального тренажера «Листовая прокатка»

Интерактивный виртуальный тренажер «Листовая прокатка» (рис. 1) базируется на данных реально действующего стана «1700» холодной прокатки. Тренажер состоит из двух основных модулей: модуль тренажера механика «Листовой прокатный стан» и модуля технолога «Холодная прокатка стали», а также включает в себя основные положения теории и технологии листовой прокатки и контроль полученных знаний.

В качестве среды разработки для реализации проекта были использованы SolidWorks для отрисовки составляющих стана холодной прокатки и система разработки 3D приложений Unity3D совместно с Visual Studio для написания программного обеспечения проекта.

Модуль «Листовой прокатный стан» является тренажером для изучения оборудования. Этот модуль позволяет изучать принцип действия, детали и узлы оборудования, а также отрабатывать навыки сборки/разборки прокатной клетки и главной линии листового прокатного стана. В составе тренажера присутствуют чертежи валков, станин, муфт, шпинделей, шестеренных клеток, подшипников качения и других составляющих главной линии прокатного стана.

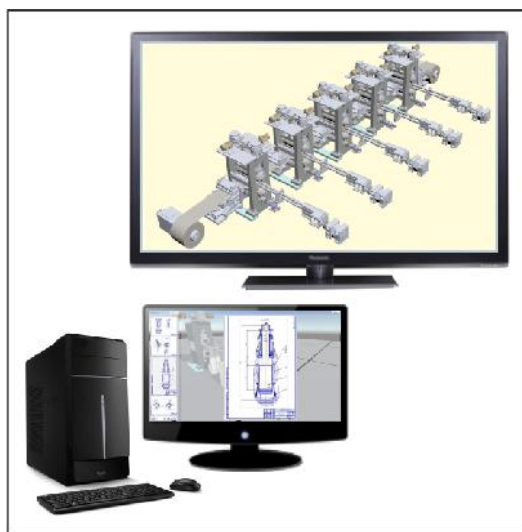


Рис.1. Внешний вид тренажера «Листовая прокатка»

Модуль «Холодная листовая прокатка» предназначен для изучения технологического процесса. Этот модуль позволяет исследовать влияние технологических параметров листовой прокатки на энергосиловые параметры процесса, физико-механические свойства и геометрические характеристики листа. Позволяет визуально оценить изменение формы и размеров металла в процессе деформации и предоставляет информацию в наглядном и удобном для анализа виде: графики, таблицы, эскизы.

Кроме того, в составе тренажера присутствуют модули, в которых удобной для изучения форме, представлен теоретический материал, касающийся оборудования и технологических основ холодной листовой прокатки, и контроль знаний в виде тестовых заданий, контрольных вопросов и задач.

Следует отметить, что виртуальный интерактивный тренажер для образовательных целей должен быть максимально реалистичен. В данном случае это достигнуто благодаря использованию справочной литературы [2-6], отрисовкой компонентов в соответствии с ГОСТ и использованию хорошо зарекомендовавшей себя математической модели технологического процесса для расчет энергосиловых показателей процесса и геометрических показателей прокатываемой полосы [7]. Что не менее важно виртуальный интерактивный тренажер сопровождается подробными методическими указаниями по проведению практических работ с его использованием.

Описание интерфейса и модулей тренажера

Запуск тренажера начинается с меню авторизации. Авторизация разделяет учетные записи преподавателя и каждого студента. Это позволяет выполнять задания каждому студенту индивидуально, а преподавателю проверять результаты. Главное меню сделано удобным и понятным на интуитивном уровне. Кроме того, на стартовой странице можно пошагово увидеть всю программу по изучению технологического объекта и процесса.

Для облегчения работы студентов и преподавателя весь необходимый теоретический материал для изучения оборудования и технологии листовой прокатки дан в тренажере в систематизированном виде в сопровождении рисунков, схем, графиков и чертежей. Данный материал можно распечатать или сохранить отдельным документом, что упростит самостоятельную подготовку студента вне аудитории.

После изучения теоретического материала, следует перейти к практической части. В разработанном нами тренажере практические занятия делятся на два основных модуля: модуль механика и модуль технолога, связано это с тем, что на кафедре готовятся как бакалавры и магистры по направлениям «Машиностроение» и «Технологические машины и оборудование», так и бакалавры и магистры направления «Металлургия».

Модуль механика (рис. 3) позволяет рассмотреть составляющие стана не только в виде чертежей, как при классическом изучении, но и в виде трехмерных моделей. В ходе выполнения практических занятий студент последовательно разбирает и собирает главную линию прокатного стана, параллельно знакомясь и изучая устройство каждой детали. Модели отдельных деталей можно посмотреть, как в отдельности под разными ракурсами, так и в составе производственной линии.

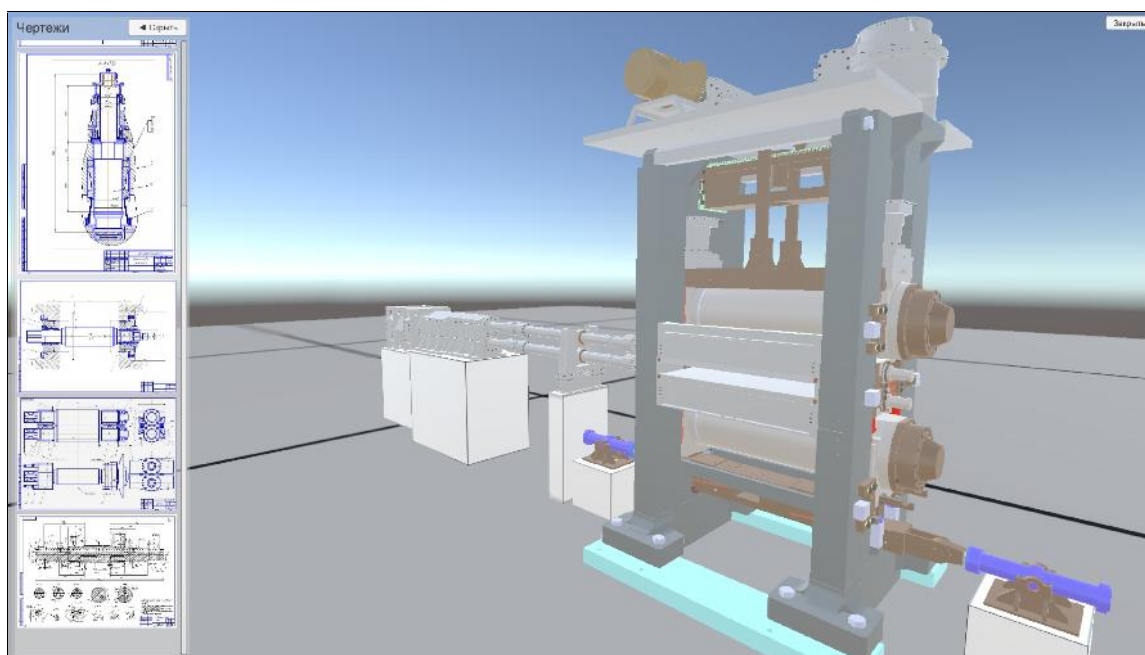


Рис. 3. Модуль механика «Листовой прокатный стан»

Конечно, кроме трехмерных моделей деталей так же даны и их чертежи в соответствии с ГОСТ, так как без чертежа невозможно в полной мере разобраться в устройстве механизма. Данный модуль тренажера призван наглядно показать студенту устройство стана, обучить сборке и разборке основных узлов главной линии и показать механические взаимосвязи различных деталей.

Модуль технолога (рис. 4) позволяет моделировать технологический процесс холодной прокатки листа и оценить уровень зависимости энергосиловых характеристик от технологических параметров. В основе технологической части тренажера лежит математическая модель, базирующаяся на законе сохранения энергии, предложенная Выдриным В.Н. [7].

Стартовая страница Основные положения Модуль механика Модуль технолога Проверка							
Расчеты: Печатать новые Пересчитать Сбросить		Количество клеток: 1 2 3 4 5					
Название переменной	Обоз.	Разм.	Клеть 1	Клеть 2	Клеть 3	Клеть 4	Клеть 5
Радиус рабочих валков клетки	R_i	м	0,25	0,25	0,25	0,25	
Толщина полосы на входе в очаг деформации	$h_{вх}$	м	0,012	0,009	0,008	0,007	
Толщина полосы на выходе из клетки	$h_{вых}$	м	0,009	0,008	0,007	0,006	
Ширина полосы на входе в очаг деформации	$b_{вх}$	м	0,02	0,02091	0,02162	0,02241	
Ширина полосы на выходе из клетки	$b_{вых}$	м	0,02091	0,02162	0,02241	0,02331	
Относительная деформация металла в клетке	μ_i	-	1,03333	1,125	1,14206	1,16667	
Угол захвата металла в очаге деформации	α_i	рад	0,1096	0,06326	0,06326	0,06326	
Сопротивление деформации металла	$\sigma_{де}$	Н/мм ²	469,39	371,01	372,63	374,25	
Усредненное значение сопротивления деформации	σ_i	Н/мм ²	370,2	371,82	373,44	375,06	
Коэффициент трения в очаге деформации	f_i	-	0,02	0,02	0,02	0,02	
Скорость полосы на входе из клетки	$v_{вх}$	м/с	2,77778	3,125	3,57143	4,16667	
Переднее межклетевое натяжение	T_i	Н	282,5	226,8	186,6	153,5	
Заднее межклетевое натяжение	$T_{зад}$	Н	150	282,5	226,8	186,6	
Величина критического угла в очаге деформации	γ_i	рад	0,14159	0,14159	0,14159	0,14159	
Момент прокатки на боковом валке	M_i	Н·м	-0,11685	-0,12791	-0,13778	-0,14327	

Рис. 4. Модуль технолога «Холодная листовая прокатка»

Энергосиловые параметры программа рассчитывает в соответствии с заданными студентом характеристиками технологического процесса и выводит их на экран в цифровом виде (в виде таблицы) и в графическом виде. Программа предусматривает возможность изменения количества прокатных клетей в составе стана, что обеспечивает возможность моделирования всех типов применяемых на практике листовых станов холодной прокатки.

Для проверки полученных знаний предлагается система заданий (рис. 5), состоящая из практических заданий, тестовых заданий, контрольных вопросов. Подраздел практические задания состоит из 10 задач на расчеты по основным темам, освещенным в теоретическом модуле. Тестовые задания – достаточно простая проверка освоенного материала. И контрольные вопросы – 30 вопросов для итогового контроля знаний ключевых моментов, касающихся технологии процесса холодной листовой прокатки и устройства оборудования стана. Все задания формируются по вариантам в зависимости от авторизованного пользователя.

Так как все необходимое для изучения стана и самого технологического процесса холодной прокатки листа включено в программу, то можно ее использовать не только при аудиторном обучении, но и дистанционным образом. Используя модуль «Проверка знаний» можно дистанционно аттестовать обучающихся.

Данный интерактивный обучающий тренажер внедрен в учебный процесс в условиях ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) на кафедре Машины и технологии обработки материалов давлением.

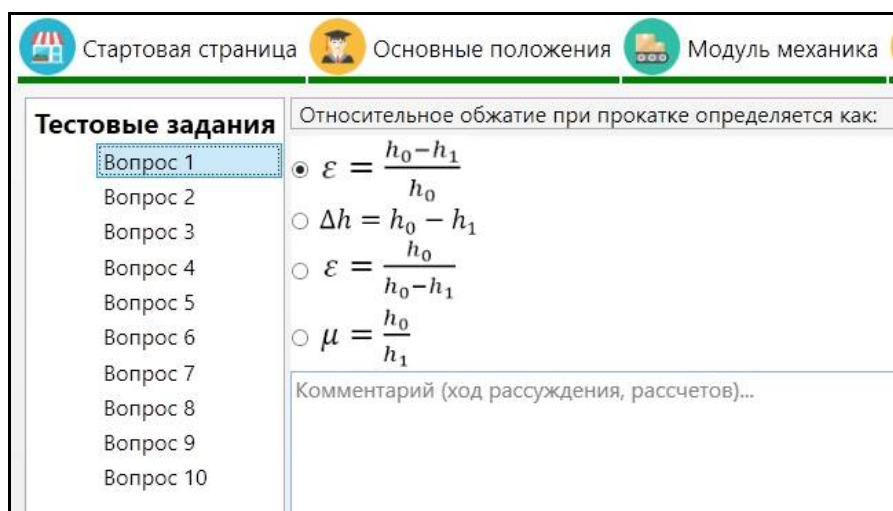


Рис. 5. Проверка знаний

Выводы

Интерактивный виртуальный тренажер «Листовая прокатка» является инновационной разработкой в сфере подготовки профессиональных кадров в области машиностроения и металлургии. Данный тренажер позволяет облегчить работу преподавателя и повысить качество образовательного процесса благодаря использованию современных компьютерных средств визуализации. Благодаря данному тренажеру, образовательное учреждение может без больших материальных затрат позволить студентами подробно изучить технологию процесса холодной листовой прокатки и оборудование листового стана. Стоит отметить, что это не единственный виртуальный тренажер, применяемый в процессе подготовки кадров на кафедре. Ранее нами были разработаны и внедрены в учебный процесс такие тренажеры как

«Волоочильный стан», «Сортовая прокатка», на этапе разработки находится тренажер «Горячая листовая прокатка».

Список литературы

1. *Егоров П.Н.* Методика применения виртуальных лабораторий в учебном процессе вуза // Концепт. – 2013. – № 7.
2. *Королев А.А.* Прокатные станы и оборудование прокатных цехов: учебное пособие для студентов металлургических специальностей вузов. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1981. – 203 с.
3. *Константинов И.Л., Сидельников С.Б., Иванов Е.В.* Прокатно-прессово-волоочильное производство: учебник / Сибирский федеральный университет (СФУ). – 2-е изд. – М.: Инфра-М; Красноярск: Изд-во СФУ, 2014. – 510 с.
4. *Зобнин А.Д., Чиченев Н.А.* Технологические основы проектирования прокатных комплексов. Технология производства отдельных видов проката: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению Металлургия. – М.: Изд-во МИСиС, 2013. – 153 с.
5. *Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М.* Машины и агрегаты металлургических цехов. – М.: Металлургия, 1988. – 680 с.
6. *Радионон А.А.* Автоматизированный электропривод станков для производства стальной проволоки. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2007. – 311 с.
7. *Выдрин В.Н., Федосиенко А.С., Крайнов В.И.* Процессы непрерывной прокатки. – М.: Металлургия, 1970. – 456 с.

INTERACTIVE EDUCATIONAL SYSTEM – A VIRTUAL SIMULATOR «SHEET ROLLING»

Radionova L.V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: RadionovaLV@rambler.ru
Chernyshev A.D., Ph.D. student, e-mail: fis6en@gmail.com
Lisovskiy R.A., Master's Degree student, e-mail: johnkoffee.work@gmail.com

South Ural State University (National Research University), 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation

Abstract

The paper presents the experience on the use of modern computer technology to enhance the level and quality of education in the preparation of specialists for the engineering and metals industry. Based on modern technologies using Unity3D Programs, SolidWorks and Visual Studio was created interactive virtual simulator «Sheet rolling». The article gives a brief description of the modules included in the simulator, namely «Basic Provisions», which is available and systematically given information on the theory and technology of sheet rolling. Mechanics module «Sheet rolling mill» allows you to explore the equipment cold rolling sheet. Module technology «Cold sheet rolling» which is based on a mathematical model of cold sheet rolling process makes it possible to conduct analytical studies. Module «Verification of knowledges» within which tasks and tests the solution that allows you to get objective information about the level of knowledge acquired.

Keywords

rolling mill, cold rolled sheet, interactive education system, virtual simulator, Unity3D, SolidWorks, Visual Studio

МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ НГТУ

Кафедры:

Инженерной графики (ИГ)
Материаловедения в машиностроении (ММ)
Проектирования технологических машин (ПТМ)
Технологии машиностроения (ТМС)
Химии и химической технологии (ХХТ)

Научная деятельность:

выполнение фундаментальных и прикладных исследований в области:

- создания новых материалов с уникальными свойствами;
- исследования структурных превращений в металлических материалах;
- технологий производства керамики и керамических композитов;
- исследования процесса образования водорода и нановолокнистого углерода каталитическим разложением углеводородов при давлениях выше атмосферного;
- исследования способов модификации углеродных нанотрубок и нановолокон;
- управления качеством поверхностного слоя деталей машин при интеграции поверхностной термической и механической обработки на одном технологическом оборудовании;
- технологий плазменного нанесения покрытий на детали машин;
- разработки технологических процессов лазерной и плазменной резки, поверхностной термообработки, сварки, маркировки, а также электрохимической и ультразвуковой обработки;
- разработки опытных образцов установок и модернизации существующего оборудования электрофизических методов обработки.

Производственная деятельность:

- содействие в конструкторско-технологической подготовке производства;
- проектирование технологических процессов;
- услуги по плазменной и лазерной резке материалов;
- услуги гибки листового и трубного проката;
- определение механических свойств, химического состава и структуры материалов;
- услуги механической, термической обработки материалов;
- проектирование и изготовление технологического оборудования с подготовкой требуемой конструкторской документации в NX, SolidWorks, AutoCAD, Компас;
- проведение инженерного анализа конструкторских задач и технологических процессов в программных комплексах ANSYS, SYSWELD, APM WinMachine для оптимизации проектных разработок на ранних стадиях;
- услуги плазменного нанесения покрытий на детали машин;
- технологический аудит предприятий;
- установление причин разрушения деталей машин.

Образовательные услуги:

- курсы повышения квалификации и обучающие семинары для сотрудников предприятий;
- обучение работе на станках с ЧПУ, лазерных и плазменных комплексах.

Центры, лаборатории:

Учебный центр современных металлообрабатывающих технологий «DMG-НГТУ».
Научно-образовательный центр «Сварочные технологии» - «НГТУ- «Kjellberg Finsterwalde».
Научно-образовательный центр «Нанотехнологии».
Научно-образовательный центр «Лазерные и плазменные технологии».
Научно-образовательный центр в области машиностроения «НГТУ-ИТПМ СО РАН».
Учебно-научная лаборатория «Термическая обработка материалов».
Учебно-научная лаборатория «Плазменные покрытия».
Центр прототипирования.

Адрес:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корп. 5, НГТУ, МТФ, V-278.

Тел./факс: +7 (383) 346-51-92

Сайт факультета: <http://www.mtf.nstu.ru/>

Декан МТФ: к.т.н., доцент Янпольский Василий Васильевич
e-mail: mtf@corp.nstu.ru

ISSN 1994-6309

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ
ОБОРУДОВАНИЕ
ИНСТРУМЕНТЫ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov
metal_working@mail.ru

Организатор международных
выставок и конференций



ITE Сибирь
В составе группы компаний ITE

<http://www.ite-siberia.ru/> welcome@sibfair.ru

mash



SIBERIA

Выставка оборудования
для металлообработки и сварки

Россия, Новосибирск

www.mashex-siberia.ru