

ISSN 2313-1020 (Print)
ISSN 2542-1093 (Online)

Том 7, Номер 1–2

2020

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING

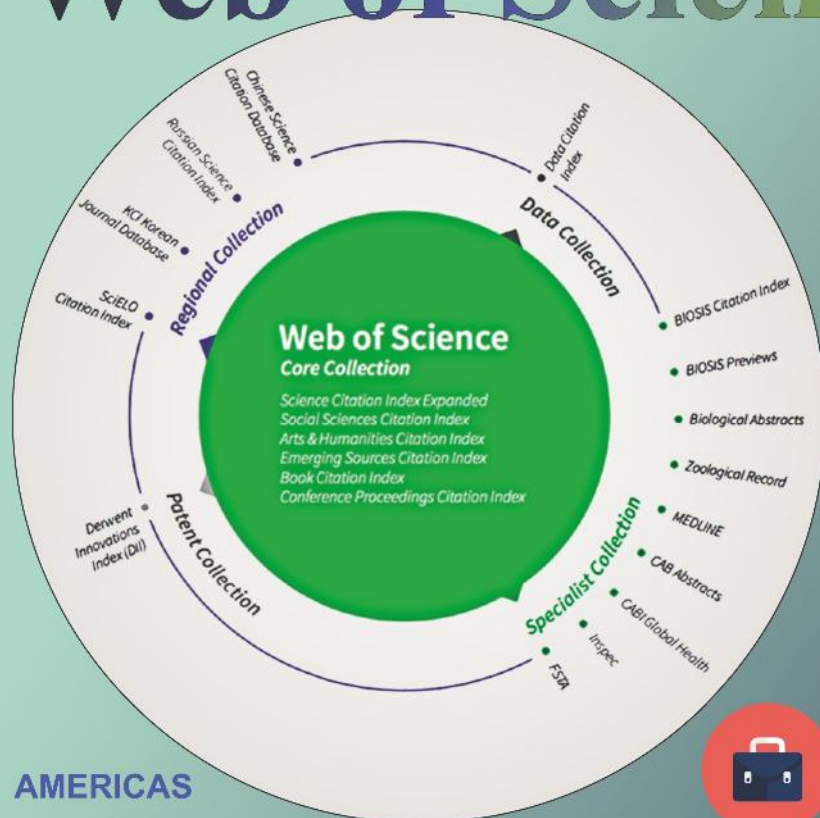
<http://journals.nstu.ru/machine-building>

НОВОСИБИРСК



ПЛАТФОРМА Web of Science

 Clarivate
Analytics



Academic
Search™
Ultimate



Applied Science
& Technology
Source™ Ultimate



Business Source®
Ultimate



Humanities Source™ Ultimate



Sociology Source™ Ultimate

AMERICAS

Philadelphia +1 800 336 4474
+1 215 386 0100

EUROPE, MIDDLE EAST AND AFRICA

London +44 20 7433 4000

ASIA PACIFIC

Singapore +65 6411 6888
Tokyo +81 3 5218 6500

For a complete
office list, visit:
clarivate.com

EBSCO

Расширенная версия **ULTIMATE**
для успеха в научной работе

www.ebsco.com ■ + 420 2 34 700 600 ■ info.cr@ebsco.com

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ISSN 2313-1020 (Print)
ISSN: 2542-1093 (Online)

Том 7 № 1-2 2020 г. 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, **Рахимьянов Х.М.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Сараев Ю.Н.**, доктор техн. наук, профессор, ИФПМ СО РАН, г. Томск, г. Барнаул, **Янюшкин А.С.**, доктор техн. наук, профессор, ЧГУ, г. Чебоксары

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 – 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ ЖУРНАЛА

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Журнал зарегистрирован 31.10.2016 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-67566.

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) 346-17-75

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 (Print)
ISSN: 2542-1093 (Online)

Volume 7 Number 1-2 2020 SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

Dmitry V. Lobanov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Machine-Building Faculty,
I.N. Ulianov Chuvash State University, *Cheboksary*, Russian Federation

Tatyana G. Martynova, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,
Department of Industrial Machinery Design,
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*;

Alexander S. Yanyushkin, D.Sc. (Engineering), Professor, I.N. Ulianov Chuvash State University, *Cheboksary*

The journal is issued since 2014

Publication frequency - 1 volume a year

Data on the journal are published in eLIBRARY.RU

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

Tel.: (383) 346-17-75

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

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

СЕДЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

г. Новосибирск, 25 марта 2020 г.

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- Новосибирский государственный технический университет, научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология · оборудование · инструменты)», г. Новосибирск, Россия
- ООО «Сибирская Выставочная Компания», 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 НПКФ «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 АлтГТУ 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;
- Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, 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), *Ковалевский С.В.*, профессор, д.т.н., 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), *Буров В.Г.*, профессор, д.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), *Герасенко А.Н.*, директор ООО НПФК «Машсервисприбор» (г.Новосибирск), *Гурьев А. М.*, профессор, д.т.н., зав. каф. АлтГТУ (г. Барнаул), *Кирсанов С.В.*, профессор, д.т.н., ТПУ (г.Томск), *Марков А. М.*, профессор, д.т.н., ректор АлтГТУ (г.Барнаул), *Овчаренко А.Г.*, профессор, д.т.н., зав.каф. БТИ АлтГТУ (г. Бийск), *Рахимьянов Х. М.*, профессор, д.т.н., зав. каф. НГТУ (г. Новосибирск), *Сараев Ю.Н.*, д.т.н, профессор, ИФПМ СО РАН, г. Томск, *Ситников А.А.*, д.т.н., профессор, АлтГТУ (г.Барнаул), *Янюшкин А.С.*, профессор, д.т.н., член- корреспондент САН ВШ, академик МАН ВШ, ЧГУ (г. Чебоксары).

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.*, профессор, д.т.н., НГТУ (г.Новосибирск), **сопредседатель;**

Члены программного комитета: *Иванцовский В.В.*, , профессор, д.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), *Лобанов Д.В.*, д.т.н., профессор, ЧГУ (г. Чебоксары), *Трегубчик П.В.*, гл. инженер ОАО «Новосибирский стрелочный завод», (г. Новосибирск), *Янюльский В.В.*, к.т.н., декан МТФ НГТУ (г. Новосибирск).

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

- *Скиба В.Ю.*, зам. главного редактора журнала «Обработка металлов», доцент, к.т.н., НГТУ (г. Новосибирск);
- *Марк Е.С.*, директор проекта «MashExpo Siberia»(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 Seventh International Scientific and Practical Conference

Novosibirsk, 25 March 2020

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.
- I.N. Ulianov Chuvash State University, Cheboksary, 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), *Gerashenko 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. Rector of AltSTU (Barnaul, Russia), *Ovcharenko A.G.*, Professor, DSc, Head of Department in BTI AltSTU (Biysk, Russia), *Rassohin V.A.*, General director of the JSC "Shvabe - defense and protection", *Rakhimyanov Kh.M.*, Professor, DSc., Head of Department in NSTU (Novosibirsk, Russia), *Saraev Yu.N.*, Professor, DSc., ISPMS SB RAS (Tomsk, Russia), *Sitnikov A.A.*, Professor, DSc, AltSTU (Barnaul, Russia), *Stetsovsky A.S.*, Exhibition Director, «ITE Siberia» (Novosibirsk, Russia), *Yanyushkin A.S.*, Professor, DSc, Corresponding Member SAN VSH, Academician IHEAS, ChSU (Cheboksary, 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.*, Professor, D.Sc. (Engineering), NSTU (Novosibirsk, Russia), co-chair.

COMMITTEE MEMBERS: *Ivancivsky V.V.*, D.Sc. (Engineering), Professor, NSTU (Novosibirsk, Russia), *Lobanov D.V.*, D.Sc. (Engineering), Professor, ChSU (Cheboksary, Russia), *Tregubchak P.V.*, Principal Engineer, 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);
- *Mark E.S.*, Project Director, "MashExpo 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

Ильиных А.С., Галай М.С., Сидоров Э.С. Повышение эффективности работы абразивного инструмента при шлифовании сварных стыков	9
Маликов А.Г., Гольшев А.А., Витошкин И.Е. Исследование лазерной сварки сплава Al-Mg-Li с присадочной проволокой	15
Зверев Е.А., Вахрушев Н.В., Слепцов С.А., Жапаргазинов Р.Д., Цветов И.В. Шлифование никелевых плазменных покрытий, оплавленных токами высокой частоты	21
Леонов С.Л., Иконников А.М., Соломин Д.Е. Определение глубины внедрения режущей части зерна в металл, при магнитно-абразивной обработке	27
Маркова М.И., Шилов А.И. Обработка отверстий малого диаметра в деталях топливной аппаратуры	31
Иванцовский В.В., Титова К.А., Слепцов С.А., Жапаргазинов Р.Д., Цветов И.В. Интегральная обработка и результаты исследования качества поверхностного слоя	38
Жаргалова А.Д., Зуев Р.В. Применение численного компьютерного моделирования для исследования зависимости остаточных напряжений от режимов резания	45
Гарбузов В.В., Гилета В.П. Ультразвуковая обработка незакрепленным инструментом	53
Дубинин Д.Е., Гаар Н.П. Исследование влияния излучения гелий-неонового лазера на электрохимическое растворение материалов	58
Смирнов В.В., Овчаренко А.Г., Фирсов А.М., Ромашев А.Н. Основы метода конечных элементов для бакалавров машиностроения	63
Фирсов А.М., Овчаренко А.Г., Смирнов В.В., Ромашев А.Н. Обеспечение точности изготовления базовых отверстий тонкостенных корпусных деталей	69

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ОСНАСТКА И ИНСТРУМЕНТЫ

Коротков А.Н., Черкашин С.О., Ескин Е.В., Кузнецов А.А. Практика применения станка с ЧПУ DMG MORI модели MORI SEIKI NMV 5000 DCG для изготовления сложных корпусных деталей	77
Юдин В.С., Балашов А.В., Маркова М.И. Установка для пропитки абразивных инструментов	82
Керженцев В.А., Перова Н.В., Абаринова Э.В., Асютков К.А. Определение функционально-логическим методом технических характеристик перерабатывающих машин (их главных параметров)	86
Керженцев В.А., Перова Н.В., Гиззатулин А.С., Трофимова Ю.С. Определение параметров волчка по величине мощности электродвигателя функционально-логическими методами проектирования	93

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Ерохина И.С., Максимов А.Б. Дислокационный механизм упрочнения стали при циклическом пластическом изгибе	100
---	-----

Попова М.В., Малюх М.А. Структура и тепловое расширение высоколегированных сплавов системы Al-Si-Cu специального назначения	105
Афанасьев В.К., Попова М.В., Долгова С.В., Жибинова И.А., Черныш А.П. О возможности применения белого нелегированного чугуна в качестве инструментального материала	113
Бинцева А.А., Корниенко Е.Е., Кузьмин В.И. Плазменное напыление покрытий из порошков карбида бора	122
Алхимова Е.С., Волков А.С., Максимов Б.А., Сизов И.Г., Полянский И.П. Исследование борохромированных слоев на стали 20, полученных в условиях изотермического и термоциклического нагрева	128
Рашковец М.В., Никулина А.А., Мендагалиев Р.В., Кислов Н.Г. Механические свойства и структура сплава 55Ni-17Cr-5Fe-3Mo при аддитивном производстве	133
Астрашб Е.В., Белоцерковский М.А., Григорчик А.Н., Кукареко В.А. Влияние отжига на структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства газотермических покрытий из псевдосплавов на основе X20H80	138
Прудников А.Н., Прудников В.А. Упрочнение земляных отливок из бинарных заэвтектических силуминов	145
Рекомендации по написанию научной статьи	151
Подготовка аннотации	153
Правила для авторов	155

CONTENTS

Innovative Technologies in Mechanical Engineering

- Ilinykh A.S., Galay M.S., Sidorov Je.S.** Improving Efficiency of Abrasive Tool during Grinding Welded Joints 9
- Malikov A.G., Golyshev A.A., Vitoshkin I.E.** Study of Laser Welding of Al-Mg-Li Alloy with Filler Wire 15
- Zverev E.A., Vakhrushev N.V., Sleptsov S.A., Zhapargazinov R.D., Tsvetov I.V.** Grinding of Nickel Plasma Coatings Melted by High Frequency Currents 21
- Leonov S.L., Ikonnikov A.M., Solomin D.E.** Determination of the Penetration Depth of the Cutting Grains in the Metal, with the Magnetic-Abrasive Machining 27
- Markova M.I., Shilov A.I.** Processing Small Diameter Holes in Details Fuel Equipment 31
- Ivancivsky V. V., Titova K.A., Sleptsov S.A., Zhapargazinov R.D., Tsvetov I.V.** Integral Processing and Results of Research Quality of the Surface Layer 38
- Zhargalova A.D., Zuev R.V.** The Application of the Numerical Computer Modelling to Explore the Dependence of the Residual Stresses on Machining Parameters 45
- Garbuzov V.V., Gileta V.P.** Ultrasonic Processing with Unfixed Tool 53
- Dubin D.E., Gaar N.P.** Research of the Effect of Helium-Neon Laser Radiation on the Electrochemical Dissolution of Materials 58
- Smirnov V.V., Ovcharenko A.G., Firsov A.M., Romashev A.N.** Basics of the Finite Element Method for Bachelors of Mechanical Engineering 63
- Firsov A.M., Ovcharenko A.G., Smirnov V.V., Romashev A.N.** Ensuring the Accuracy of Manufacturing the Base Holes of Thin-Walled Body Parts 69

Technological Equipment, Machining Attachments and Instruments

- Korotkov A.N., Cherkashin S.O., Eskin E.V., Kuznetsov A.A.** Practice of Application of a CNC Machine DMG MORI Models MORI SEIKI NMV 5000 DCG for the Production of Complex Case Parts 77
- Yudin V.S., Balashov A.V., Markova M.I.** Installation for Impregnation of Abrasive Tools 82
- Kerzhencev V. A., Perova N. V., Abarinova E.V., Asyutkov K.A.** Determination by Functional-Logical Method of Technical Characteristics of Food Processing Machines (their Main Parameters) 86
- Kerzhencev V. A., Perova N. V., Gizzatullin A. S., Trofimova Y. S.** Determination of Parameters of Meat Grinder by the Value of Power of the Electric Motor using Functional-Logic Design Methods 93

Materials Science in Machine Building

- Yerokhina I.S., Maksimov A.B.** Dislocation Mechanism of Steel Hardening under Cyclic Plastic Bending 100

Popova M.V., Malyuh M.A. Structure and Thermal Expansion of High-alloy Alloys of the Al-Si-Cu System for Special Purposes	105
Afanasyev V.K., Popova M.V., Dolgova S.V., Zhibinova I.A., Chernysh A.P. Possibility of Using White Unalloyed Cast Iron as Instrumental Material	113
Binceva A.A., Kornienko E.E., Kuzmin V.I. Air Plasma Spraying of Boron Carbide Coatings	122
Alkhimova E.S., Volkov A.S., Maksimov B.A., Sizov I.G., Polyansky I.P. Study of Borochrome Steel 20 are Received in the Conditions Isothermic and Thermocyclic Heating	128
Rashkovets M.V., Nikulina A.A., Mendagaliev R.V., Kislov N. G. Mechanical Properties and Structure of 55Ni-17Cr-5Fe-3Mo Alloy under Additive Manufacturing Condition	133
Astrashab E.V., Belotserkovsky M.A., Grigorichik A.G., Kukareko V.A. Influence of Annealing on the Structural-Phase State and Tribotechnical Properties of Hypersonic Metallization Coatings from Falsely Alloys Based on Ni80Cr20	138
Prudnikov A.N., Prudnikov V.A Hardening of Earth Castings from Binary Hypereutectic Silumins	145
Guidelines for Writing a Scientific Paper	151
Abstract requirements	153
Rules for authors	155

УДК 621.923.1

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА
ПРИ ШЛИФОВАНИИ СВАРНЫХ СТЫКОВ**

*А.С. ИЛЬИНЫХ, доктор техн. наук, доцент
М.С. ГАЛАЙ, канд. техн. наук, доцент
Э.С. СИДОРОВ, преподаватель
(СГУПС, г. Новосибирск)*

Галай М.С. – 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191,
Сибирский государственный университет путей сообщений,
e-mail: galayms@mail.ru

Шлифование термитных сварных соединений рельсов приводит к потере режущей способности абразивных кругов из-за засаливания. В статье приведены результаты исследований режущей способности шлифовальных кругов зернистости F16, F24, F30 на бакелитовой связке из электрокорунда. Для каждого абразивного круга определены значения коэффициентов шлифования и глубины резания. Сравнительный анализ полученных данных показал, что абразивные круги марки *36 150x73x56 14A 24 O-P-Q B* с зернистостью F24 при глубине резания от 0,18 до 0,20 мм обеспечивают высокую эффективность процесса шлифования.

Ключевые слова: шлифование, сварные стыки, глубина резания, шлифовальные круги, механическая обработка, абразивная обработка.

Введение

Для финишной обработки рельсовых стыков, полученных термитной сваркой, применяют шлифование, которое позволяет обеспечить необходимый профиль рельса и заданный уровень шероховатости. Шлифование сварных соединений рельсов осуществляют кругами на бакелитовой связке из электрокорунда нормального с зернистостью F16, F24 и F30. Опыт эксплуатации данных шлифовальных кругов показал, что при шлифовании сварных соединений происходит интенсивное «засаливание» их рабочей поверхности. Обеспечить эффективную работу шлифовальных кругов возможно за счет изменения глубины резания [1-3].

Теория

Одним из показателей эффективности работы абразивного инструмента является коэффициент шлифования [4]:

$$K_{\text{ш}} = \frac{Q_m}{Q_a}, \quad (1)$$

где Q_m – объем снятого металла, мм³; Q_a – объем изношенной части круга, мм³.

Низкие значения коэффициента шлифования свидетельствуют об интенсивном износе абразивного инструмента и небольшом объеме снимаемого металла. В таких случаях интенсивный износ шлифовального круга, как правило, происходит из-за больших значений глубины резания, при которых на абразивные зерна воздействуют чрезмерные усилия, преждевременно отрывающие их от связки. В случае шлифования с небольшой глубиной резания износившиеся абразивные зерна не отделяются от связки, а поры заполняются продуктами износа, то есть происходит засаливание шлифовального круга, и он теряет режущую способность. При шлифовании с оптимальной глубиной резания происходит самозатачивание шлифовального круга. По мере износа абразивные зерна отделяются от связки и в процессе резания включаются новые зерна. Такой режим работы шлифовального круга обеспечивает наиболее высокие значения коэффициента шлифования – максимальный объем снимаемого металла при минимальном износе абразивного инструмента [5-9].

Таким образом, коэффициент шлифования зависит от глубины резания. Определить необходимые значения глубины резания, обеспечивающие работу разных шлифовальных круга в режиме самозатачивания возможно с помощью формулы [10]:

$$t_{\text{расч}} = \frac{1.25 \cdot \pi \cdot d_3^2 \cdot \sigma_{\text{св}} \cdot K_{\text{стр}} \cdot v_{\text{ср}} \cdot (R_{\text{кр}} - r_{\text{кр}}) \cdot Z}{K_1 \cdot \tau_c \cdot S_{\text{п}}}, \quad (2)$$

где d_3 – средний диаметр абразивных зерен в шлифовальном круге, мм; $\sigma_{\text{св}}$ – предел прочности материала связки при растяжении, МПа; $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость вращения зерен шлифовального круга, м/с; $R_{\text{кр}}$ – наружный радиус шлифовального круга, мм; $r_{\text{кр}}$ – внутренний радиус шлифовального круга, мм; K_1 – коэффициент учитывающий угол между линией среза и плоскостью сдвига; τ_c – величина напряжений при которых происходит сдвиг в зоне деформации, МПа; $S_{\text{п}}$ – скорость продольной подачи, м/мин.

Коэффициент структуры абразивного круга [10]:

$$K_{\text{стр}} = \sqrt[3]{\frac{V_c^2}{(V_c + V_{\text{п}})^2}}, \quad (3)$$

где V_c – объемное содержание связки в шлифовальном круге; $V_{\text{п}}$ – объемное содержание пор в шлифовальном круге.

Концентрация абразивных зерен на поверхности шлифовального круга, шт/мм²:

$$Z = \frac{6 \cdot V_3}{\pi \cdot d_3^2}, \quad (4)$$

где V_3 – объемное содержание абразивных зерен в шлифовальном круге.

Глубину резания определяли для шлифовальных кругов с зернистостью F16, F24 и F30, структурный состав и геометрические характеристики абразивных кругов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Структурный состав абразивных кругов, применяемых для шлифования сварных швов термитных рельсовых соединений [11,12]

Маркировка шлифовального круга	Объемное содержание компонентов в круге, %			Средний диаметр зерна, мм
	Абразивные зерна	Связка	Поры	
36 150x73x56 14A 16 O-P-Q B	56	11	33	1,23
36 150x73x56 14A 24 O-P-Q B	58	9	33	0,745
36 150x73x56 14A 30 O-P-Q B	60	7	33	0,625

Результаты и обсуждение

Результаты расчетов глубины резания по формуле (2) для разных шлифовальных кругов приведены в таблице 2. Необходимая глубина резания для шлифовальных кругов с зернистостью F16 согласно расчетам, должна составлять 0,216 мм. При использовании более мелкозернистых кругов F24 и F30 глубина резания должна быть меньше – 0,202 и 0,182 мм соответственно.

Таблица 2

Значения глубины резания для различных шлифовальных кругов

Маркировка шлифовального круга	Глубина резания		Отклонение экспериментальных значений от расчетных, %
	$t_{расч}$ мм	$t_{эксп}$ мм	
36 150x73x56 14A 16 O-P-Q B	0,216	0,20	8
36 150x73x56 14A 24 O-P-Q B	0,202	0,19	6,32
36 150x73x56 14A 30 O-P-Q B	0,182	0,17	7,06

С целью проверки достоверности расчетных значений был проведен эксперимент, заключающийся в шлифовании сварных швов термитных соединений рельсов абразивными кругами разных марок при различных значениях глубины резания. Коэффициент шлифования определяли по формуле (1). Объем изношенной части шлифовальных кругов определяли с помощью штангенциркуля ШЦ-II-250-0,05, а величину снятого слоя металла сварных швов при помощи штангенрейсмаса ШР-250-0,05.

Согласно результатам экспериментального исследования, представленным на рисунке 1, коэффициент шлифования зависит от глубины резания и зернистости абразивного инструмента.

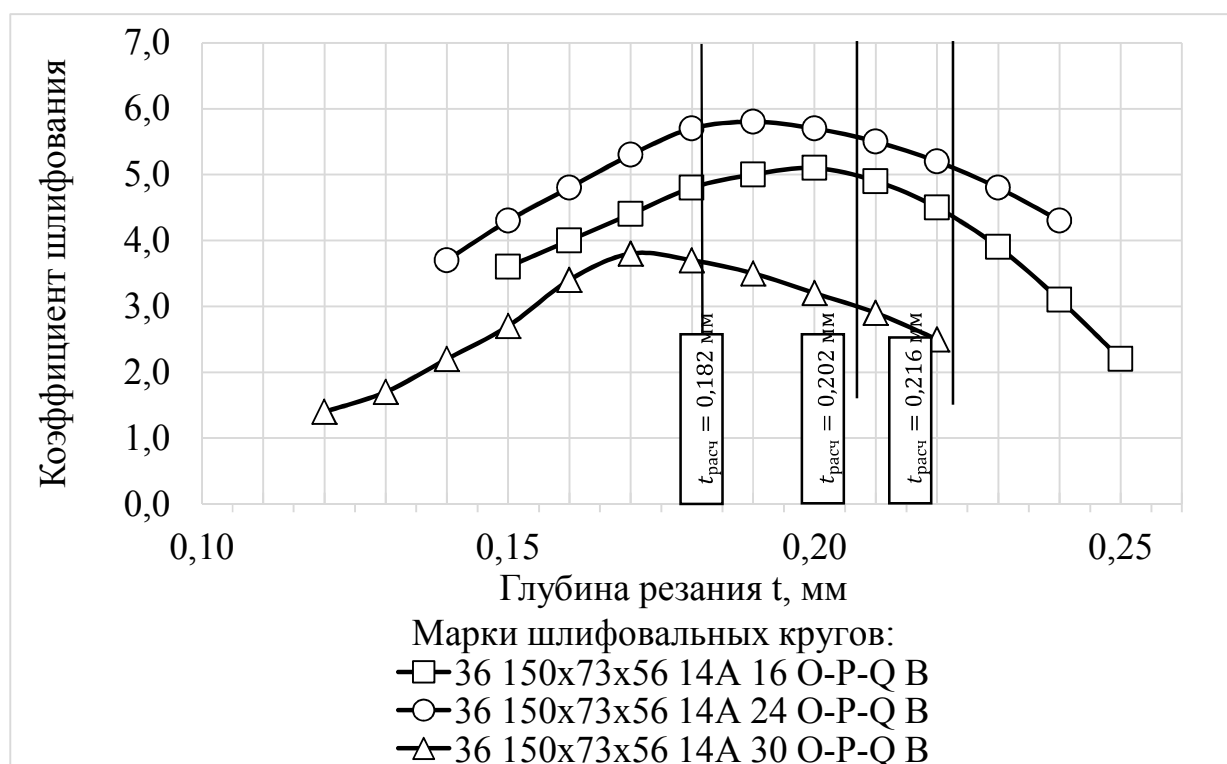


Рис. 1. Влияние глубины резания на коэффициент шлифования

Наиболее высокие значения коэффициента шлифования 5,7...5,8 обеспечивают абразивные круги марки 36 150x73x56 14A 24 O-P-Q B с зернистостью F24 при глубине резания от 0,19 до 0,20 мм. Увеличение глубины резания до 0,21...0,24 мм приводит к повышенному износу абразивного инструмента и понижению коэффициента шлифования до значений 5,5...4,3. Снижение коэффициента шлифования также наблюдается при уменьшении глубины резания до 0,17...0,14 мм из-за засаливания шлифовального круга и снижения его режущей способности. Шлифовальные круги марки 36 150x73x56 14A 16 O-P-Q B с зернистостью F16 также позволяют добиться достаточно высоких значений коэффициента шлифования 4,9...5,1 при глубине резания от 0,19...0,21 мм. Однако в данном случае увеличение глубины резания до 0,23...0,25 мм приводит к значительному снижению коэффициента шлифования до значений 3,9...2,2. Абразивные круги марки 36 150x73x56 14A 30 O-P-Q B с зернистостью F30 наименее эффективны. Коэффициент шлифования не превышает 3,7...3,8 при глубине резания от 0,17 до 0,18 мм.

Выводы

Таким образом, наиболее высокие значения коэффициента шлифования, и как следствие высокую эффективность процесса шлифования обеспечивают абразивные круги марки 36 150x73x56 14A 24 O-P-Q B с зернистостью F24 при глубине резания от 0,18 до 0,20 мм. Экспериментальные данные отличаются от расчетных не более чем на 6...8 %, что свидетельствует о высокой степени достоверности результатов расчетов.

Список литературы

1. Bouazaoui O., Chouaf A. Severity of the residual stress depending on the width of welding in the rails // International Review of Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 10. – P. 523–530. – DOI: 10.15866/ireme.v10i7.9730.
2. Тропанова Н.Г., Рахчеев В.Г., Кириченко С.В. Способ обеспечения точности формы головки рельса при шлифовании // Вестник транспорта Поволжья. – 2018. – № 5 (71). – С. 96–100.
3. Ильиных А.С., Галай М.С., Сидоров Э.С. Повышение износостойкости термитных сварных швов за счет применения горячего шлифования // Инновации в машиностроении (ИнМаш–2019): сб. тр. 10 междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 26–29 нояб. 2019 г. – Кемерово, 2019. – С. 769–774.
4. Алексеев Н.С., Капорин В.А., Иванов С.В. Сравнительный анализ работоспособности кругов на керамической и бакелитовых связках // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 2 (71). – С. 21–27.
5. Наерман М.С., Наерман Я.М. Исаков А.Э. Справочник молодого шлифовщика. – М.: Высшая школа, 1991. – 207 с.
6. Худобин Л.В., Унянин А.Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с.
7. Архипов П.В., Янюшкин А.С., Ковалевский С.В. О природе засаливания шлифовальных кругов // Труды Братского государственного университета. Сер.: Естественные и инженерные науки. – 2008. – Т. 2. – С. 169–174.
8. Contact processes in grinding / A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, V.V. Ivancivsky // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 17–21. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.171.
9. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: учеб. для машиностроит. и приборостроит. специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
10. Ильиных А.С. Обоснование и разработка научно-методических основ высокопроизводительной технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути: дис. ... д-р. техн. наук. – Новосибирск, 2013. – 331 с.
11. ГОСТ Р 53410–2009. Круги зачистные для ручных шлифовальных машин. Технические условия / Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении. – Введ. 2011-01-01. – М.: Стандартинформ, 2009. – 10 с.
12. ГОСТ 3647–80. Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля / Министерство станкостроительной и инструментальной промышленности. – Введ. 1982-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 18 с.

IMPROVING EFFICIENCY OF ABRASIVE TOOL DURING GRINDING WELDED JOINTS

Ilinykh A.S., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: asi@stu.ru

Galay M.S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: galayms@mail.ru

Sidorov Je.S., Ph.D. Senior Teacher, e-mail: sesnsk@mail.ru

Siberian Transport University, 191 Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

Abstract

Grinding of rail thermite welded joints leads to loss of cutting capacity of abrasive wheels due to salting. The article presents the results of research cutting ability of grinding wheels of grain size F16, F24, F30 on a bakelite bond which made of electrocorundum. The values of the grinding coefficients and depth of cut are determined for each abrasive wheel. Comparative analysis of the obtained data showed that abrasive wheels of the brand 36 150x73x56 14A 24 O-P-Q B with a grain size of F24 at a cutting depth of 0.18 to 0.20 mm provide high efficiency of the grinding process.

Keywords

grinding, welding joints, depth of cut, grinding wheels, mechanical treatment, abrasive processing

УДК 621.791

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ СПЛАВА Al-Mg-Li
С ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКОЙ***

А.Г. МАЛИКОВ, с.н.с., канд. техн. наук
А.А. ГОЛЫШЕВ, н.с., канд. физм.-мат. наук
И.Е. ВИТОШКИН, лаборант
(ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск)

Маликов А.Г. – 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1,
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
e-mail: smalik@ngs.ru

Целью данной работы было разработка устройства для подачи проволоки в процессе лазерной сварки. Исследование микроструктуры сварных соединений из Al-Li сплава, полученных, с присадочной проволокой из сплава AMg6, и без неё. Установлено, что при скорости подачи проволоки равной скорости перемещения лазерного излучения получают качественные сварные швы.

Ключевые слова: лазерная сварка, алюминиево-литиевый сплав, присадочная проволока, микроструктура.

Введение

По оценкам экспертов через 15 лет объем трафика авиационных перевозок увеличится вдвое, что приведет к увеличению выброса загрязняющих веществ в атмосферу. Одним из путей снижения выбросов самолетами загрязняющих веществ в атмосферу является применение в конструкции фюзеляжа и крыла самолета более лёгких и прочных материалов, а так же замена заклепочного соединения на технологию сварки.

При создании авиационно-космической техники широко применяются традиционные алюминиевые сплавы AMg5, AMg6 системы Al-Mg, Д16, 1163 системы Al-Cu-Mg [1]. С развитием авиационно-космической промышленности, требования к легким и высокопрочным конструкциям становятся все выше и выше, чтобы увеличить полезную нагрузку и эффективность использования топлива. На сегодняшний день созданы высокопрочные алюминиево-литиевые сплавы (Al-Mg-Li, Al- Cu - Mg- Li, Al-Cu-Li), имеющие пониженную плотность по сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами за счет применения лития при этом увеличивается жесткость прочность, коррозионная стойкость [2-3].

Коррозионностойкие алюминиево-литиевые сплавы 1420, 1424 (система Al-Mg-Li) являются наиболее перспективными сплавами для замены традиционных сплавов AMg6 и AMg5 (система Al-Mg) [3]. Данные Al-Li сплавы относятся к второму поколению.

Изменяя соотношение Mg и Li в сплаве, а так же применяя специальную термомеханическую обработку, можно регулировать количество мелкодисперсных упрочняющих фаз $\delta'(Al_3Li)$ и тройных метастабильных фаз $S_1(Al_2MgLi)$, тем самым изменять прочность и пластичность.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках Проекта № 19-41-540008 p_a.

С целью замены заклепочного соединения и тем самым снижения веса конструкции активно разрабатываются технологии сварки данных Al-Li сплавов, а так же их зарубежных аналогов. Сварка является жизненно важным процессом для соединения сплава Al-Li. В последние годы электронно-лучевая сварка, сварка трением с перемешиванием и лазерная сварка представляют большую долю исследования сварки Al-Li сплавов [4-6]. Основной целью исследований является изучение структуры и получение высоких механических характеристик сварных соединений [7-8], которые остаются низкими и составляют 0,60-0,85 от значений основного материала. Для увеличения прочность сварных соединений применяют методы пост обработки либо используют присадку.

Целью работы является разработка устройства подачи проволоки, и проведение оптимизации лазерной сварки алюминиево-литиевого сплава 1420 системы Al-Mg-Li с применением присадочной и без нее, по энергетическим характеристикам лазерного воздействия без внешних дефектов в виде трещин, раковин, открытой пористости не проваров, подрезов, сварных соединений

Материалы и методика эксперимента

В качестве Al-Li сплава был взят сплава 1420, в качестве проволоки использовался сплав АМг6. Исходный хим. состав сплавов приведен в таб.1.

Таблица 1

Хим. состав алюминиевых сплавов (% , масса).

Наименование сплава	Mg	Li	Zn	Zr	Mn	Ti	Fe
1420 система Al-Mg-Li	5,8-6,2	1,8-2,2	0.05	0,01	0,1-0,25	-	-
АМг6 система Al-Mg	5,8-6,2	-	0,02	-		0,02	0,4

Лазерная сварка производилась на АЛТК “Сибирь-1. Схема сварки, состав комплекса и подготовка образцов к сварке и методика исследования образцов показана в нашей работе [9].

Разработка устройства для подачи проволоки

На рисунке 1 показана принципиальная схема устройства, для подачи проволоки которое включает мотор-редуктор, прижимное устройство для протяжки, устройство крепления барабана с проволокой. Мотор-редуктор постоянного тока за счет изменения напряжения от 1,5 до 5,5 В позволяет плавно регулировать скорость подачи проволоки в диапазоне 12-100 мм/с.

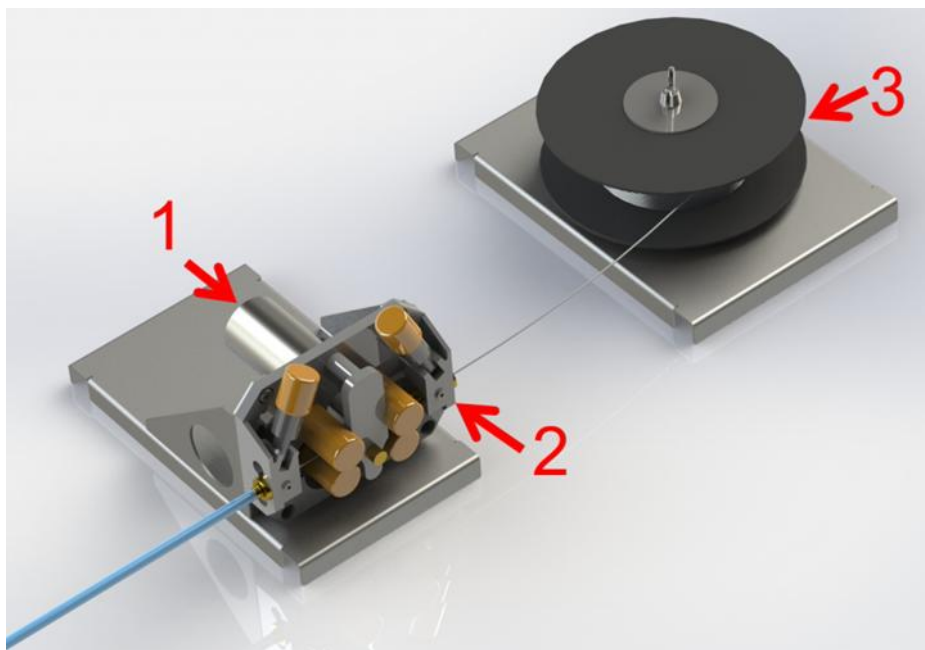


Рис. 1. Принципиальная схема устройства, для подачи проволоки.
1- мотор-редуктор, 2-прижимное устройство для протяжки,
2- 3 -крепления барабана с проволокой

На рисунке 2 показано изображение разработанного сварочного резака, который включает устройство крепления проволоки, регулируемое по высоте, выносу проволоки и углу подачи, сопло для защиты сварного шва от окисления, систему фокусировки лазерного излучения. Устройство крепление проволоки позволяет точно устанавливать проволоку вместо фокусировки лазерного излучения.



Рис. 2. Изображение сварочной головки с проволокой.

Результаты экспериментов

На рисунке 3 показаны оптические фотографии изменения макроструктуры сварного шва в зависимости от различной скорости сварки, при мощности лазерного излучения 3кВт и заглубления фокуса -3 мм расход газа в сопле 5 л/мин. Диапазон изменения скорость сварки составлял 33,3-66,7 мм/с,.

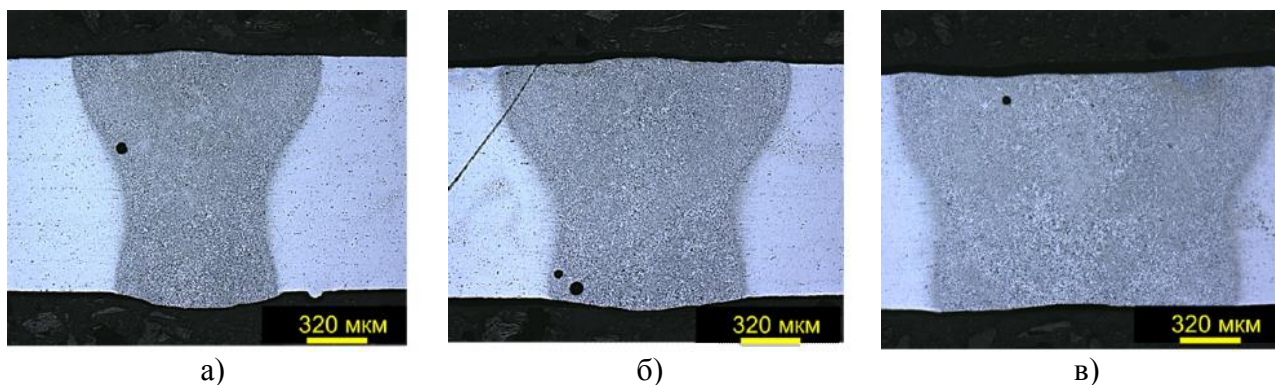


Рис. 3. Оптическая микроструктура поперечного сечения сварного шва без проволоки при различной скорости сварки.
а) 66,7мм/с, б) 50 мм/с, в) 33,3 мм/с.

Как видно из рисунка 3 с уменьшением скорости сварки сварной шов увеличивает свой размер с $\approx 1,47$ мм до 2,24 мм, наблюдается небольшая пористость сварного шва. Далее проводилось оптимизация параметров процесса лазерной сварки с присадочной проволокой, для получения сварных швов без внешних дефектов. На рисунке 4 показаны оптические фотографии изменения макроструктуры сварного шва в зависимости от различной скорости сварки и при подачи проволоки 33,3 мм/с, при постоянной мощности лазерного излучения 3кВт и заглубления фокуса – 3 мм от верхней границы листа.

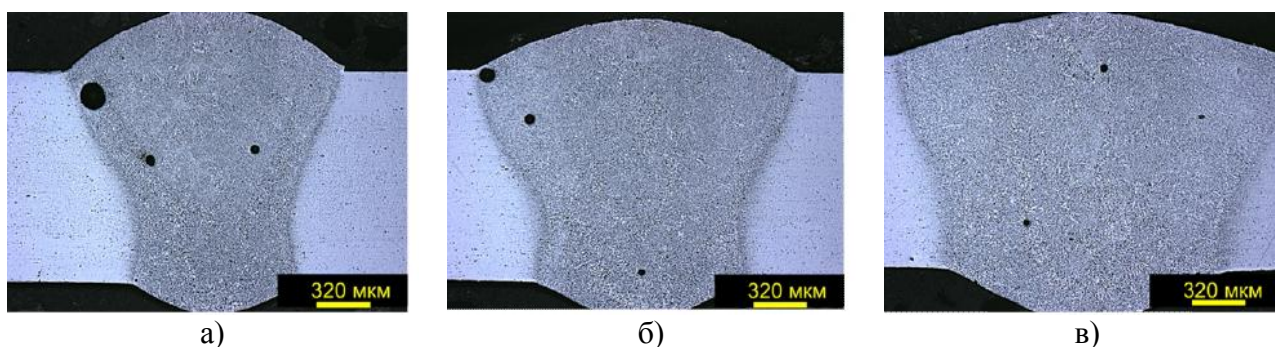


Рис. 4. Оптическая микроструктура поперечного сечения сварного шва с проволокой при различной скорости перемещения лазерного излучения.
а) 66,7мм/с, б) 50 мм/с, в) 33,3 мм/с.

Как видно из рисунка 4 (а, б) при высоких скоростях перемещения лазерного излучения наблюдается пористость. При скорости сварки равной скорости подачи проволоки наблюдается качественный сварной шов.

В результате оптимальные энергетические параметры лазерного воздействия для получения без внешних дефектов сварных соединений без проволоки и с присадочной проволокой составили: мощность 3 кВт, скорость сварки 66,7мм/с (без проволоки);

мощность 3 кВт, при скорости подачи проволоки 33 мм/с скорость перемещения лазерного излучения 33,3 мм/с (с проволокой). Положение фокальной позиции относительно верхней границы листа составила -3 мм для обоих видов сварки.

Выводы

Разработано устройство, и методика применения проволоки из сплава АМгб, в сварочную ванну, формируемую с помощью лазерного излучения. Изучено микроструктура сварного шва полученного без и с использования проволоки. В результате применение проволоки из сплава АМгб при лазерной сварки Al-Li сплава, приводит к изменению микроструктуры сварного соединения.

Список литературы

1. Фридляндер И.Н. Создание, исследование и применение алюминиевых сплавов. – М.: Наука, 2013. – 291 с.
2. Rioja R.J., Liu J. The Evolution of Al-Li Base Products for Aerospace and Space Applications // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2012. – № 9. – P. 3325–3337.
3. Алюминий литиевые сплавы для самолетостроения / Л.Б. Хохлатова, Н.И. Колобнев, М.С. Оглодков [и др.] // Металлург. – 2012. – № 5. – С. 31–40.
4. Comparison of the microstructure and mechanical performance of 2A97 Al-Li alloy joints between autogenous and non-autogenous laser welding / J. Ning, L. Zhang, Q. Bai, X. Yin, J. Niu, J. Zhang // Materials and Design. – 2017. – Vol. 120. – P. 144–156.
5. Microstructure and mechanical properties of newly developed aluminum–lithium alloy 2A97 welded by fiber laser / B. Fu, G. Qin, X. Meng, Y. Ji, Y. Zou, Z. Lei // Materials Science and Engineering: A. – 2014. – Vol. 617. – P. 1–11.
6. Double-sided laser beam welded T-joints for aluminum-lithium alloy aircraft fuselage panels: Effects of filler elements on microstructure and mechanical properties / B. Han, W. Tao, Y. Chen, H. Li // Optics and Laser Technology. – 2017. – Vol. 93. – P. 99–108.
7. Xiao R., Zhang X. Problems and issues in laser beam welding of aluminum–lithium alloys // Journal of Manufacturing Processes. – 2014. – Vol. 16. – P. 166–175.
8. Oladimeji O.O., Taban E. Trend and innovations in laser beam welding of wrought aluminum alloys // Welding in the World. – 2016. – Vol. 60. – P. 415–457.
9. Гольшев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М. Исследование микроструктуры высокопрочных лазерных сварных соединений алюминий-литиевых сплавов авиационного назначения // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – № 2. – С. 50–62.

STUDY OF LASER WELDING OF Al-Mg-Li ALLOY WITH FILLER WIRE

Malikov A.G., Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, e-mail: smalik@ngs.ru

Golyshev A.A., Ph.D.(Physics and Mathematics), Scientific associate, e-mail: alexgol@itam.nsc.ru

Vitoshkin I.E., Laboratory assistant, e-mail: igor.vitoshkin.97@mail.ru

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str.,
Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Abstract

In the work, experimental studies were conducted to optimize the laser welding process without and with wire from an alloy of AMg6, an aluminum-lithium alloy of the Al-Mg-Li system. The microstructure of welded joints is investigated. It was found that at a wire feed speed equal to the laser beam speed, high-quality welds are obtained

Keywords

laser welding, aluminum-lithium alloy, filler wire, microstructure.

УДК 621.793.74

**ШЛИФОВАНИЕ НИКЕЛЕВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ,
ОПЛАВЛЕННЫХ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ***

*Е.А. ЗВЕРЕВ, канд. техн. наук, доцент
Н.В. ВАХРУШЕВ, ассистент
С.А. СЛЕПЦОВ, аспирант
Р.Д. ЖАПАРГАЗИНОВ, аспирант
И.В. ЦВЕТОВ, студент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

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

В работе представлены результаты исследования финишной обработки плазменных никелевых покрытий, предварительно подвергнутых высокоэнергетическому нагреву токами высокой частоты. Представлены результаты анализа снимков топографии и профилограммы поверхности после шлифования. После температурного воздействия в покрытии формируется плотная, равномерная структура и практически исчезают поры. Шлифованная поверхность имеет регулярный микрорельеф и низкий уровень шероховатости ($Ra = 0,24$ мкм), что достигается благодаря существенному повышению качественных характеристик структуры в процессе оплавления.

Ключевые слова: плазменное покрытие, комбинированная обработка, токи высокой частоты, никелевый порошок, финишное шлифование, шероховатость.

Введение

Согласно технологическому процессу нанесения износостойких плазменных покрытий на поверхности деталей машин требуется финишная механическая обработка, которая необходима для обеспечения требуемых размерной точности и шероховатости поверхности. Чаще всего в качестве финишной обработки применяется абразивное шлифование.

В последнее время для повышения качества плазменных покрытий применяются комбинированные технологии, суть которых сводится к оплавлению напыленного слоя посредством источника высококонцентрированной энергии [1-3]. Одним из перспективных методов оплавления является высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты (ТВЧ). Существенным достоинством данного метода является технологическая возможность управления глубиной проникновения индукционного нагрева в зависимости от толщины нанесенного покрытия [4 - 8].

В работах [9-11] показано, что при нагреве ТВЧ в структуре износостойких плазменных покрытий происходит повышение качественных характеристик: сокращение

* Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-1_20.

количества пор и нерасплавленных частицы порошка. Также, наблюдается увеличение адгезионной прочности и износостойкости.

Учитывая, что данная комбинированная технология существенно влияет на характеристики напыленного слоя, то и финишная обработка имеет свои особенности, выявление которых требует проведения исследований.

Целью данной работы является исследование шероховатости поверхности оплавленных плазменных покрытий из никелевого порошка после процесса финишного абразивного шлифования.

Методика проведения экспериментов

Исследования шероховатости поверхности после финишной механической обработки проводились на примере износостойких покрытий из самофлюсующегося никелевого порошка марки ПГ-12Н-01 (фракционный размер частиц 50...100 мкм).

Технологическое оборудование и режимные параметры плазменного напыления и последующего оплавления покрытий с помощью ТВЧ описаны в опубликованных ранее работах [10, 11].

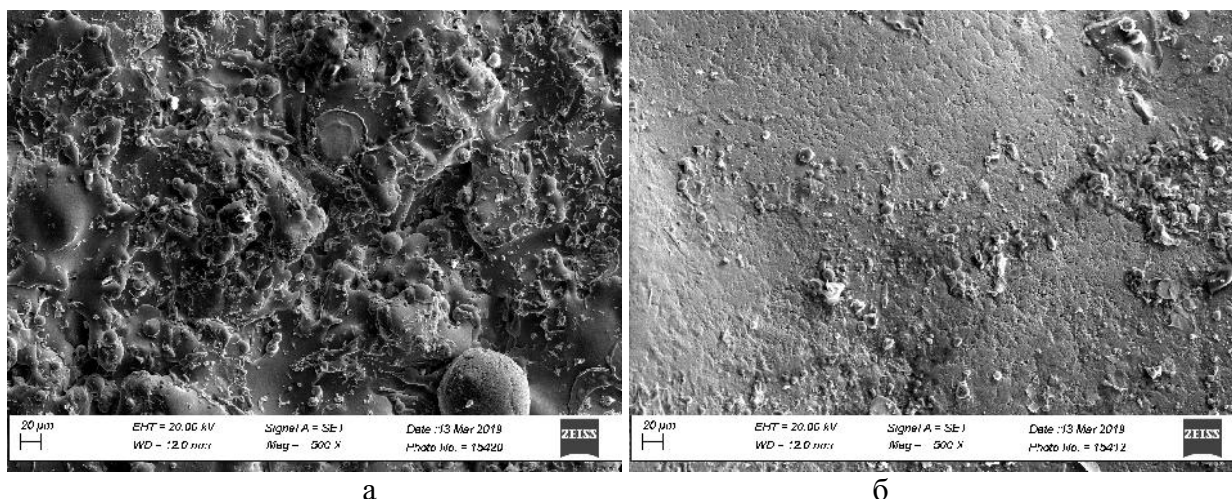
Механическая финишная обработка проводилась на плоскошлифовальном станке модели 3Г71. Заготовки крепились на столе станка с помощью магнитной плиты. Шлифование производилось абразивным кругом диаметром 300 мм из карбида кремния зеленого зернистостью 80 (F24). Использовался круг средней твердости (L), с открытой структурой (8), на бакелитовой связке (В). Режимные параметры выбирались с учетом опыта чистовой обработки износостойких плазменных покрытий [12 - 14].

Частота вращения шпинделя составляла 2250 мин^{-1} (при скорости резания 35 м/с). Поперечная подача соответствовала 0,3 мм на двойной ход стола. С учетом длины детали и перебегов рабочий ход был равен 100 мм, а скорость перемещения стола в продольном направлении составляла 11...14 м/мин, что соответствовало частоте 55...70 двойных ходов в минуту. Глубина резания принималась равной 0,02 мм, снимаемый припуск составлял 0,12...0,15 мм, при толщине напыленного покрытия 0,65...0,70 мм. Смазочно-охлаждающей жидкостью служил раствор на основе воды с добавлением NaNO_3 (2%) с расходом равном 2,4 л/мин. Шлифование производилось за несколько проходов и завершалось процессом выхаживания.

Изучение топографии и измерение шероховатости поверхности покрытий после финишной механической обработки производились с помощью исследовательского комплекса *Zygo New View 7300*.

Результаты исследований

На рисунке 1 изображены снимки неоплавленной и оплавленной поверхностей плазменных никелевых покрытий, полученных с помощью растрового микроскопа марки *Carl Zeiss Axio Observer Alm*.



а

б

Рис. 1. Снимки плазменных никелевых покрытий:

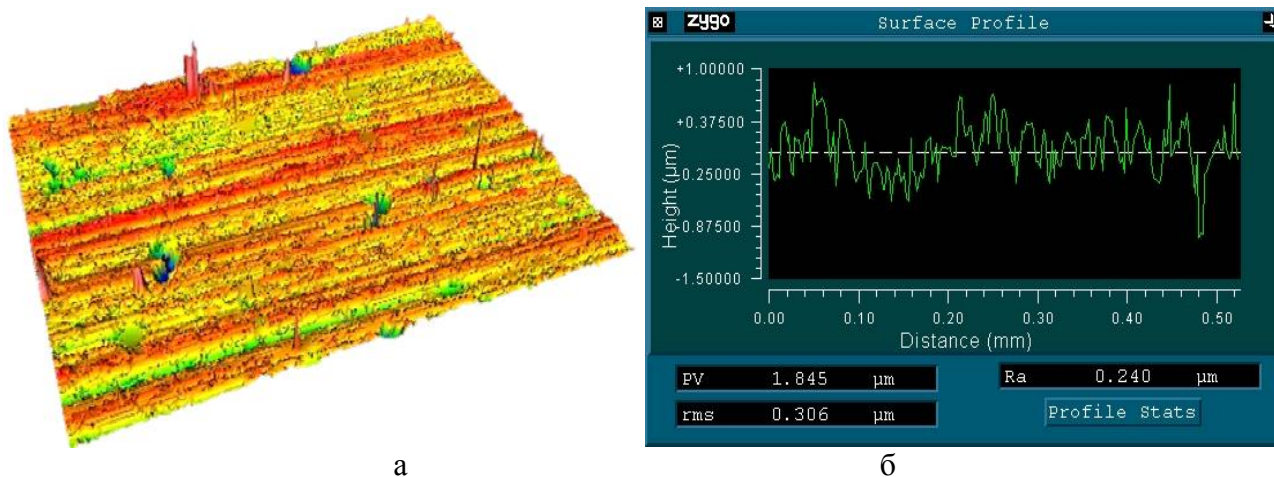
а – неоплавленная поверхность; б – оплавленная поверхность

Грубая структура поверхности напыленного покрытия (рис. 1, а) характеризуется неравномерной проплавленностью частиц порошка и наличием пор.

На рисунке 1, б показан снимок поверхности покрытия после высокоэнергетического воздействия ТВЧ при рациональных режимах оплавления [11]. Анализируя снимок, можно сделать вывод, что в данном случае формируется плотная и равномерная структура, в которой практически в полной мере исчезают поры и нерасплавленные частицы.

В работе [10] отмечено, что при металлографическом анализе поперечных шлифов на переходной границе между покрытием и основой наблюдается равномерный характер, практически отсутствуют дефекты несплошности, что, безусловно, отражается на повышении адгезионной прочности.

На рисунке 2 представлены типовые профилограмма и топография поверхности оплавленного никелевого покрытия после шлифования.



а

б

Рис. 2. Поверхность оплавленного покрытия после шлифования:

а – топография; б – профилограмма

Поверхность оплавленного никелевого покрытия после шлифования в данном случае имеет низкую шероховатость $Ra = 0,24$ мкм, что соответствует уровню чистовой обработки.

Шлифованная поверхность покрытия имеет регулярный характер, не наблюдается открытой пористости, что существенно сказывается на микрорельефе, поскольку повышение

качественных характеристик структуры покрытия за счет оплавления ТВЧ оказывает существенное влияние и на итоговую шероховатость поверхности.

Выводы

После финишного абразивного шлифования поверхность оплавленных плазменных никелевых покрытий обладает низким уровнем шероховатости, что достигается не только процессом механической обработки, но и уровнем качества структуры покрытий, полученным за счет высокоэнергетического оплавления ТВЧ в диапазоне рациональных режимов.

Важно отметить, что при чрезмерно высоком температурном воздействии в поверхностном слое происходит дефектообразование [15], приводящее к противоположному эффекту.

Список литературы

1. Исследование структурных факторов, обеспечивающих повышение механических свойств поверхностных слоев, модифицированных импульсным электронно-пучковым облучением / И.С. Коноваленко, Е.В. Шилько, В.Е. Овчаренко, С.Г. Псахье // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 93–107. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019- 21.1-93-107.
2. Получение упрочняющих покрытий из аморфизируемых сплавов Fe-Cr-Si-B-C лазерно-плазменными методами / М.Н. Хомяков, П.А. Пинаев, П.А. Стаценко, И.Б. Мирошниченко, Г.Н. Грачев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 21–34. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-21-34.
3. Effect of Electron Beam Power Density on the Structure of Titanium Under Non-Vacuum Electron-Beam Treatment / I.V. Ivanov, A. Thoenmes, V.Y. Skiba, A.A. Ruktuev, I.A. Bataev // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2019. – Vol. 60, iss. 9–10. – P. 625–632. – DOI: 10.1007/s11041-019-00329-x.
4. Skeebe 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.
5. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / V.Yu. Skeebe, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyshkin, K.A. Parts // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 126. – Art. 012016. – DOI: 10.1088/1757-899X/126/1/ 012016.
6. *Иванцивский В.В., Скиба В.Ю.* Повышение поверхностной микротвердости стали при интеграции поверхностно-термической и финишной механической обработок // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. – 2006. – № 3 (24). – С. 187–192.

7. Скиба В.Ю. Обеспечение требуемого характера распределения остаточных напряжений при упрочнении высокоэнергетическим нагревом токами высокой частоты // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2007. – № 2 (35). – С. 25–27.
8. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Зуб Н.П. Методика назначения режимов обработки, обеспечивающих рациональное распределение остаточных напряжений при поверхностной закалке ВЭН ТВЧ // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2008. – № 3 (32). – С. 83–94.
9. Increase in wear resistance of nickel plasma coatings under traditional and combined treatment conditions / V.V. Ivancivsky, V.Y. Skeebea, E.A. Zverev, N.V. Vakhrushev, K.A. Parts // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 194, iss. 4. – Art. 042006 (5 p.). – DOI: 10.1088/1755-1315/194/4/042006.
10. Воздействие токов высокой частоты на структуру напыленных никелевых покрытий / Е.А. Зверев, В.Ю. Скиба, Т.Г. Мартынова, Н.В. Вахрушев // Технология машиностроения и материаловедение. – 2018. – № 2. – С. 84–87.
11. Определение технологических режимов оплавления плазменных никелевых покрытий токами высокой частоты / Е.А. Зверев, В.Ю. Скиба, Н.В. Вахрушев, К.А. Титова, Д.Р. Цыплухина // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: материалы 4 междунар. науч.-практ. конф., Чебоксары, 18–20 дек. 2018 г. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С. 201–206. – ISBN 978-5-7677-2778-0.
12. Surface quality of the plasma cermet coatings after grind finishing / E.A. Zverev, V.Y. Skeebea, N.V. Vakhrushev, D.V. Lobanov, N.V. Martyushev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 378: International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering. – Art. 012035 (4 p.). – DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012035.
13. Исследование микрорельефа поверхности плазменных никель-керамических покрытий после финишного абразивного шлифования / Е.А. Зверев, Н.В. Вахрушев, С.Д. Бурдуков, И.Ю. Гулин // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2019. – Т. 6, № 1–4. – С. 174–178.
14. The research into the effect of conditions of combined electric powered diamond processing on cutting power / D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, V.Yu. Skeebea // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 736. – P. 81–85.
15. Оценка износостойкости плазменных никелевых покрытий после нагрева токами высокой частоты / Е.А. Зверев, Н.В. Вахрушев, К.А. Титова, Д.Р. Цыплухина // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2019): сб. тр. 10 междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, Шерегеш, 26–29 нояб. 2019 г. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2019. – С. 485–488. – ISBN 978-5-00137-104-5.

GRINDING OF NICKEL PLASMA COATINGS MELTED BY HIGH FREQUENCY CURRENTS

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

Vakhrushev N.V., Assistant, e-mail: vah_nikit@mail.ru

Sleptsov S.A., Ph.D. student, e-mail: sleptzow7311@yandex.ru

Zhapargazinov R.D., Ph.D. student, e-mail: ruslan2806@outlook.com

Tsvetov I.V., Student, e-mail: ziliboba2001@gmail.com

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

Abstract

The research results of finishing treatment of plasma nickel coatings previously subjected to high-energy heating by high-frequency currents are presented in this paper. The results of the analysis of topography images and surface profilograms after grinding are presented. Dense, uniform structure is formed and the pores practically disappear in the coating after temperature exposure. Ground surface has regular microrelief and low roughness level ($R_a = 0.24 \mu\text{m}$). It is achieved due to a significant increase of quality characteristics of the structure during the melting process.

Keywords

plasma coating, combined treatment, high-frequency currents, nickel powder, finishing grinding, roughness

УДК 621.9

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ЗЕРНА
В МЕТАЛЛ, ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ**

*С.Л. ЛЕОНОВ, доктор техн. наук, профессор
А.М. ИКОННИКОВ, канд. техн. наук, доцент
Д.Е. СОЛОМИН, аспирант
(АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул)*

Леонов С.Л. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: sergey_and_nady@mail.ru

Рассматривается внедрение режущей части магнитно-абразивного зерна в поверхность заготовки методом конечных элементов и путем решения задачи равновесия. Показано что применение *ANSYS Explicit Dynamics* позволяет получить достаточно точный расчет и наглядное изображение процесса, но требует значительных затрат времени на моделирование.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, магнитное поле, шероховатость, глубина внедрения

Введение

Магнитно-абразивная обработка является одним из перспективных методов отделочной обработки. Обработка поверхности (съем металла) определяется взаимодействием зерен, уплотненных магнитным полем, с поверхностью заготовки. Шероховатость формируемой поверхности при этом определяется в первую очередь глубиной внедрения абразивных зерен в металл. При этом сила резания каждым зерном известна, а глубина резания (внедрения зерна в металл) является зависимой величиной, определяемой свойствами обрабатываемого материала, режимом резания и радиусом режущей части зерен.

Теория

Глубина внедрения режущей части зерна в металл определяется упруго-пластической деформацией обрабатываемого материала и временем воздействия зерна на обрабатываемый материал. Нами рассмотрен пример внедрения режущей части магнитно-абразивного зерна в поверхность заготовки. В качестве обрабатываемого материала выбран алюминиевый сплав Al 1100. Исходной шероховатостью обрабатываемой поверхности пренебрегали. Сила резания, приложенная к зерну, $F = 0,004$ н [1]. Радиус режущей части зерна $r = 0,01$ мм.

Для определения глубины внедрения режущей части зерна в металл использован метод конечных элементов. Задача решалась при помощи CAE системы ANSYS Explicit Dynamics [2] (пример расчета приведен на рис. 1). Для обеспечения точности расчетов величина сетки при расчетах принята 0,0003 мм. При данной величине сетки и использовании компьютера с процессором Intel Core I7 имеющем 8 ядер по 3,6 ГГц,

длительность расчета составляла 22 часа. При указанных исходных данных получена глубина резания $t=0,0009176$ мм.

Для снижения времени расчетов было рассмотрено решение задачи равновесия зерна под действием силы резания и давления на его режущую часть – рисунок 2.

При внедрении зерна на глубину t координата x^* определяется выражением:

$$x^* = \sqrt{r^2 - (r - t)^2} = \sqrt{t(2r - t)} \quad (1)$$

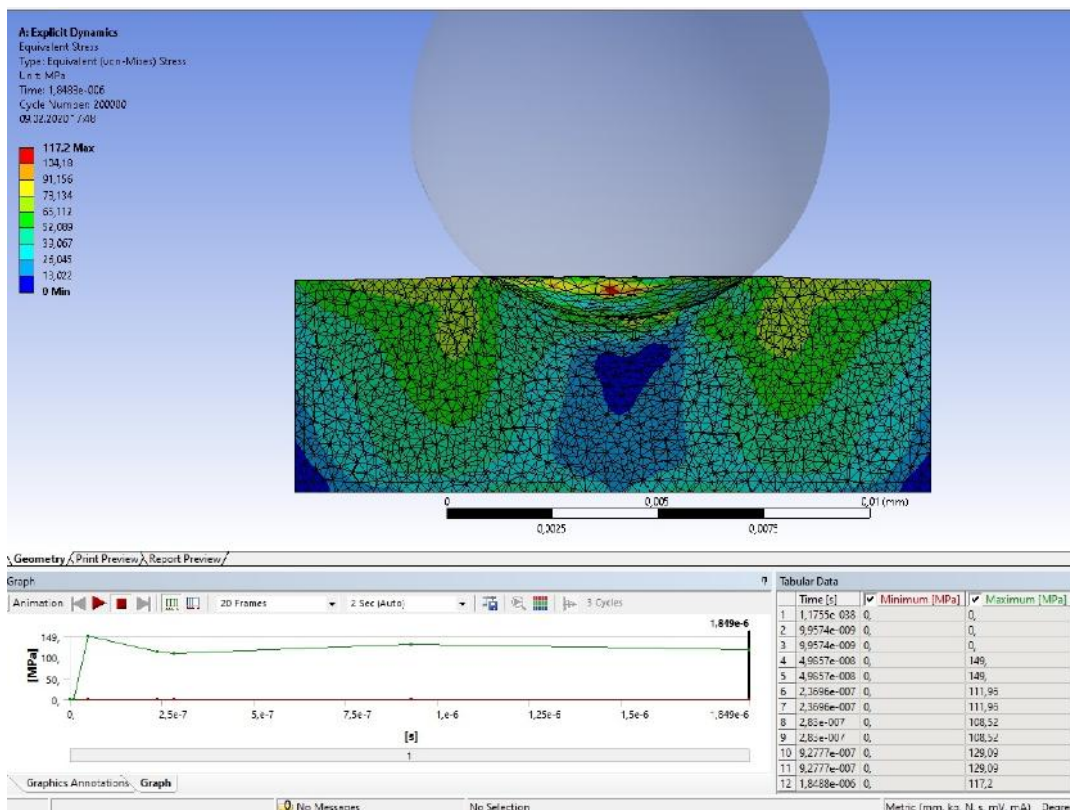


Рис. 1. Экранная форма ANSYS Explicit Dynamics

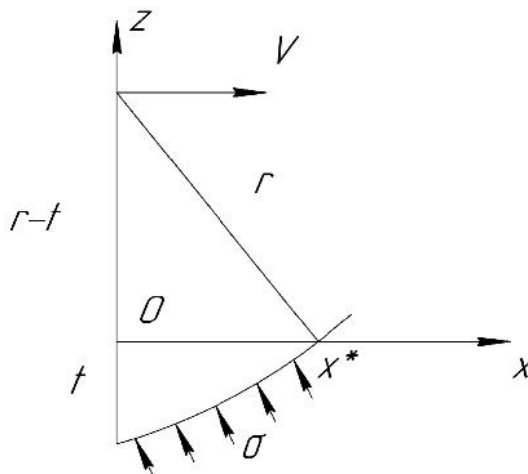


Рис. 2. Схема внедрения зерна

Из уравнения (3):

$$z = r - t - \sqrt{r^2 - x^2 - y^2} \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), получим:

$$\cos \gamma = \frac{\sqrt{r^2 - x^2 - y^2}}{r} \quad (6)$$

На поверхность зерна действует напряжение от пластической деформации при вдавливании зерна σ_{00} . Для расчета силы, действующей вдоль оси z , необходимо это значение домножить на $\sin \gamma$:

$$\sigma_z(x, y) = \sigma_{00} \cdot \sin \gamma \quad (7)$$

Для перехода к силе резания необходимо проинтегрировать выражение (7):

$$F = 4 \int_0^{x^*} \int_0^{\sqrt{(x^*)^2 - x^2}} \sigma_z(x, y) dy dx \quad (8)$$

Полученные выражения можно использовать для определения глубины внедрения зерна под действием силы резания. Для этого необходимо решить уравнение

$$F(t) = F_p \quad (9)$$

где F_p – сила резания.

Глубина резания t входит только в пределы интегрирования через координату x^* .

Решение уравнения (9) с расчетом интеграла (8) позволяет значительно сократить время решения за счет устранения необходимости расчета переходных процессов при внедрении зерна в металл.

Результаты и обсуждения

Рассмотренные подходы для определения глубины внедрения зерна в металл позволяют рассчитывать эту величину от свойств материала, геометрии зерна и параметров режима резания. Метод конечных элементов дает возможность рассчитывать динамические явления, но требует значительного времени для моделирования.

Выводы

1. Применение программного пакета *ANSYS Explicit Dynamics* позволяет получить достаточно точный расчет и наглядное изображение процесса, но требует значительных затрат времени на моделирование.
2. Решение задачи равновесия значительно сокращает время расчетов за счет устранения расчета переходного процесса.

Список литературы

1. Иконников А.М. Теоретические основы обеспечения качества и повышения производительности магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей: дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.07. – Барнаул, 2019. – 311 с.
2. Иванов Д.В., Доль А.В. Введение в AnsysWorkbench: учеб.-метод. пособие для студ. естественно-науч. дисциплин. – Саратов: Амирит, 2016. – 56 с.

**DETERMINATION OF THE PENETRATION DEPTH OF THE CUTTING GRAINS
IN THE METAL, WITH THE MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING**

Leonov S.L., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: sergey_and_nady@mail.ru

Ikonnikov A.M., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: iamagtu@mail.ru

Solomin D.E., Post-graduate Student, e-mail: d147s@mail.ru

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

Abstract

We consider the introduction of the cutting part of the magnetic abrasive grain into the surface of the workpiece by the finite element method and by solving the equilibrium problem. It is shown that the use of ANSYS Explicit Dynamics allows you to get a fairly accurate calculation and visual image of the process, but requires significant time spent on modeling.

Keywords

magnetic abrasive treatment, magnetic field, roughness, depth of penetration.

УДК 621.039.333

**ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА
В ДЕТАЛЯХ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ**

М.И. МАРКОВА, канд. техн. наук, доцент
А.И. ШИЛОВ, магистрант
(АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул)

Маркова М.И. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: margarita-markova@inbox.ru

Электрохимический метод используется для удаления заусенцев электрической энергией в конкретном месте на детали. В деталях топливной аппаратуры имеются дренажные отверстия малого диаметра, расположенные под углом друг к другу. Технологический процесс изготовления таких отверстий не обеспечивает заданную шероховатость обрабатываемой поверхности, так как в конце области сверления при вскрытии отверстия, металл полностью не срезается, а остается в виде заусенца. Для удаления заусенца и растворения металла в зоне пересекающихся отверстий необходимо установить электрод являющийся катодом, на который подаётся постоянный ток отрицательной полярности. Большое значение имеют режимы обработки - напряжение в сети (сила тока) и время обработки. В работе рассмотрено моделирование процесса удаления материала в системе *Solid Works*. Для созданной 3D модели детали, содержащей пересекающиеся отверстия разного диаметра, в системе *Solid Works* определялась масса детали. Затем, путем радиусного скругления в местах пересечения отверстий, убирался материал, и рассчитывалась масса детали после обработки. Зная электрохимический эквивалент материала и изменение массы материала определялось время протекания электрохимического процесса удаления заусенца. В работе представлены расчетные данные изменения массы детали и времени на обработку электрохимическим способом. Приведены зависимости съёма материала от времени обработки.

Ключевые слова: Электрохимический метод удаления заусенцев, обработка отверстий малого диаметра, моделирование процесса обработки.

Введение

Конструктивной особенностью прецизионных деталей топливной аппаратуры является изготовление точных отверстий малого диаметра с низкой шероховатостью. Так при изготовлении корпуса электроуправляемой форсунки необходимо получить два дренажных отверстия диаметром 2 мм с полостью низкого давления, расположенных под углом. По технологическому процессу сначала получают отверстие большего диаметра, а затем ружейным сверлом под углом сверлят отверстия малого диаметра. В конце области сверления при вскрытии отверстия есть опасность образования заусенца [1]. Это обуславливается тем, что при сверлении партии форсунок режущие кромки инструмента притупляются, силы резания возрастают и металл за счет деформации не срезается полностью, а частично остается на кромке пересечения отверстий в виде заусенца [2, 3]. В процессе эксплуатации форсунки образовавшийся заусенец под действием пульсирующего давления отпадает и потоком топлива уносится в распылитель, что приводит к выходу ее из

строю. Опасность образования заусенцев имеется и при изготовлении таких деталей топливной аппаратуры, как штуцер выходной высокого давления, втулка плунжера насоса, корпус клапана наполнительного.

Образовавшиеся в процессе изготовления заусенцы необходимо удалить. Существуют несколько способов: механический, автоматизированный на станке с ЧПУ, давлением, взрывом, электрохимический [4-7].

Самым простым методом удаления заусенцев является механический метод. Но он не приемлем для труднодоступных для обработки мест. Не все перечисленные методы позволяют достигать требуемой производительности и стабильности процесса обработки.

Одним из наиболее эффективных методов удаления заусенцев в условиях среднесерийного и крупносерийного производства является электрохимический метод [8-10], так как обеспечивает высокую производительность процесса и удаление заусенцев электрической энергией в конкретном месте на детали. Внедрение данного метода в серийное производство изготовления деталей топливной аппаратуры приведет к снижению трудоемкости производственного процесса.

Электрохимическим методом обрабатываются только электропроводящие материалы [11]. На обрабатываемую деталь, которая является анодом, подается напряжение постоянного тока. Электрод, который является катодом, располагают в отверстие непосредственно у заусенца. Через обрабатываемое отверстие под давлением пропускают электролит – концентрированный раствор соли. Под воздействием электрического тока металлический заусенец растворяется и формируется качественная радиусная поверхность. Преимуществом метода является то, что твердость материала и его макроструктура на поверхности остаются без изменений, микротрещины не образуются.

Теория

В обрабатываемой детали на пересечении отверстий, где необходимо убрать заусенец, устанавливается электрод – катод, на который подается постоянный ток отрицательной полярности. На деталь, которая выступает в качестве анода, в свою очередь подается постоянный электрический ток. Через обрабатываемое отверстие под давлением 4–5 бар пропускается электролит в виде 20% раствора соли.

Управление процессом осуществляется посредством изменения напряжения в цепи (сила тока), потока электролита и времени цикла [12-15]. Кроме того, качество радиусной поверхности зависит и от материала детали, расположения отверстий, радиуса отверстий. Для деталей, содержащих несколько отверстий разного диаметра, есть опасность разъедания отверстий меньшего диаметра. Поэтому, для таких деталей необходимо провести эксперименты и определить расстояние на установку электрода и оптимальной силы тока в зависимости от диаметра обрабатываемого отверстия.

Моделирование процесса удаления заусенцев и образования радиусного скругления в зоне пересекающихся отверстий проводилось в системе *Solid Works*. Для этого была создана 3D модель корпуса насоса (рис. 1). Конструктивно корпус содержит топливопроводящие пересекающиеся отверстия диаметром 5 мм. Так как материал корпуса – алюминиевый сплав АК 7Ч, то определить массу корпуса до обработки в системе *Solid Works* не составляет труда (рис. 2).

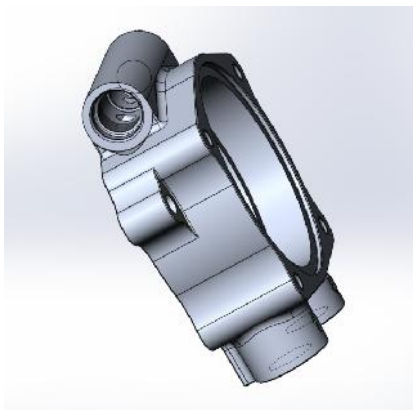


Рис. 1. 3D модель корпуса насоса

По формуле первого закона электролиза Фарадея масса растворенного материала определяется как:

$$m = k \cdot I \cdot t, \tag{1}$$

где m - масса растворенного материала; I - сила тока, проходящая через деталь; k - электрохимический эквивалент материала; t - время обработки.

Таким образом, изменение массы оказывает влияние на время обработки и силу тока. Если смоделировать процесс удаления заусенца в системе Solid Works с помощью образования радиусного скругления в месте пересечения отверстий, то можно рассчитать массу детали после моделирования и определить разность масс до и после обработки.

Тогда время протекания процесса определится по формуле:

$$t = \frac{m}{k \cdot I}. \tag{2}$$

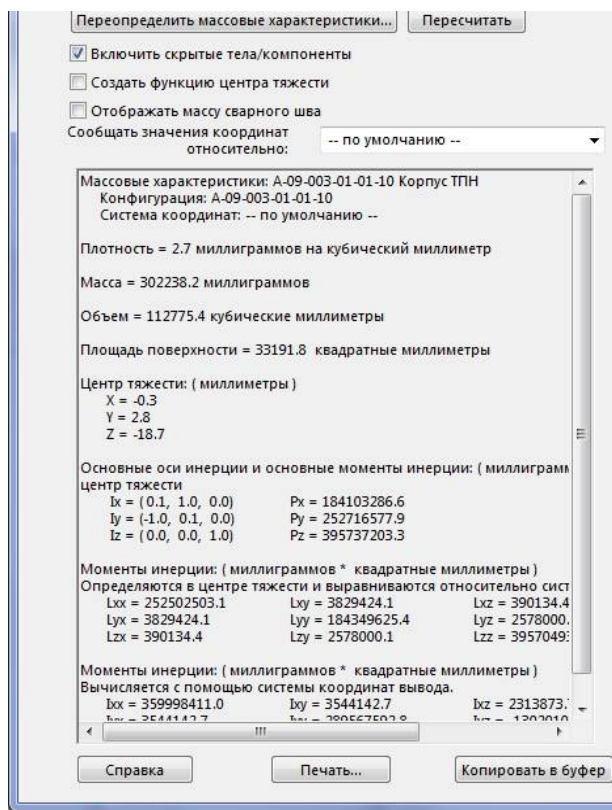


Рис. 2. Исходная масса детали

Результаты и обсуждение

Эксперимент по получению данных проводился для отверстий диаметром 3 мм, 4 мм и 5 мм. Скругление диаметров моделировалось разными радиусами: 0,9 мм, 1,2 мм и 1,9 мм (рис. 3). После чего проводился расчет массы детали (рис. 4), данные заносились в таблицу 1.

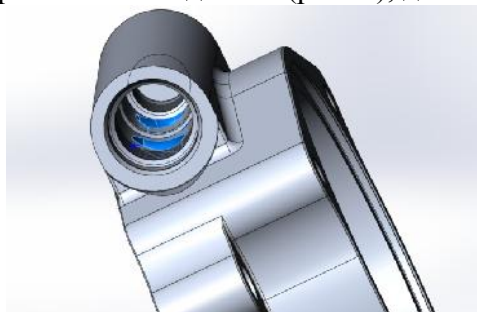


Рис. 3. Моделирование скругления радиусом 1,2 мм

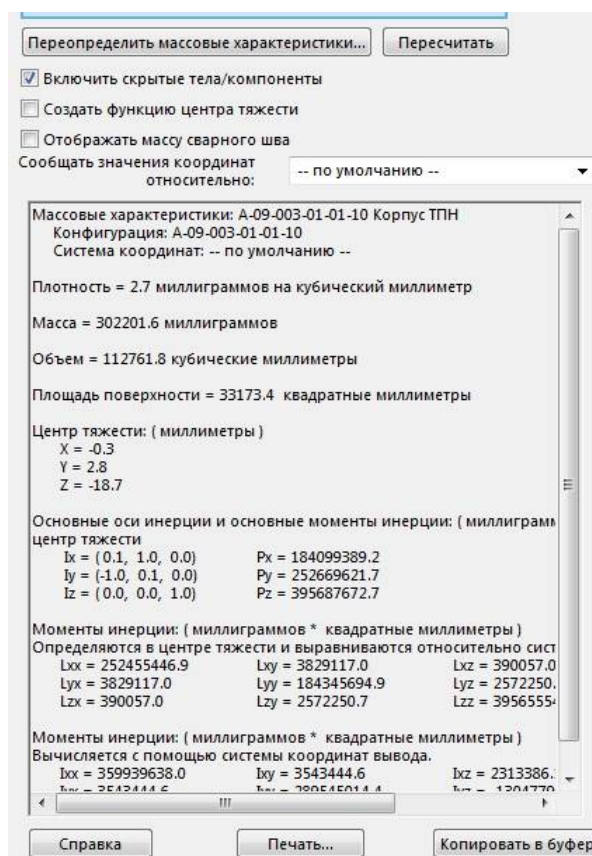


Рис. 4. Расчет массы детали с радиусом скругления 1,2 мм

Таблица 1

Расчётные данные массы детали из алюминиевого сплава

Диаметр, мм	Масса обработки, г	Масса после обработки с R0,9, г	Масса после обработки с R1,2, г	Масса после обработки с R2, г
3	302,238	302,216	302,201	302,155
4	301,734	301,707	301,69	301,632
5	301,094	301,066	301,047	301,986

Изменение массы материала Δ_T при разных радиусах скругления приведено в таблице 2.

Таблица 2

Изменение массы материала			
Диаметр, мм	Δ_1 при R0,9, г	Δ_2 при R1,2, г	Δ_3 при R2, г
3	0,022	0,037	0,083
4	0,027	0,044	0,102
5	0,028	0,047	0,108

Зная электрохимический эквивалент алюминия $k = 9,3 \cdot 10^{-8}$ кг/Кл по формуле 2 определяем время протекания процесса, задавшись значением силы тока в 60 А (таблица 3).

Таблица 3

Расчётные данные времени обработки детали из алюминиевого сплава при силе тока 60 А

Диаметр, мм	Время протекания процесса Δ_1 , сек	Время протекания процесса Δ_2 , сек	Время протекания процесса Δ_3 , сек
3	3,9	6,6	14,9
4	4,8	7,9	18,3
5	5,0	8,4	19,4

По расчетным данным построены графики, показывающие изменение съема материала от времени для деталей из алюминиевого сплава (рис. 5) и получены зависимости.

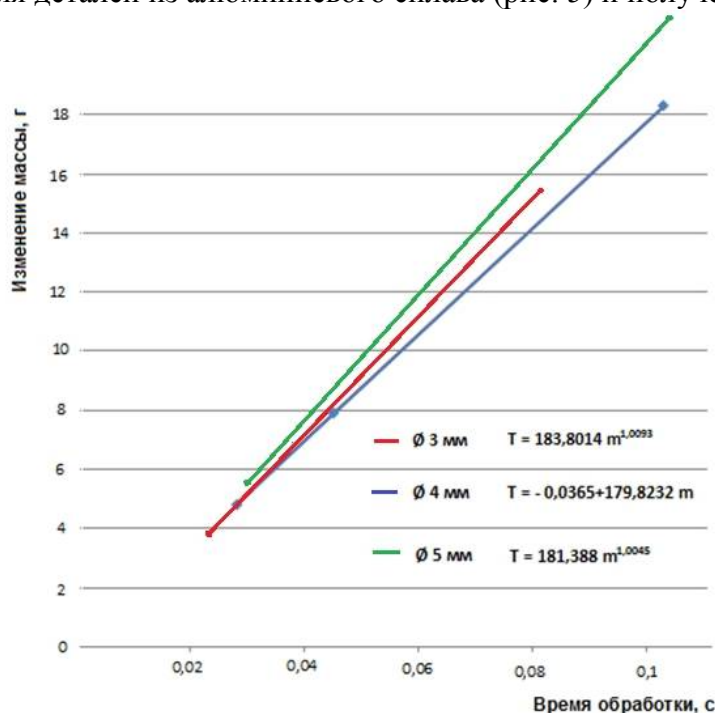


Рис. 5. Съём материала от времени для детали из алюминиевого сплава

Выводы

Таким образом, зависимости съёма материала от времени обработки позволят определять время (Т) протекания процесса электрохимической обработки деталей из алюминиевого сплава, конструктивно имеющие отверстия разных диаметров.

Список литературы

1. *Шилов А.И., Маркова М.И.* Проблемы обработки отверстий малого диаметра при изготовлении корпуса форсунки // Молодежь – Барнаул: материалы 20 городской науч.-практ. конф. молодых ученых, Барнаул, 5–13 нояб. 2019 г. – Барнаул, 2019. – С. 299.
2. *Карачев А.В.* Влияние явления застойной зоны на величину сил резания при обработке отверстий глубоким сверлением ружейными сверлами // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2019. – № 1 (48). – С. 32–38.
3. *Торопов А.А.* Прогнозирование и минимизация заусенцев при обработке резанием, моделированием процессов их образования: дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01. – СПб., 1999. – 235 с.
4. Станок для электрохимического удаления заусенцев и скругления острых кромок / Н.Ф. Камалов, Л.А. Галимова, М.В. Ватуев, Т.В. Галиев // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: материалы 7 Всерос. науч.-техн. конф., Уфа, 23–24 марта 2017 г. – Уфа, 2017. – С. 124–129.
5. *Маслов А.В., Егорилов А.И.* Электрохимическое удаление заусенцев // Проблемы и перспективы развития машиностроения: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. Липецк, 17–18 нояб. 2016 г. – Липецк, 2016. – С. 164–167.
6. *Гонибесова Е.В., Коротких М.Т.* Электрохимическое удаление заусенцев с мелких деталей в условиях автоматизированного производства // Неделя науки СПбПУ. Лучшие доклады: материалы науч. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 19–24 нояб. 2018 г. – СПб., 2018. – С. 106–110.
7. *Kwon B.C., Ko S.L., Kim K.H.* New abrasive deburring method using suction for micro burrs at intersecting holes // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 65, № 1. – P. 145–148.
8. *Маслов А.В., Маслов А.А.* О роли геометрического фактора и режима обработки при электрохимическом удалении заусенцев // Управление качеством продукции в машиностроении и авиакосмической технике (ТМ-18): сб. науч. тр. 10 междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 23–24 мая 2018 г. – Воронеж, 2018. – С. 37–40.
9. *Zheng X.H., Wei Z.F., Yu Z.Y.* Electrochemical deburring of miniature holes // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 690–693. – P. 3226–3230.
10. Deburring Miniature Components by Electrochemical Method / S.-J. Lee, C. P. Liu, T. J. Fan, Y.-H. Chen // International Journal of Electrochemical Science. – 2013. – № 8. – P. 1713–1721.
11. *Евсеев Д.Г., Гуськов А.Н.* Основы технологии электрофизических и электрохимических методов обработки: учеб. пособие для студентов специальностей «Технология машиностроения» и «Технология вагоностроения». – М.: МИИТ, 2007. – 81 с.
12. *Шилов А.И., Маркова М.И.* Особенности электрохимической обработки отверстий деталей топливной аппаратуры [Электронный ресурс] // Наука и молодежь: материалы 16 Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И. И. Ползунова, 2019. – Т. 2. – С. 263–264. – ISBN 978-5-7568-1308-1. – Режим доступа: https://journal.altstu.ru/konf_2019/2019_2/16/. – Загл. с экрана.
13. *Рахмянов Х.М., Василевская С.И., Рахмянов К.Х.* Особенности электрохимической прошивки малых отверстий изолированным катодом-инструментом // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018): тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. : в 8 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 2. – С. 118–121.

14. *Sarkar S., Mitra S., Bhattacharyya B.* Mathematical modeling for controlled electrochemical deburring (ECD) // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2004. – Vol. 147, № 2. – P. 241–246.

15. *Wei Z.F., Zheng X.H., Yu Z.Y.* Mathematical modeling and experimental study on electrochemical deburring of miniature holes // *Advanced Materials Research.* – 2013. – Vol. 721. – P. 382–386.

PROCESSING SMALL DIAMETER HOLES IN DETAILS FUEL EQUIPMENT

Markova M.I., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: margarita-markova@inbox.ru
Shilov A.I., Graduate students, e-mail: andryxarallist@mail.ru

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

Abstract

An electrochemical method is used to remove burrs with electrical energy at a specific location on a part. In the details of the fuel equipment there are drainage holes of small diameter, located at an angle to each other. The technological process of making such holes does not provide the desired roughness of the surface to be processed, since at the end of the drilling area, when opening the hole, the metal is not completely cut off, but remains in the form of a Burr. To remove the Burr and dissolve the metal in the area of intersecting holes, it is necessary to install an electrode that is a cathode, which is supplied with a direct current of negative polarity. The processing modes - network voltage (current) and processing time-are of great importance. The paper considers modeling of the material removal process in the Solid Works system. For the created 3D model of a part containing intersecting holes of different diameters, the solid Works system determined the mass of the part. Then, by radius rounding at the intersection of the holes, the material was removed, and the mass of the part after processing was calculated. Knowing the electrochemical equivalent of the material and the change in the mass of the material, the time of the electrochemical process of removing the Burr was determined. The paper presents the calculated data of changes in the mass of the part and the time for processing by electrochemical method. The dependences of material removal on the processing time are given.

Keywords

Electrochemical deburring, processing of small diameter holes, modeling the processing process

УДК 621.9.04, 621.9.06 (075.8)

**ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ*****В.В. ИВАНЦИВСКИЙ**, доктор. техн. наук, доцент**К.А. ТИТОВА**, аспирант**С.А. СЛЕПЦОВ**, аспирант**Р.Д. ЖАПАРГАЗИНОВ**, аспирант**И.В. ЦВЕТОВ**, студент

(НГТУ, г. Новосибирск)

Титова К.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: krispars@yandex.ru

В формировании параметров качества поверхности, главную роль играет крайняя операция, как и происходит на типичных для производства технологических линиях. В соответствии с этим, возникает надобность более подробно разобрать технологию финишной обработки, в нашем случае рассматривается операция алмазного выглаживания.

Обработка производилась на гибридном токарном оборудовании, которое в свою очередь позволяло осуществить на этом же технологическом оборудовании закалку ВЭН ТВЧ. Отслеживание и контроль структурных составляющих выполнялся при помощи растровой и оптической микроскопии. Далее с применением рентгеновских и механических методов удалось выяснить, какого напряженно-деформированное состояние упрочненного слоя, а также определить остаточные напряжения.

Ключевые слова: алмазное выглаживание, гибридное оборудование, шероховатость, режимы обработки, комплексование, твёрдость, остаточные напряжения.

Введение

Из года в год повышение качества изготовления изделия и сокращение энергозатрат на производстве приобретает все большую и большую актуальность. В связи с этим очень активно начинает развиваться станкостроение, происходит модернизация или усовершенствование имеющегося оборудования. В качестве ярко выраженного примера можно представить новый тип технологического оборудования - многофункциональные гибридные обрабатывающие комплексы [1 - 11]. Данное технологическое оборудование позволяет комбинировать различные виды обработок детали. Таким образом, мы можем увидеть в работе авторов Ding H.T., Shin Y.C.[12] комбинирование лазерной поверхностной закалки с механической обработкой или совмещение на одном технологическом оборудовании абразивного шлифования и поверхностной закалки и т. д.

Вариации комбинирования слишком многочисленны, все это связано с тем, что появляется возможность автоматизировать технологический процесс, достичь минимальных энергетических затрат, при этом иметь хорошую производительность и повысить показатели

* Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-1_20.

характеристик поверхностного слоя в том числе: точность формы, размеров, а также точность взаимного расположения поверхностей, заданных физико-механических свойств и шероховатости.

Для проведения исследований в данной работе была выбрана следующий порядок операций: черновое точение, поверхностная закалка ТВЧ [13 - 15] и алмазное выглаживание.

Выше уже было сказано, что финишная операция оказывает наибольшее влияние на формирование показателей качества поверхностного слоя в том числе: шероховатость, величину и характер распределения микротвердости, остаточные напряжения, микроструктуру и др. Поэтому главная цель исследования – произвести анализ обрабатываемой поверхности, полученной на гибридном оборудовании с использованием операции алмазного выглаживания.

Методика проведения экспериментов

Исходя из проведенного эксперимента выяснили, что во время первого перехода (чернового точения) образуется поверхность которая не имеет дефектов. Шероховатость данной поверхности составляет $Ra\ 3,3 \pm 0,7$ мк.

Что касемо второго перехода, то при соблюдении четких параметров глубины резания ($h = 0,6$ мм) в процессе поверхностной закалки ВЭН ТВЧ был произведен оптимальный подбор, с помощью решения системы уравнений режимных параметров таких, как удельная мощность ($q_{и}$ [Вт/м²]), скорость перемещения индуктора ($V_{д}$ [м/с]) и рассеивание остаточных напряжений в слое Ψ .

Параллельно был произведен графический метод определения рекомендуемых параметров и представлен он на рисунке 1. Дело в том, что для определения необходимы исходные данные. В нашем случае ими являются параметры обрабатываемого материала (Сталь 45) и глубина упрочняемого слоя 0,6 мм. По итогу мы можем увидеть на рисунке 1, что в соответствии с нашими требованиями можно выделить участок на кривой от точки А до В. Этот отрезок показывает диапазон наиболее рациональных параметров при выполнении закалки в том числе $q_{и} = (3,0...3,4) \cdot 10^8$ Вт/м², $V_{д} = (0,072...0,081)$ м/с. Входящие режимные параметры в выделенную зону обеспечивают требуемую глубину закалки и оптимальную величину переходной зоны.

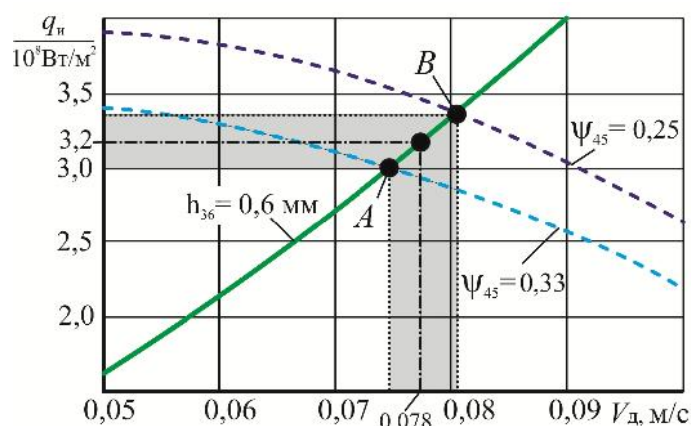


Рис. 1. Зависимость удельной мощности источника от его скорости движения при закалке ВЭН ТВЧ стали 45 на глубину $h_{45} = 0,6$ мм.

При соблюдении режимных данных необходимо обеспечить такой параметр, как определенная частота вращения шпинделя. Было принято решение произвести

усовершенствование привода главного движения и снабдить его частотным преобразователем HF Inverter model F1500-G0015S2B.

По итогу эксперимента были получены следующие результаты микротвердости и микроструктуры поверхностного слоя (Рисунок 2).

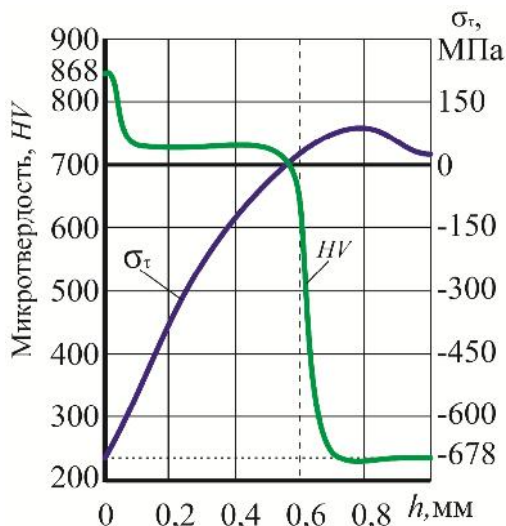


Рис. 2. Распределение микротвердости и остаточных напряжений в поверхностном слое стали 45 после алмазного выглаживания

Среднее значение микротвердости поверхностного слоя, после данного типа закалки, составило 739 HV, но при этом сердцевина изделия имела микротвердость равную 204 HV. Переходная структура состояла из зерен феррита и низкоуглеродистого мартенсита. Глубина данного слоя составила 0,17 мм. Поскольку в этой зоне имеются включения феррита, можно сделать вывод о том, что нагрев был произведен в диапазоне A_{c1} – A_{c3} диаграммы железа-углерод.

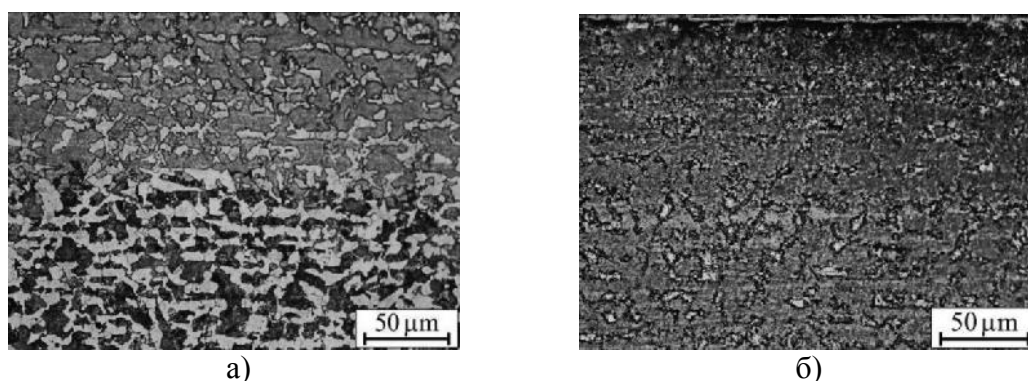


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя стали 45 после поверхностной закалки ВЭН ТВЧ: а – участок закаленного слоя; б – участок переходной зоны.

Распределение остаточных напряжений в закалочном слое можно увидеть на рисунке 4а. Исходя из измерений $\sigma_{\tau} = -560 \pm 20$ МПа. Максимум растягивающих напряжений составил $\sigma_{\tau} = 75 \pm 45$ МПа и находится на глубине 0,8 мм.

Следующим этапом являлось чистовое точение. По результатам операции шероховатость обработанного участка составила $Ra = 1,2 \pm 0,2$ мкм. Обратим внимание, что обработка производилась размер в размер, а микротвердость и остаточные напряжения сохранились с предыдущей операции.

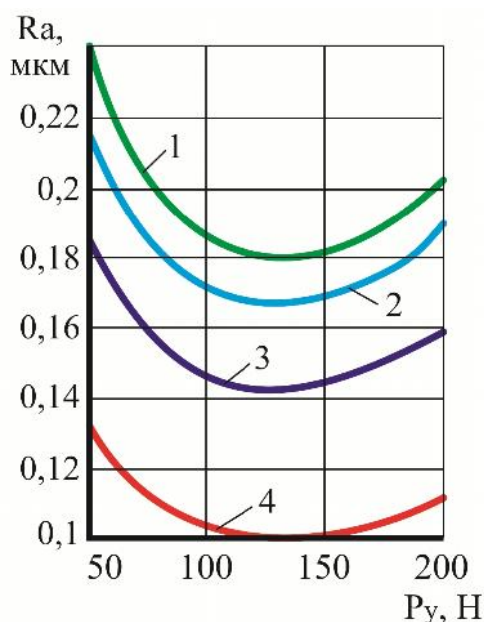
Заключительной технологической операцией являлось алмазное выглаживание. Данная операция способствует получению пластической деформации в поверхностном слое, что соответственно приводит к упрочнению, высокой износостойкости изделия и не только. Проконтролировать обработанный участок возможно топографическим методом. В таком случае отображение поверхностного слоя после пластической деформации имеет округлую форму микрорельефа, без задиrow и вырывов.

В результате, изменение микронеровностей в сторону увеличения происходило в большей степени, из-за изменения величины подачи $S_{o \text{ выгл.}}$. После производилась оценка шероховатости R_a при изменении силы P_y .

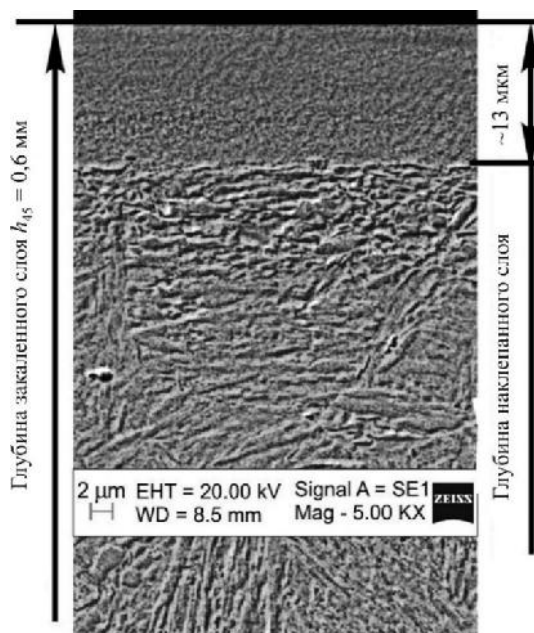
По итогу пришли к выводу, что в диапазоне от 50 Н до 100 Н, R_a интенсивно уменьшается, а от 100 Н до 150 Н, шероховатость имеет устойчивое значение $R_a = 0,18 \pm 0,08$ мкм (рисунок 4а). Поэтому определим функциональную зависимость шероховатости R_a от скорости $V_{\text{выгл.}}$, подачи $S_{o \text{ выгл.}}$, для конкретных значений силы выглаживания: $P_y=100\text{Н}$, $P_y=150\text{Н}$.

Достижимый минимум R_a , в процессе обработки составил $\sim 0,1$ мкм при режимных параметрах $V_{\text{выгл.}}=25,3$ м/мин; $S_{o \text{ выгл.}}=0,018\text{мм/об}$; $P_y=150$ Н

Структурный метод исследования показал, что при алмазном выглаживании толщина наклепанного слоя (пластически деформируемого) составляет 0,01...0,02 мм (рисунок 4б). Кроме того, можно наблюдать увеличение в упрочненном слое, как микротвердости 868 НВ, так и отрицательных напряжений $\sigma_\tau = -678 \pm 20$ МПа.



а)



б)

Рис. 4. Качество обработанной поверхности:

- а) зависимость параметра шероховатости R_a от силы выглаживания P_y :
 1 – $V_{\text{выгл.}} = 25,3$ м/мин, $S_{o \text{ выгл.}} = 0,08$ мм/об; 2 – $V_{\text{выгл.}} = 33,2$ м/мин, $S_{o \text{ выгл.}} = 0,06$ мм/об;
 3 – $V_{\text{выгл.}} = 33,2$ м/мин, $S_{o \text{ выгл.}} = 0,04$ мм/об; 4 – $V_{\text{выгл.}} = 25,3$ м/мин, $S_{o \text{ выгл.}} = 0,018$ мм/об;
 б) микроструктура поверхностного слоя после алмазного выглаживания.

Результаты и обсуждение

По итогу исследования было выявлено, что дополнительное оснащение гибридного токарного станка операцией алмазного выглаживания, привела к повышению не только характеристик микротвердости, но и уровню отрицательных остаточных напряжений. Данный факт был обнаружен на переходе от закалки токами высокой частоты к выглаживанию. По итогу обработки удалось получить высококачественный наклепанный слой, толщина которого составляет 0,01...0,02 мм, причем микротвердость соответствует ~ 868 HV, а значение отрицательных напряжений увеличилось до $\sigma_{\tau} = -678 \pm 20$ МПа. В результате был получен необходимый диапазон силы выглаживания $P_y \in [100; 150]$ Н, при котором можно достигнуть шероховатость $R_a = 0,18 \pm 0,08$ мкм. Далее появилась возможность охарактеризовать и получить четкую зависимость параметров шероховатости от назначенных режимов обработки для гибридного типа оборудования, с учетом высокой производительности и низких энергозатрат.

Выводы

В ходе исследования было выявлено, что применение алмазного выглаживания в качестве финишной операции, в процессе интегрированной обработки, приводит к повышению параметров качества и упрочнению поверхностного слоя детали. Применение высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты наглядно доказало, что с его помощью возможно увеличить микротвердость поверхности изделия и уровень сжимающих напряжений на $\sim 15...20\%$. Доказано, что с использованием данной технологии формируется закалочный слой, толщина которого составляет 0,01...0,02 мм, микротвердость имеет значение ~ 868 HV, а уровень остаточных отрицательных напряжений возрастает до $\sigma_{\tau} = -678 \pm 20$ Мпа. Помимо этого, необходимо контролировать диапазон значений силы выглаживания от $P_y=100$ Н до $P_y=150$ Н, поскольку он является не мало важным фактором при формировании шероховатости R_a . При выполнении данного условия, параметр R_a будет иметь минимальное значение $0,18 \pm 0,08$ мкм.

Приведенная в работе функциональная зависимость R_a ($V_{\text{выгл}}$, $S_{o \text{ выгл}}$) дает возможность наиболее рационально назначать режимы алмазного выглаживания с учетом максимальной производительности и обеспечением наилучшего качества поверхности обрабатываемых деталей.

Список литературы

1. Макаров В.М. Комплексированные обрабатывающие системы // Ритм. – 2011. – № 8. – С. 20–23.
2. Development of a New Turning Center for Grinding Ceramic Materials / T. Nakagawa, K. Suzuki, T. Uematsu, M. Kimura // CIRP Annals. – 1988. – Vol. 37, iss. 1. – P. 319–322. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61644-8.
3. Garro C., Martin P., Veron M. Shiva a Multi-arms Machine Tool // CIRP Annals. – 1993. – Vol. 42, iss. 1. – P. 433–436. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.
4. Nagae A. Development Trend of Multi-tasking Machines // 11th International Conference on Machine Tool Engineers: proc. – 2004. – P. 312–323.
5. Moriwaki T. Multi-functional machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 57. – P. 736–749. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.

6. *Fleischer J., Schmidt-Ewig J.P., Weule H.* Innovative Machine Kinematics for Combined Handling and Machining of Three-dimensional Curved Light-weight Extrusion Structures // *CIRP Annals.* – 2005. – Vol. 54, iss. 1. – P. 317–320. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60112-7.

7. The research into the effect of conditions of combined electric powered diamond processing on cutting power / D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, V.Yu. Skeebe // *Key Engineering Materials.* – 2017. – Vol. 736. – P. 81–85.

8. *Скиба В.Ю., Иванцовский В.В.* Гибридное металлообрабатывающее оборудование: повышение эффективности технологического процесса обработки деталей при интеграции поверхностной закалки и абразивного шлифования = Hybrid metal working equipment: improving the effectiveness of the details processing under the integration of surface quenching and abrasive grinding: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 312 с. – ISBN 978-5-7782-3690-5.

9. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю.* Гибридное металлообрабатывающее оборудование. Технологические аспекты интеграции операций поверхностной закалки и абразивного шлифования = Hybrid metal working equipment. Technological aspects of integrating the operations of surface hardening and abrasive grinding: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 348 с. – ISBN 978-5-7782-3988-3.

10. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools–I – Analysis of requirements and specifications / M. Nakaminami, T. Tokuma, M. Moriwaki, K. Nakamoto // *International Journal of Automation Technology.* – 2007. – Vol. 1, iss. 2. – P. 78–86. – DOI: 10.20965/ijat.2007.p0078.

11. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / V.Yu. Skeebe, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyshkin, K.A. Parts // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2016. – Vol. 126. – Art. 012016. – DOI: 10.1088/1757-899X/126/1/ 012016.

12. *Ding H.T., Shin Y.C.* Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2010. – Vol. 50, iss. 1. – P. 106–114.

13. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю.* Повышение поверхностной микротвердости стали при интеграции поверхностно-термической и финишной механической обработок // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета.* – 2006. – № 3 (24). – С. 187–192.

14. *Скиба В.Ю.* Обеспечение требуемого характера распределения остаточных напряжений при упрочнении высокоэнергетическим нагревом токами высокой частоты // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* – 2007. – № 2 (35). – С. 25–27.

15. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Зуб Н.П.* Методика назначения режимов обработки, обеспечивающих рациональное распределение остаточных напряжений при поверхностной закалке ВЭН ТВЧ // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета.* – 2008. – № 3 (32). – С. 83–94.

INTEGRAL PROCESSING AND RESULTS OF RESEARCH QUALITY OF THE SURFACE LAYER

Ivancivsky V. V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ivancivskij@corp.nstu.ru

Titova K.A., Post-graduate Student, e-mail: krispars@yandex.ru

Sleptsov S.A., Ph.D. student, e-mail: sleptzow7311@yandex.ru

Zhapargazinov R.D., Ph.D. student, e-mail: ruslan2806@outlook.com

Tsvetov I.V., Student, e-mail: ziliboba2001@gmail.com

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

Abstract

In the formation of surface quality parameters, the main role is played by the extreme operation, as occurs on typical production lines. In accordance with this, there is a need to analyze in more detail the technology of finishing processing, in our case, the operation of diamond smoothing is considered.

Processing was carried out on hybrid turning equipment, which, in turn, made it possible to quench VEN HDTV on the same technological equipment. Tracking and control of structural components was performed using raster and optical microscopy. Then, using x-ray and mechanical methods, it was possible to find out what stress-strain state of the hardened layer, and also to determine the residual stresses.

Keywords

diamond smoothing, hybrid equipment, roughness, processing modes, aggregation, hardness, residual stresses.

УДК 621.7

**ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
ОТ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ**

*А.Д. ЖАРГАЛОВА, ст. преподаватель
Р.В. ЗУЕВ, студент
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)*

Жаргалова А.Д. – 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
e-mail: azhargalova@bmstu.ru

Введение. В современном мире, предприятия должны ориентироваться на производство качественной продукции. Надежность, долговечность, безопасность и ресурс являются одними из основных параметров, обеспечение которых необходимо при машиностроительном и авиационном производстве. Часто встречающейся проблемой является наличие остаточных напряжений в маложестких деталях из алюминиевых сплавов после их механической обработки. Влияние остаточных напряжений распространяется не только на геометрическую точность деталей, а также может привести к снижению усталостной прочности. Существующие экспериментальные, теоретические и теоретико-экспериментальные формулы имеют зачастую сложны, а также имеют трудности с учетом геометрии ВКО. На величину возникающих остаточных напряжений влияет большое количество параметров, однако, во многом величина остаточных напряжений связана с технологическими параметрами производства. Такими параметрами являются режимы резания. Управление режимами позволяет спрогнозировать величину остаточных напряжений, и в следствие, устранить необходимость последующей доработки поверхностей. Цель работы заключается в исследовании зависимости изменения геометрических размеров (деформаций) от режимов резания при условии наличия остаточных напряжений. В работе рассматривается случай механической обработки фрезерованием вафельной конструкции обечайки с использованием концевой фрезы. **Методы исследования:** анализ существующих методик и моделирование в системе ANSYS численная МКЭ-модель обработки заготовки. **Результаты и обсуждение.** Представлены результаты расчета напряжений и деформаций в процессе механической обработки, а также остаточные напряжения после снятия нагрузки с заготовки. Анализ результатов позволяет сделать вывод о влиянии величины подачи на распределение остаточных напряжений в поверхностном слое. Установлено, что в результате увеличения величины подачи общие напряжения меняются незначительно. Увеличивается глубина залегания остаточных напряжений в результате увеличения глубины залегания остаточных деформаций.

Ключевые слова: вафельные конструкции обечайки (ВКО), остаточные напряжения, фрезерование, метод конечных элементов, режимы резания, компьютерное численное моделирование.

Введение

В настоящее время существует множество исследований, рассматривающих вопрос прогнозирования остаточных деформаций детали. Этот вопрос является актуальным, так как

требования к конструкциям, производимым на авиационных предприятиях, сводятся к обеспечению надежности, долговечности, безопасности и ресурса [1]. Одной из самых эффективных разработок в области авиастроения оказалось внедрение в производство вафельных конструкций обечайки (ВКО). Вафельная конструкция обечайки — это тонкостенная оболочка с продольными и поперечными ребрами, обеспечивающими оболочке повышенную жесткость [2].

Величина остаточных напряжений связана с технологическими условиями обработки тонкостенных конструкций, а их распространение в поверхностном слое во многом зависит от геометрии и материала обрабатываемого элемента [3-5].

В работе [6] представлена зависимость между технологическими условиями обработки и значениями остаточных напряжений. На основе анализа представленных данных можно сделать вывод, что целесообразно управление остаточными деформациями путем изменения режимов резания [7]. Управление режимами резания не усложняет подготовку технологического процесса изготовления. Одним из перспективных методов подготовки технологического процесса является использование «мягких» режимов резания [8]. Управление остаточными деформациями на этапе подготовки технологического процесса является перспективным направлением исследований, так как позволяет снизить время и себестоимость производственного процесса путем исключения процессов обработки остаточных напряжений после обработки [9, 10].

Среди существующих методов изучения остаточных напряжений выделяются теоретические, теоретико-экспериментальные и экспериментальные [11]. Все эти методы не учитывают ряд определенных факторов, одним из которых является сложность геометрии конструкции ВКО.

Цель работы — исследовать зависимость изменения геометрических размеров (деформаций) от режимов резания при условии наличия остаточных напряжений.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать существующие методики расчёта и оценки напряжённо-деформированного состояния элемента ВКО после механической обработки;
- разработать численную модель процесса обработки стенки вафельной конструкции обечайки фрезерованием, учитывающую свойства материала вафельной конструкции и режущего инструмента;
- разработать методику моделирования остаточных напряжений в поверхностном слое ВКО;
- произвести оценку возникающих деформаций стенок после их механической обработки с заданными технологическими условиями.

Методика исследований

Для проведения исследования зависимости остаточных напряжений и деформаций от технологических условий обработки детали путем компьютерного моделирования процесса резания необходимо определить аналитические зависимости между управляемыми и управляющими параметрами. Управляемым параметром является сила резания, а управляющим режимы резания, а именно значение величины подачи.

Так как моделирование проводится в программном комплексе ANSYS, то необходимо учесть условия моделирования в данной среде. Параметром, с помощью которого задаются характер резания фрезой заготовки, является момент резания. Поэтому в условиях рассматриваемого эксперимента управляемым параметром становится момент резания. Необходимо определить зависимость между величиной силы резания и моментом резания при фрезеровании.

Согласно [12] момент резания определяется следующим образом:

$$M = \frac{P_z * D}{2};$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания; D – диаметр фрезы.

Теперь для управления силой резания необходимо определить зависимость этого параметра от управляющего, то есть от величины подачи. Основное воздействие на стенки при обработке оказывает тангенциальная составляющая силы резания. Ее зависимость от подачи определяется следующим соотношением:

$$P_z = C * t^x * s_z^y * B^z * D^q;$$

где C – коэффициент; t – глубина резания, мм; s_z – подача на зуб, мм/зуб; B – ширина фрезы, мм; x, y, z, q – показатели степени.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что при увеличении значения подачи увеличивается величина силы резания, а соответственно и величина момента резания. Остаточные напряжения в поверхностном слое деталей при лезвийной обработке возникают от действия сил резания. Остаточные напряжения от действия силового фактора удобно определять по зависимостям, подробно описанным в работе [13]. По представленным формулам определяются напряжения от действия силового фактора по передней поверхности инструмента:

$$\sigma'_x = \frac{R * \sin(\beta_1)}{2\pi * a_1 * b_1 * \sin(\beta_1 + z_1)} * (2 * (\theta'_2 - \theta'_1) - (\sin(2 * \theta'_2) - \sin(2 * \theta'_1)));$$

$$\sigma'_y = \frac{R * \sin(\beta_1)}{2\pi * a_1 * b_1 * \sin(\beta_1 + z_1)} * (2 * (\theta'_2 - \theta'_1) + (\sin(2 * \theta'_2) - \sin(2 * \theta'_1)));$$

$$\tau'_{xy} = \frac{R * \sin(\beta_1)}{2\pi * a_1 * b_1 * \sin(\beta_1 + z_1)} * (\cos(2 * \theta'_2) - \cos(2 * \theta'_1));$$

А по следующим формулам определяются напряжения от действия силового фактора по задней поверхности инструмента:

$$\sigma''_x = \frac{R_1}{2\pi * \Delta * b_1 * \sin(z_2)} * \left(\theta''_1 - \theta''_2 - \frac{1}{2} (\sin(2 * \theta''_1) - \sin(2 * \theta''_2)) \right);$$

$$\sigma''_y = \frac{R_1}{2\pi * \Delta * b_1 * \sin(z_2)} * \left(\theta''_1 - \theta''_2 + \frac{1}{2} (\sin(2 * \theta''_1) - \sin(2 * \theta''_2)) \right);$$

$$\tau''_{xy} = \frac{R_1}{2\pi * \Delta * b_1 * \sin(z_2)} * (\cos(2 * \theta''_1) - \cos(2 * \theta''_2));$$

Данные зависимости позволяют построить напряжения в поверхностном слое детали от передней и от задней поверхности отдельно. Суммарные напряжения от сил резания определяются алгебраическим сложением напряжений от передней и от задней поверхностей.

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma'_x + \sigma''_x \\ \sigma_y = \sigma'_y + \sigma''_y \\ \tau_{xy} = \tau'_{xy} + \tau''_{xy} \end{cases}$$

Остаточные напряжения от силового воздействия определяются в соответствии с теоремой Генки о разгрузке:

$$\sigma_{\text{сил}}(y) = \begin{cases} \sigma_{x\text{ост}}(y) = (\sigma'_x(y) - \sigma'_x(h)) + (\sigma''_x(y) - \sigma''_x(h_1)), \\ \sigma_{y\text{ост}}(y) = (\sigma'_y(y) - \sigma'_y(h)) + (\sigma''_y(y) - \sigma''_y(h_1)), \\ \tau_{xy\text{ост}}(y) = (\tau'_{xy}(y) - \tau'_{xy}(h)) + (\tau''_{xy}(y) - \tau''_{xy}(h_1)). \end{cases}$$

Можно сделать вывод о том, что величина остаточных напряжений возрастает с увеличением режущих сил. Как следствие, при увеличении величины подачи величина остаточных напряжений будет также увеличиваться. При моделировании для изучения зависимости будет варьироваться величина момента резания.

Процесс моделирования рассматриваемого процесса начинается с определения геометрических параметров системы «инструмент-заготовка». Далее необходимо задать параметры рассматриваемых материалов. Как было сказано выше для заготовки выбирается алюминиево-литиевый сплав В-1469, а для модели инструмента – инструментальная сталь. Важным моментом подготовки процесса моделирования рассматриваемой задачи является задание контактной пары между взаимодействующими поверхностями. В качестве «контактной» поверхности выбирается - фреза, а в качестве «целевой» - заготовка. Выбирается вид контакта, предполагающий наличие трения между инструментом и заготовкой. Далее приступаем к основной части процесса подготовки – разбиению модели на конечные элементы. Выбираем позицию Contact Sizing, которая позволяет генерировать сетку с одинаковой плотностью на контактирующих поверхностях. Тип производимого расчета Static Structural. В первом опыте проводим моделирование процесса фрезерования. Для этого задаются граничные условия, повторяющие закрепление заготовки. А также крутящий момент для описания характера движения фрезы.

Полученное при первом расчете напряженное состояние становится начальным условием для проведения второго расчета. Для этого необходимо загрузить в решатель результаты первого эксперимента.

Для моделирования остаточных напряжений необходимо снять внешнюю нагрузку, поэтому фреза из расчета исключается посредством команды кода APDL.

Результаты и их обсуждение

Сначала необходимо провести моделирование самого процесса фрезерования для получения начальных условий рассмотрения возникновения остаточных напряжений [14, 15].

В результате моделирования получаем распределение эквивалентных напряжений и деформаций для каждого рассматриваемого случая. Распределение эквивалентных напряжений и максимальные напряжения для каждого из случаев представлены на рисунке 1.

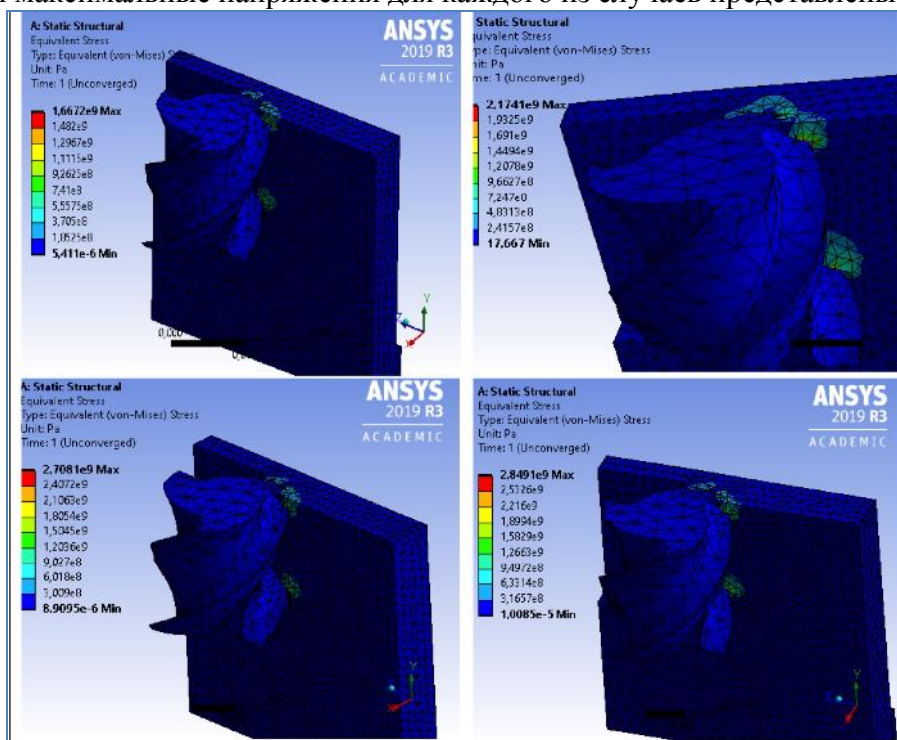


Рис. 1. Распределение эквивалентных напряжений ($S_z = 0,04; 0,06; 0,08; 0,1$ мм/зуб)
Распределение деформаций после обработки представлено на рисунке 2.

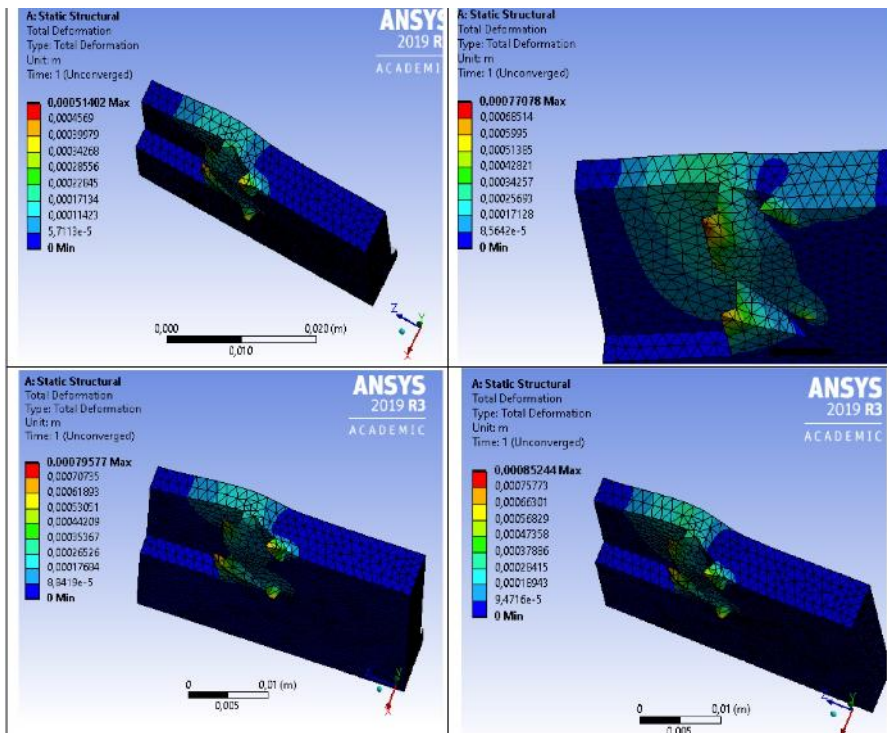


Рис. 2. Распределение деформаций ($S_z = 0,04; 0,06; 0,08; 0,1$ мм/зуб)

Далее, по полученным в предыдущем эксперименте результатам проводится исследование распределения остаточных напряжений. В итоге получены следующие распределения остаточных напряжений (рис. 3).

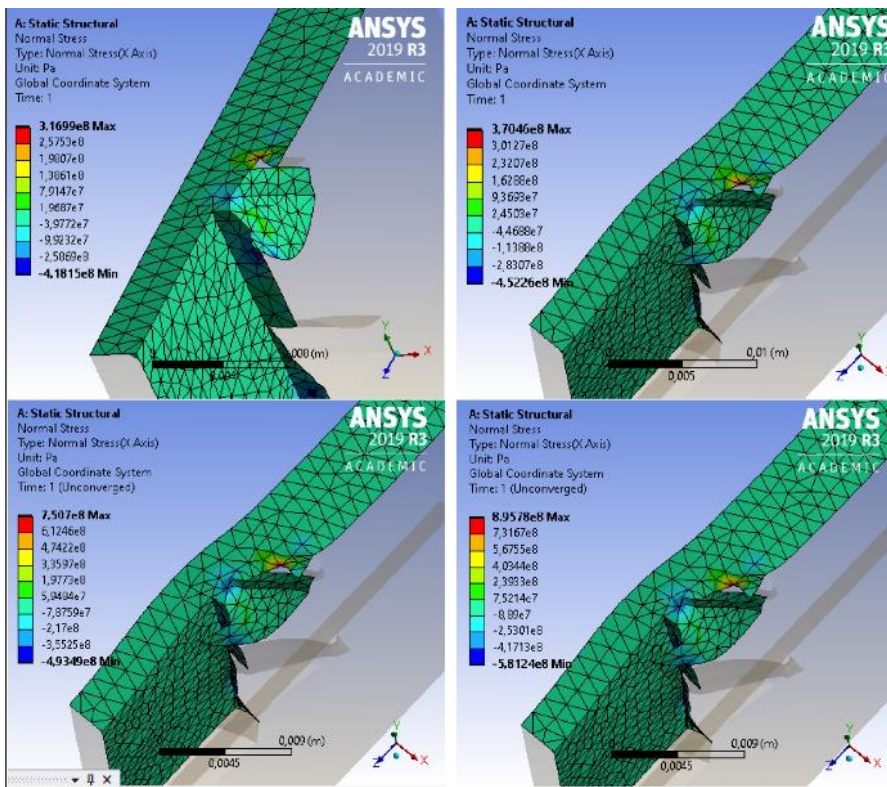


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений ($S_z = 0,04; 0,06; 0,08; 0,1$ мм/зуб)

Для исследования зависимости распределения остаточных напряжений в обработанной детали от подачи выгружаются значения координат узлов и соответствующие им напряжения. Полученные данные используются для построения графиков распределения остаточных напряжений по глубине (рисунок 4)

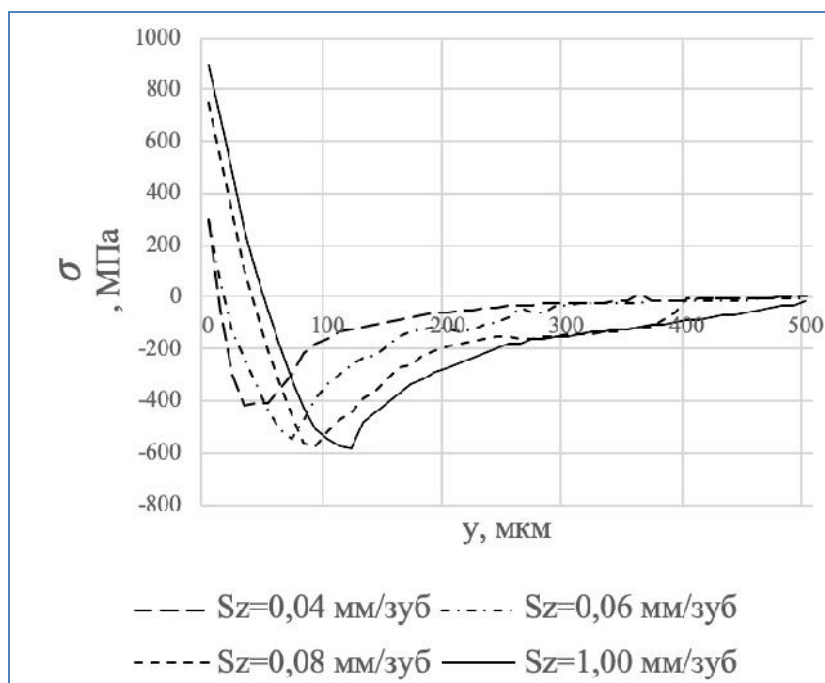


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое

Выводы

В работе была рассмотрена зависимость деформации от режимов резания при условии наличия остаточных напряжений. В процессе работы были проанализированы существующие методики расчета и оценки напряженно-деформированного состояния элемента ВКО после механической обработки, в том числе с использованием средств компьютерного моделирования.

Как показывает расчет, при увеличении подачи увеличивается глубина залегания остаточных напряжений, что объясняется увлечением глубины $\sigma_{ост}$, МПа залегания деформаций h и h_1 и силовых остаточных напряжений.

Полученные данные в дальнейшем планируется использовать для разработки алгоритма и методики определения технологических условий фрезерования вафельных конструкций обечайки.

Список литературы

1. Еремейкин П.А., Жаргалова А.Д., Гаврюшин С.С. Проблема технологических деформаций при фрезерной обработке тонкостенных заготовок // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 17–27. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-17-27.

2. Юрцев Е.С. Высокоскоростная обработка «вафельных» обечаек из алюминиевых сплавов // Технология машиностроения. – 2012. – № 9. – С. 5–8.

3. Учет остаточных напряжений при расчетах прочности элементов замковых соединений. Ч. 2. Влияние остаточных напряжений на напряженно-деформированное состояние хвостовика лопатки турбины / Б.Е. Васильев, И.А. Киселев, Н.А. Жуков, А.Н. Селиванов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 12. – С. 58–67. – DOI: 10.18698/0536-1044-2018-12-58-67.

4. Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Седов А.В. Реализация метода деформирующего резания ротационными резцами. Определение геометрических параметров зоны обработки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 1. – С. 67–73.

5. Investigation of redistribution mechanism of residual stress during multi-process milling of thin-walled parts / M. Guo [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 103. – № 1–4. – P. 1459–1466.

6. Сулов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.

7. Optimization of cutting conditions for minimum residual stress, cutting force and surface roughness in end milling of S50C medium carbon steel / N. Masmiahi [et al.] // Measurement. – 2016. – Vol. 86. – P. 253–265.

8. О «мягких» режимах резания для обработки тонкостенных деталей / А.Д. Жаргалова [и др.] // Вестник евразийской науки. – 2016. – Т. 8, № 6 (37). – С. 117.

9. Prediction of surface residual stress after end milling based on cutting force and temperature / Y. Ma [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Vol. 235. – P. 41–48. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.04.002.

10. Xu W.F., Yan R., Liu W.W. Surface residual stress of Gamma Titanium Aluminide in milling process // Aeronautical Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 529. – P. 82–85. – DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.10.082.

11. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев [и др.] ; под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.

12. Расчет режимов резания. Курсовое и дипломное проектирование по технологии машиностроения : учеб. пособие / В.В. Марков, А.В. Сметанников, П.И. Кискеев, Л.И. Лебедева, Д.А. Ветчинников. – Орёл: ОрелГТУ, 2010. – 112 с.

13. Александров А.А. Моделирование термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18. – Иркутск, 2016. – 165 с.

14. Zuev R.V., Zhargalova A.D. The Research of Processing Methods of Thin-Walled Waffle Constructions Taking into Account Technological Deformations // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 977. – P. 157–162. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.977.157.

15. Hybrid modeling with finite element and statistical methods for residual stress prediction in peripheral milling of titanium alloy Ti-6Al-4V / D. Yang [et al.] // International Journal of Mechanical Sciences. – 2016. – Vol. 108. – P. 29–38. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.01.027.

THE APPLICATION OF THE NUMERICAL COMPUTER MODELLING TO EXPLORE THE DEPENDENCE OF THE RESIDUAL STRESSES ON MACHINING PARAMETERS**Zhargalova A.D.**, Senior Lecturer, e-mail: azhargalova@bmstu.ru**Zuev R.V.**, Student, e-mail: veuznamor@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, 5 Baumanskaya 2-ya, Moscow, 105005, Russian Federation

Abstract

Introduction. In the modern world enterprises have to pay attention to quality of the products. Reliability, durability, safeness and resource are the ones of the most important parameters, which will be provided during production. There are some problems during the machining of the waffle constructions of the shell. One of the problems is occurrence of residual stresses, which influence on geometry accuracy of the shell and decrease fatigue strength. Existing experimental, theoretical and theoretical-experimental formulas are sophisticated and doesn't take into account geometry of the shell. There are a lot of parameters which influence on the value of the residual stresses, but it really depends on technological parameters of the machining, such as machining parameters. Control of the parameters allows to predict the value of the residual stresses, so that to eliminate the necessity of the postproduction machining of the surfaces. **The aim of the work** is to explore the dependence of the residual deformations on the machining parameters taking into account the residual stresses. **Exploring methods:** analysis of the existing methods and modelling numerical FEM-model of the milling process in ANSYS software. **Results and discussions.** Results of the experiment on stresses and deformations during the milling are presented, so as residual stresses after removing of the external stresses. The analysis of the results allows to make the decision about influence of feed on the residual stresses in the surface. Common stresses weren't changed a lot by changing the feed value. The depth of the residual stresses was increased by increasing the feed value.

Keywords

waffle constructions of the shell, residual stresses, milling, finite element method, machining parameters, computer numerical modelling

УДК 621.787.6

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА НЕЗАКРЕПЛЕННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

В.В. ГАРБУЗОВ, магистрант
В.П. ГИЛЕТА, канд. техн. наук, доцент
(НГТУ, г. Новосибирск)

Гарбузов В.В. - 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: vladimir.garbuzow97@yandex.ru

В работе проанализированы схемы поверхностного пластического деформирования ультразвуковым инструментом. Выявлено, что в большинстве случаев используется жесткое закрепление индентора к волноводу. Схема обработки с незакрепленным деформатором используется, в основном, для формообразования. Анализ используемых схем ультразвуковой обработки выявил их основные особенности. Применение незакрепленного индентора позволяет исключить локализацию зоны износа и увеличить время его работы, а потери акустической энергии в зоне «индентор-волновод» могут быть частично исключены за счет подбора амплитудно-частотных характеристик ультразвуковых колебаний. Установлено, что работ по изучению закономерностей формирования микрогеометрического и физико-механического состояния при поверхностном пластическом деформировании ультразвуковым инструментом с незакрепленным индентором достаточно мало и представляет практический и теоритический интерес углубленное изучение этого вопроса.

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, незакрепленный инструмент, ультразвук, формирование поверхностного слоя.

Введение

Ультразвуковая обработка является одним из перспективных методов поверхностного пластического деформирования. Активное внедрение в производство данный метод получил в 60-е гг. двадцатого века. Многочисленными исследованиями доказана эффективность использования ультразвуковой энергии при обработке твердых и хрупких материалов, а также при поверхностном пластическом деформировании. Однако процент внедрения ультразвуковой технологии существенно мал по сравнению с объёмом проводимых исследований.

Теория

В основных схемах ультразвуковой обработки предусмотрено жесткое крепление инструмента к волноводу (рисунок 1). При этом индентор имеет постоянную область контакта с обрабатываемой деталью, что существенно ограничивает время его работы, так как изнашивание происходит на небольшом локальном участке, что снижает производительность обработки и увеличивает время технологического цикла, в следствии необходимости частой замены индентора.

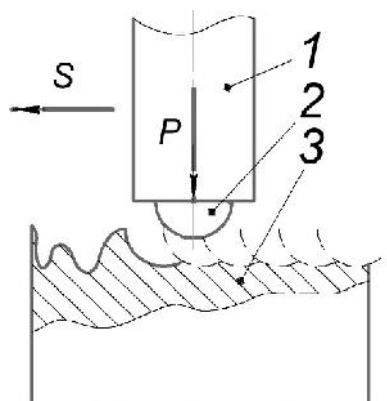


Рис. 1. Ультразвуковая обработка закрепленным инструментом.
1 – волновод, 2 – индентор, 3 – обрабатываемая поверхность

Отказ от жесткого крепления индентора к акустической системе влечет за собой увеличение срока его службы за счет возникновения хаотического вращения инструмента и вовлечение в процесс изнашивания различных участков поверхности индентора.

Кроме вышесказанных достоинств ультразвуковая обработка с незакрепленным инструментом имеет и недостатки, в частности, потери акустической энергии в зоне «индентор-волновод». Этот недостаток может быть минимизирован за счет подбора амплитудно-частотных параметров обработки [1-3]. Так же при обработке индентором, имеющим форму тела вращения помимо трения скольжения имеет место трение качения, что также сказывается на условиях контактирования тел и напряженно деформированном состоянии в зоне обработки.

В современном машиностроении известно несколько типов ультразвуковых систем, не имеющих жесткого контакта между инструментом и волноводом. Первой разработанной схемой ультразвуковой обработки с нежестко закрепленным инструментом принято считать устройство для ультразвуковой обработки открытых сферических поверхностей [4]. В настоящее время в США фирмой «Боинг» используется ультразвуковое клепальное устройство [5], которое использует основную идею [4].

На рисунке 2, а представлена схема ультразвуковой обработки сферических поверхностей незакрепленным инструментом в виде шара. Для обработки многоместного штампового инструмента с несколькими сферическими рабочими поверхностями, имеющими жесткие координатные связи, данную схему модернизировали (рис. 2, б). При сообщении ультразвуковой головке вращения (рис. 2, б) вокруг своей оси $S_{кр}$ получили схему обработки тороидальной поверхности (рис. 2, в). Подобная схема сильно упрощает конструкцию и удешевляет инструмент, снижает вспомогательное время на смену инструмента [1].

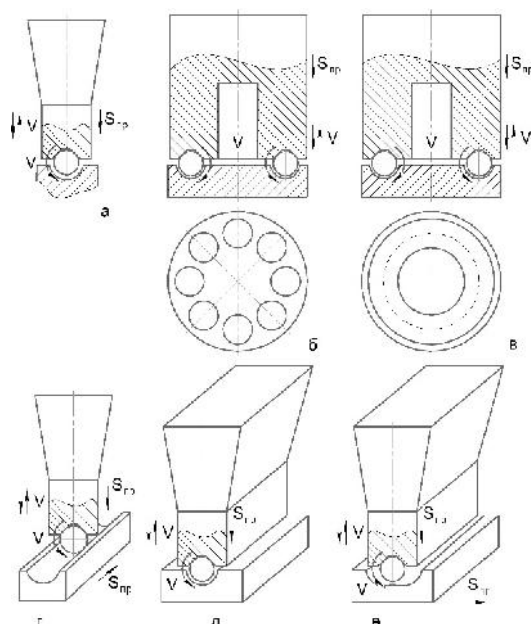


Рис. 2. Кинематические схемы размерной ультразвуковой обработки незакрепленным инструментом [1].

На рисунке 2, г показана схема, работа которой в большей степени схожа со схемой (рис. 2, а). Основным отличием является то, что обрабатываемой детали придается дополнительное перемещение $S_{кр}$ за счет чего можно получать сферические канавки. Рабочий инструмент может иметь произвольную форму тела вращения. В случаях, показанных на рисунках 2, д., и 2, в. поверхность обкатывается роликом, что позволяет обрабатывать значительно большую поверхность за один проход.

Для обработки сложных поверхностей: тороидальные отверстия, винтовая канавка и др., инструменту или детали сообщается дополнительная подача (рис 3).

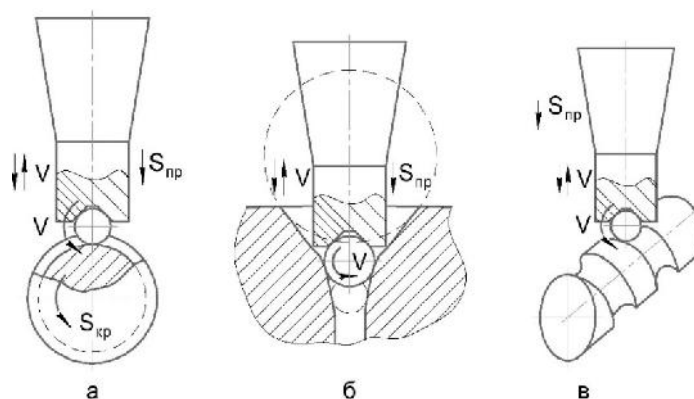


Рис. 3. Схемы обработки сложных поверхностей незакрепленными инструментами [1].

Авторами работ [6] установлено высокая экономическая эффективность применения обработки незакрепленным инструментом по сравнению с закрепленным.

Рассмотренные схемы обработки с незакрепленным индентором использовались только для формообразования поверхностей. Поэтому полученные закономерности не могут полностью быть распространены на формирование микрогеометрию и физико-механическое

состояние поверхностного слоя при обработке ультразвуковым инструментом с незакрепленным индентором.

Выводы

Проведенный анализ показал, что основные закономерности формирования качества поверхностного слоя при поверхностном деформировании ультразвуковым инструментом установлены для схемы неподвижного присоединения индентора к волноводу. Упрочняюще-чистовая обработка ультразвуковым инструментом с незакрепленным индентором практически не используется.

Использование незакрепленного индентора упрощает конструкцию и удешевляет разработку инструмента. Схема с незакрепленным инструментом более технологична с точки зрения замены индентора. Хаотическое вращение инструмента обеспечивает равномерность его износа, что увеличивает срок его эксплуатации. Недостатком данной схемы является наличие потерь акустической энергии в зоне «индентор-волновод».

Список литературы

1. Захаров О.В., Бржозовский Б.М. Ультразвуковая обработка нежестко закрепленными инструментами: учеб. пособие. – Саратов: Сарат. гос. тех. ун-т, 2002. – 101 с.
2. Горбунов А.А., Захаров В.В., Захаров О.В. Кинематика ультразвуковой размерной обработки твердых и хрупких материалов незакрепленными инструментами // Исследования станков и инструментов для обработки сложных и точных поверхностей: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1998. – С. 89–93.
3. Кочерженко В.Г., Захаров В.В. Ультразвуковое упрочнение наружных фасонных поверхностей // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1996. – С. 112–116.
4. А.с. 191328 СССР, МКИ В 23 Р 49L. Устройство для ультразвуковой обработки открытых сферических поверхностей / А.А. Горбунов, Е.П. Калинин, В.М. Салтанов // Бюллетень изобретений и товарных знаков. – 1967. – № 3.
5. Libby C.C. Sonic Reveting of Aircraft Aluminum Alloys // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. – 1969. – Vol. 16, № 3. – P. 117–125.
6. Физические основы, технологические процессы и оборудование ультразвуковой обработки материалов / Н.В. Бекренев, Б.М. Бржозовский, О.В. Захаров, Д.В. Трофимов. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. – 208 с.

ULTRASONIC PROCESSING WITH UNFIXED TOOL

Garbuzov V.V., Graduate students, e-mail: vladimir.garbuzow97@yandex.ru

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

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

Abstract

The paper analyzes the schemes of surface plastic deformation with an ultrasound tool. It was found out that in most cases the rigid fixation of the indenter to the waveguide is used. The scheme of processing with unfixed deformer is mainly used for forming. The analysis of used ultrasonic processing schemes revealed their main features. The use of unfixed indenter allows excluding the localization of the wear zone and increasing its operating time, and the loss of acoustic energy in the "indenter-waveguide" can be partially excluded by the selection of amplitude-frequency characteristics of ultrasonic vibrations. It is established that the works on studying the regularities of formation of micro-geometric and physical-mechanical state at surface plastic deformation with an ultrasonic instrument with an unfixed indenter are rather small and of practical and theoretical interest to study this issue in depth.

Keywords

ultrasonic processing, unfixed tool, ultrasonic, formation of the surface layer

УДК 621.9.047

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ГЕЛИЙ-НЕОНОВОГО ЛАЗЕРА
НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ РАСТВОРЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ**

*Д.Е. ДУБИНИН, магистрант
Н.П. ГААР, канд. техн. наук, доцент
(НГТУ, г Новосибирск)*

Дубинин Д.Е. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: dima.dubinin97@gmail.com

В работе представлены результаты исследований по влиянию излучения гелий-неонового лазера на характер электрохимического растворения материала. Исследования проводились при помощи сравнения поляризационных кривых, полученных с использованием потенциодинамического метода, при развертке потенциалов от 0 до 5 В. Исследуемые материалы – вольфрам и алюминий, электролит – 15% водный раствор хлорида натрия. Установлено, что излучение гелий-неонового лазера не влияет на характер электрохимического растворения материала, что позволяет использовать его для предварительной настройки системы при лазерно-электрохимической обработке материалов.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, гелий-неоновый лазер, вольфрам, алюминий.

Введение

Идея интенсификации электрохимической обработки наложением лазерного излучения на межэлектродный промежуток между анодом и катодом была выдвинута в 80-х годах 20 века авторами работ [1, 2]. Однако, несмотря на появления отдельных работ [3-6], указывающих на перспективность данного метода активации процесса анодного растворения материалов, большого распространения он не получил. Одной из причин этого является необходимость создания оборудования, учитывающего особенности как протекания электрохимических процессов, так и распространения лазерного излучения в жидкой среде электролита. С точки зрения лазерного излучения, это прежде всего необходимость контролируемого места попадания лазерного излучения в зону обработки, особенно для спектров излучения невидимых человеческому глазу.

Обычно в состав лазеров входит пилотный (гелий-неоновый) лазер с длиной волны 0,63 мкм, оптическая ось которого и используемого лазера совпадают. Однако, возможность использования гелий-неонового лазера в данном случае требует дополнительных исследований, так как остается открытым вопрос о возможном влиянии его на характер электрохимического растворения материала.

Методика экспериментального исследования

Для исследования влияния излучения гелий-неонового лазера на электрохимические процессы была использована экспериментальная установка (рис. 1), которая подробно

описана в работе [7], но вместо лазера с перенастраиваемой частотой использовался имеющийся в его конструкции *He-Ne* лазер с мощностью 1,4 мВт.

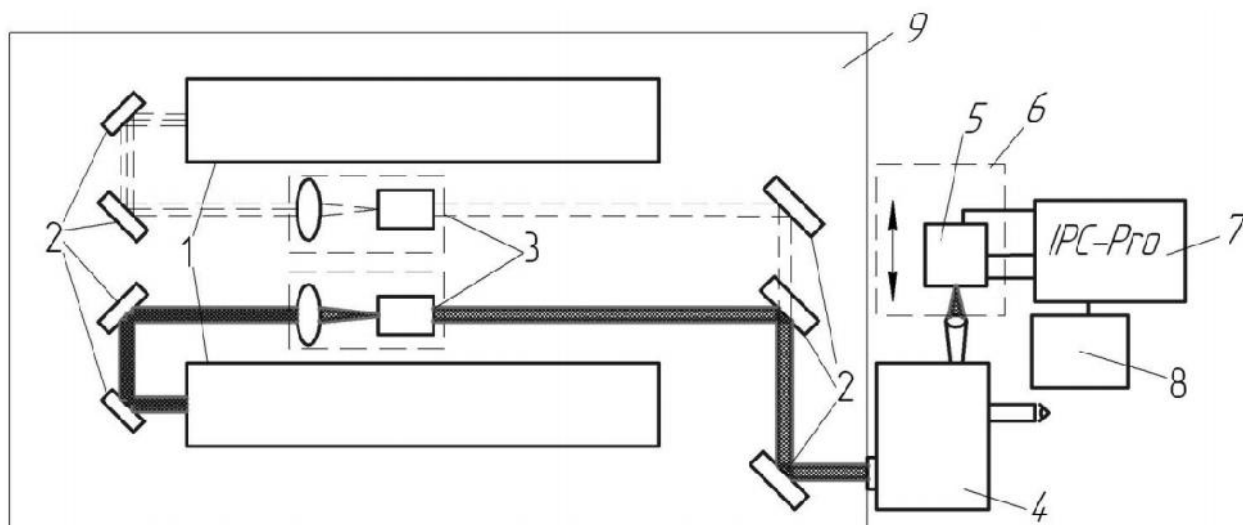


Рис. 1. Схема для реализации поляризационных исследований в условиях лазерной активации электрохимических процессов с использованием импульсного лазерного излучения с перенастраиваемой частотой:

- 1 – лазерный излучатель, 2 – поворотные зеркала, 3 – нелинейный преобразователь,
4 – система оптическая комбинированная (СОК), 5 – электрохимическая ячейка,
6 – предметный столик, 7 – потенциостат; 8 – персональный компьютер,
9 – оптическая скамья

В данной установке лазерное излучение через систему зеркал вводится в электрохимическую ячейку [8] и через СОК попадает на образец исследуемого материала. В качестве материалов образца были выбраны материалы, значительно различающиеся по своему химическому составу: вольфрам и алюминий. В качестве электролита был выбран 15% водный раствор хлорида натрия.

Исследования электрохимического растворения материала проводились при помощи поляризационных кривых с использованием потенциодинамического метода с применением потенциостата-гальваностата *IPC-Pro-M* с разверткой потенциала до 5 В со скоростью 100мВ/с.

Результаты и обсуждения

На рисунке 2 представлены результаты исследований для вольфрама. Анализ полученных поляризационных кривых позволяет говорить о том, что изменения в характере электрохимического растворения вольфрама в стационарных условиях (без наложения излучения) и при наложении лазерного излучения практически не происходит. Сдвиг областей активного и пассивного растворения незначителен.

Аналогичная ситуация и с электрохимическим растворением алюминия (рис. 3): наложение излучения гелий-неонового лазера не привело к изменению характера растворения материала.

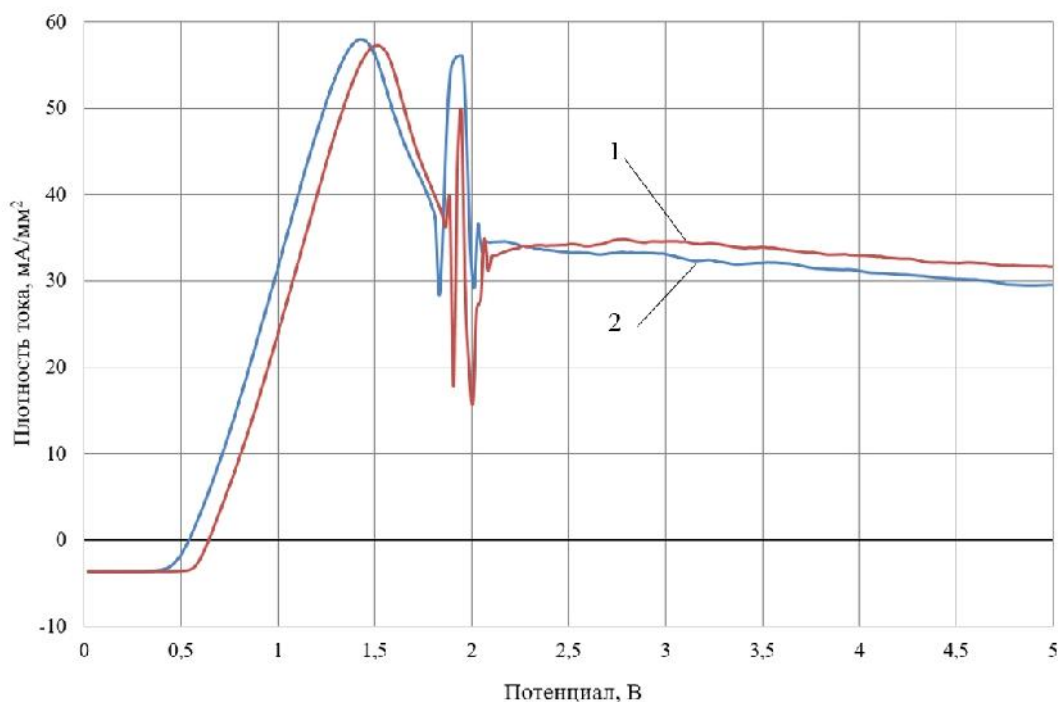


Рис. 2. Поляризационная кривая, полученная при помощи потенциодинамического метода, в 15% водном растворе хлорида натрия для вольфрама: 1 – без наложения лазерного излучения, 2 – при наложении излучения гелий-неонового лазера

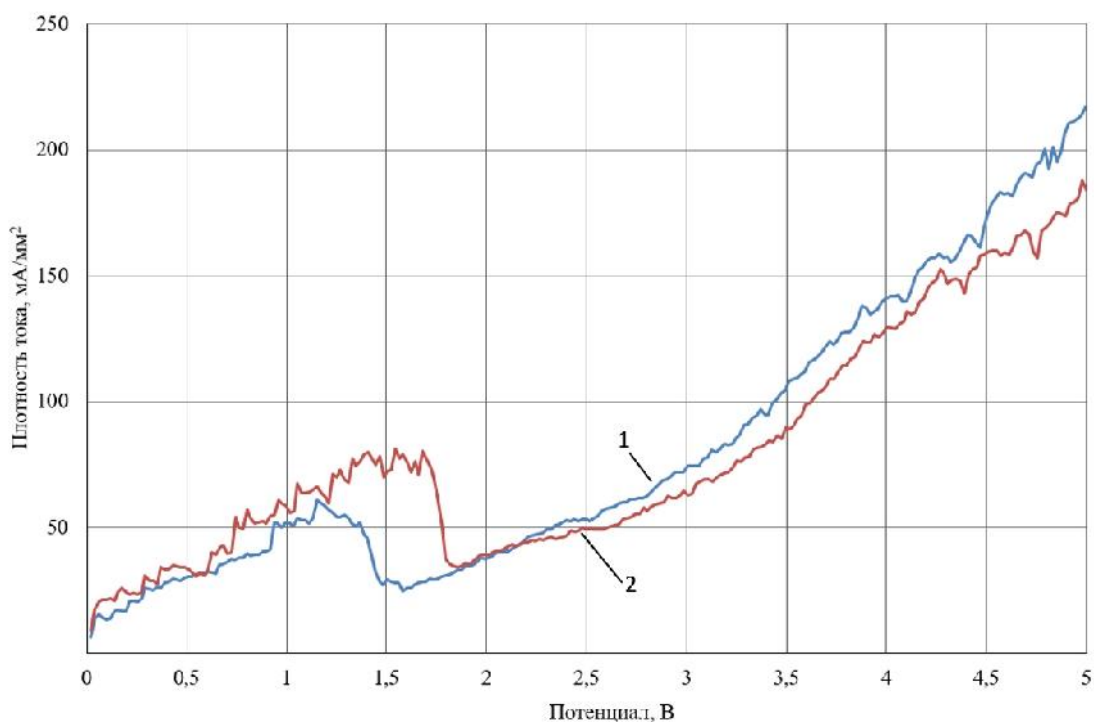


Рис. 3. Поляризационная кривая, полученная при помощи потенциодинамического метода, в 15% водном растворе хлорида натрия для алюминия: 1 – без наложения лазерного излучения, 2- при наложении излучения гелий-неонового лазера

Выводы

В ходе проведения экспериментов было установлено, что наложение излучения гелий-неонового лазера на образец не оказывает влияния на характер электрохимического растворения материала, и, следовательно, его возможно использовать для контроля местоположения лазерного луча в зоне обработки в процессе настройки системы при лазерно-электрохимической обработке.

Список литературы

1. Филимоненко В.Н., Самусев В.Г. Воздействие излучения ОКГ на анодное растворение металлов // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 1976. – № 4. – С. 9–12.
2. Самусев В.Г. Разработка и исследование метода интенсификации электрохимической обработки различных материалов с помощью оптических квантовых генераторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.03. – Новочеркасск: НПИ, 1979. – 20 с.
3. Гаар Н.П. Лазерно-электрохимическая обработка безвольфрамового твердого сплава КНТ16 в 10 %-ном водном растворе хлорида // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – № 5. – С. 14–19. – DOI: 10.30987/article_5ad8d29012ee0.34615800.
4. Rakhimyanov K.M., Gaar N.P., Loktionov A.A. Role of laser radiation in activating anodic dissolution under electrochemical machining of metals and alloys // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017). – Art. 01070 (4 p.). – DOI: 10.1051/mateconf/201712901070.
5. Gaar N., Zhuravlev A., Loktionov A. Increase of NaNO₃ electrolyte reaction capability by laser irradiation for electrochemical machining // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014. – P. 312–315.
6. Precision and efficiency of laser assisted jet electrochemical machining / P.T. Pajak, A.K.M. DeSilva, D.K. Harrison, J.A. McGeough // Precision Engineering. – 2006. – Vol. 30, iss. 3. – P. 288–298.
7. Рахимьянов Х.М., Журавлев А.И., Гаар Н.П. Установка для исследования электрохимических процессов в условиях лазерной активации процесса электрохимической размерной обработки // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2010. – № 2. – С. 135–144.
8. Гаар Н.П., Рахимьянов Х.М. Электрохимическая ячейка для исследования интенсификации ЭХРО лазерным излучением // Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса: тр. 1 Всерос. науч.-техн. конф., Кемерово, 24–25 окт. 2007 г. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2007. – С. 251–254.

RESEARCH OF THE EFFECT OF HELIUM-NEON LASER RADIATION ON THE ELECTROCHEMICAL DISSOLUTION OF MATERIALS

Dubin D.E., Graduate students, e-mail: dima.dubinin97@gmail.com

Gaar N.P., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: lianelas@mail.ru

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

Abstract

This paper presents the results of research on the effect of helium-neon laser radiation on the character of the electrochemical dissolution of the material. The research was carried out by comparing the polarization curves obtained using the potentiodynamic method when scanning potentials from 0 to 5 V. Research materials are tungsten and aluminum. The electrolyte is a 15% aqueous solution of sodium chloride. It is determined that the radiation of the helium-neon laser doesn't affect the nature of the electrochemical dissolution of the material, which allows it to be used for pre-setting the system for laser-electrochemical processing of materials.

Keywords

laser-electrochemical treatment, helium-neon laser, tungsten, aluminum.

УДК 372.862

**ОСНОВЫ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ БАКАЛАВРОВ
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

*В.В. СМИРНОВ, канд. техн. наук, доцент
А.Г. ОВЧАРЕНКО, доктор техн. наук, профессор
А.М. ФИРСОВ, канд. техн. наук, доцент
А.Н. РОМАШЕВ, канд. техн. наук, доцент
(БТИ АлтГТУ, г. Бийск)*

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

В статье обсуждается минимальный уровень знаний для осознанного использования метода конечных элементов при решении практических задач бакалавром машиностроения. Каковы должны быть представления о физическом смысле задачи? Какие основные математические идеи лежат в основе метода? По мнению авторов, ответы на эти два вопроса позволяют преподавателю сформулировать требования к учебным материалам и контрольно-оценочным средствам текущей и промежуточной аттестации.

Ключевые слова: метод конечных элементов, бакалавр машиностроения.

Введение

Метод конечных элементов (МКЭ) прочно вошёл в состав инструментария инженера-проектировщика и требует включения в учебные планы бакалавров машиностроения [1]. Он может изучать более подробно как отдельная дисциплина или входить разделом в структуру какой-либо дисциплины, связанной с автоматизацией инженерных расчётов и проектирования [2-3]. Злободневной при этом остаётся учебная литература прошлого века [4-8], в которой авторы рассматривают основы, математические и алгоритмические подробности метода. Более современные учебные пособия несут большую практическую пользу [9-15], т.к. в них часто рассматриваются применение актуальных профессиональных программных средств.

Анализ учебной деятельности студентов позволяет выделить несколько уровней усвоения основ МКЭ. На первом уровне проектировщик может использовать МКЭ как чёрный ящик, освоив стандартную последовательность выполнения действий по инженерному анализу конструкций. Например, для расчёта напряжённо-деформированного состояния конструкции в статике проектировщик загружает в САЕ-систему электронную модель изделия, выбирает материал изделия, указывает точки, ребра, поверхности изделия, перемещения которых ограничены, а также указывает действующие на конструкцию нагрузки: сосредоточенные силы и моменты, распределённые силы. В этом случае для получения решения задачи может быть достаточно знаний, полученных из курса теоретической механики и сопротивления материалов. На выходе проектировщик имеет картину распределения искомой физической величины (например, механического напряжения) и её численные значения в любой интересующей его точке расчётной области. Таким образом, можно получить решение многих практических задач. Однако уже здесь необходимо понимать, что исходными данными в задаче, кроме свойств материала,

выступают так называемые граничные условия, т.е. силы, перемещения, температуры, тепловые потоки и пр., характеризующие внешнее воздействие на границу рассматриваемой области. При попытке анализа динамической задачи уже важно иметь понятие о начальных (временных) условиях, а также уметь задавать закон изменения последних по отношению ко времени. Вместе начальные и граничные условия иногда называют краевыми условиями решаемой задачи, и вместе с исходным дифференциальным уравнением в частных производных они входят в её постановку. Таким образом, с формальной точки зрения к методу конечных элементов можно относиться как методу решения систем дифференциальных уравнений в частных производных. Так складывается первоначальная схема применения метода (рис. 1).



Рис. 1. МКЭ как «чёрный ящик»

Развитие математических представлений о МКЭ

Развитие математических представлений о МКЭ способствует пониманию принципа решения задачи и позволяет избежать некоторых ошибок, которые могут быть связаны с организацией компьютерных расчётов.

Первое, что должен различать студент – это понятия непрерывной и дискретной функции. Искомая физическая величина в проектной задаче (температура, напряжение и пр.) математически описывается непрерывной функцией, поиск которой связан с решением дифференциальных уравнений с частными производными. Метод конечных элементов основан на идее замены такой *непрерывной* функции *дискретной* моделью, которая строится на множестве *кусочно-непрерывных* функций. При этом пространственное представление исследуемого объекта осуществляется с помощью набора *конечных элементов*. Роль конечных элементов, выполняют области простой (*канонической*) геометрии, например, отрезки, многоугольники, многогранники. На каждом из конечных элементов неизвестная функция $F(x,y,z)$ аппроксимируется, так называемой, пробной функцией $f(x,y,z)$. Причем эти пробные функции должны удовлетворять граничным условиям непрерывности, совпадающим с граничными условиями, налагаемыми решаемой краевой задачей [1]. Выбор для каждого элемента аппроксимирующей функции определяет соответствующий тип элемента.

Рассмотрим, например, наиболее простой из трехмерных элементов – симплекс-элемент, который представляет собой тетраэдр и показан на рис. 2. Четыре узла этого элемента обозначены индексами i, j, k, l . Пробная функция для такого элемента представляет собой интерполяционный полином и имеет вид:

$$\varphi = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z \quad (1)$$

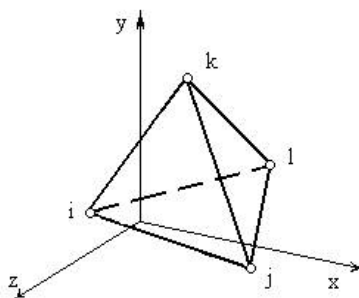


Рис. 2. Трехмерный конечный симплекс-элемент

Имея координаты (x, y, z) каждого из узлов этого элемента и значение искомой функции в этих узлах несложно вычислить коэффициенты полинома.

К примеру, если известно, что $i(1,2,1)$, $j(0,0,0)$, $k(2,0,0)$, $l(1,0,3)$, а значения функции $F(x,y,z)$ в узлах $F_i=40$, $F_j=34$, $F_k=26$, $F_l=15$. Тогда искомый интерполяционный полином примет вид: $f = 34 - 4x + 7.5y - 5z$. И появляется возможность вычислить значение функции в любой внутренней точке тетраэдра, например, $f(1, 0.5, 1)=28,75$.

Очевидно, что точность решения задачи для всей области определения анализируемой конструкции будет зависеть от того, насколько большое количество элементов мы используем. Однако при этом машине нужно будет обрабатывать соответствующее количество (ансамбль) пробных функций, что чревато запросом больших вычислительных ресурсов. Студенту также необходимо усвоить, что во многих случаях сетка конечных элементов строится неравномерно. Алгоритмы используемых программ могут сгущать сетку в местах резкого изменения геометрии, острых кромок и других конструктивных элементов, которые в теории могут выступать концентраторами напряжений. Поэтому, если такие элементы формы не играют существенной роли при анализе конструкций (например, технологические канавки, центровые отверстия и т.п.), то лучше перестроить исходную геометрическую модель, исключив их из расчёта. Но, не стоит исключать из расчёта такие элементы конструкции, которые находятся в зонах высоких градиентов, т.е. там, где наблюдаются локально высокие значения искомой и резкие перепады значений.

Применение элементов высокого порядка, как правило, приводит к достижению заданной степени точности решения при анализе меньшего количества пробных функций. Однако оно не всегда ведет к сокращению расходов вычислительных ресурсов; т.к. для получения и обработки таких пробных функций может потребоваться выполнение большего числа арифметических операций.

Вместе с тем, обучающемуся полезно уяснить, что выбор типа конечного элемента в основном связан с выбором интерполяционного полинома и практически не связан с физическим смыслом решаемой задачи, хотя в отдельных случаях специалисты могут давать некоторые вполне обоснованные рекомендации.

Из предыдущего обсуждения у студента может возникнуть резонный вопрос: если путём аппроксимации уже можно получить приближённое решение исходной задачи, то где здесь используются базовые соотношения, характеризующие её физический смысл? Однако всё описанное, включая подготовку геометрических и физических данных, а также построение конечно-элементной сетки, обычно относят к этапу препроцессирования. Наиболее ресурсоёмкие вычисления всё ещё впереди. Дело в том, что полученную аппроксимацию на следующем этапе МКЭ необходимо оптимизировать на основе применения вариационных принципов. Суть этих принципов можно сформулировать так: из всех возможных вариантов поведения система выбирает оптимальный, в частности такой вариант может соответствовать, например, минимуму затраченной системой энергии.

Например, для стационарных режимов теплопередачи закон сохранения энергии выражает математическая модель в виде дифференциального уравнения теплопроводности, записанного совместно с граничными условиями первого-третьего рода. В вариационном исчислении (для двумерного случая) решение такой задачи эквивалентно отысканию минимума функционала [5]:

$$\chi = \frac{1}{2} \int_V \left(K_x \left(\frac{\partial T(x,y)}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial T(x,y)}{\partial y} \right)^2 - 2QT(x,y) \right) dV + \int_S \left(q \cdot T(x,y) + \frac{h(T(x,y) - T_c)^2}{2} \right) dS, \quad (2)$$

где $T(x,y)$ – функция, определяющая поле температур в двумерной области, К;

Q – внутренний тепловой источник или сток, Вт;

K_x и K_y – коэффициенты теплопроводности в направлении осей координат, Вт/(мК);

q – тепловой поток заданной интенсивности, Вт/м²;

h – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²К);

T_c – температура окружающей среды, К;

V – объем тела, м³;

S – площадь поверхности, м²;

x и y – текущие координаты.

Рассматриваемый случай является линейной задачей, т.к. коэффициенты, характеризующие материал, принимаются не зависящими от функции температуры. При программной реализации МКЭ необходимо рассматривать функционал для каждого отдельно взятого конечного элемента, заменяя при этом в выражении (2) искомую функцию интерполяционным полиномом типа (1). Непрерывность функции во всей области обеспечивается равенством пробных интерполирующих функций на границе между элементами. После указанной модификации внутри цикла по элементам вычисляются функционалы для каждого конечного элемента. Затем находится суммарный функционал

$\chi_\Sigma = \sum_{e=1}^N \chi_e$, который минимизируется. То есть, вычисляются такие изначально неизвестные значения искомой функции в узлах конечно-элементной сетки, которые доставляют суммарному функционалу минимум. Математические преобразования в программе приводят в итоге к формированию системы линейных алгебраических уравнений вида

$$[A][F] = [B]. \quad (3)$$

Используемые краевые условия должны обеспечить равенство числа уравнений в системе (3) и числа неизвестных. Многие профессиональные программы предлагают пользователю варианты выбора численного метода решения системы (3), т.к. в зависимости от получающейся структуры матрицы коэффициентов, более эффективен с точки зрения скорости решения, может быть тот или иной метод.

Выводы

1. Применение метода конечных элементов требует от будущего инженера некоторых базовых знаний его теоретических основ. В качестве знаний пререквизитов, в частности выступают знание взаимосвязи между силовыми характеристиками, перемещения и деформации в механической системе, знание видов теплообмена системы с окружающей средой в отсутствие теплоизоляции для тепловой задачи и др.

2. Математическую основу метода составляют две основных идеи. Первая идея состоит в том, что зная некоторые значения искомых величин (или связанных с ними) на границах расчётной области можно получить аппроксимацию – предварительное пробное решение задачи. Эта аппроксимация осуществляется путём разбиения исходной геометрической области на участки простой формы – конечные элементы, внутри которых искомая функция определена приближённо (посредством интерполяции). Вторая математическая идея метода состоит в том, что полученное пробное решение можно оптимизировать на основе использования физического смысла задачи. Т.е. существует некоторая величина (функционал), связанная с теоретической постановкой задачи. И нужно найти такие значения искомой функции в узловых точках, которые доставят этой величине экстремум. Это и будет решением исходной физической задачи.

Список литературы

1. Формирование образовательной программы бакалавриата в области машиностроения / В.В. Смирнов, А.Г. Овчаренко, А.М. Фирсов, А.Н. Ромашев // Гарантии качества профессионального образования: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2018. – С. 83–86.
2. *Малинина Н.А.* Метод конечных элементов для расчета машиностроительных конструкций. – Орёл: Изд-во ОГАУ, 2017. – 198 с.
3. *Смирнов В.В.* Математическое моделирование. – Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2017. – 177 с.
4. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 542 с.
5. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
6. *Норри Д., де Фриз Ж.* Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981. – 266с.
7. *Мяченков В.И.* Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с.
8. *Stasa F.L.* Applied Finite Element Analysis for Engineers. – CBS Publishing Japan Ltd., 1986. – 658 p.
9. *Koutromanos I., McClure J., Roy Ch.* Fundamentals of Finite Element Analysis Linear Finite Element Analysis. – NYC: John Wiley and Sons Ltd., 2018. – 710 p.
10. *Seshu P.* Textbook of finite element analysis. – New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2012. – 330 p.
11. *Chandrupatla T.R., Belegundu A.D.* Introduction to Finite Elements in Engineering. – New Jersey: Rowan University Glassboro, 2002. – 455 p.
12. Finite Element Analysis in Practice: Instructor Manual. – San Rafael: Autodesk Inc., 2011. – 264 p.
13. *Khennane A.* Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus. – London: Taylor and Francis Group, 2013. – 454 p.
14. *Bhavikatti S.S.* Finite Element Anaysis. – New Delhi: New Age International Publishers, 2005. – 334 p.
15. *Земцова О.Г., Шейн А.И., Волкова О.В.* Метод конечных элементов в современных иностранных книгах [Электронный ресурс] // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 3, ч. 1. – URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/03/48866> (дата обращения: 03.02.2020).

BASICS OF THE FINITE ELEMENT METHOD FOR BACHELORS OF MECHANICAL ENGINEERING

Smirnov V.V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: smirnov.vv@bti.secna.ru

Ovcharenko A.G., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: shura@bti.secna.ru

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

Romashev A.N., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: alniro@yandex.ru

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

Abstract

The article discusses the minimum level of knowledge for the conscious use of the finite element method (FEM) in solving practical problems by a bachelor of mechanical engineering. Despite the abundance of scientific and technical literature, it is difficult for non-mathematical specialists to understand the method. The use of FEM as a black box is acceptable in some cases, but does not always contribute to an effective solution of the applied problem. What should be the idea of the physical meaning of the problem? What are the main mathematical ideas behind the method? According to the authors, the answers to these two key questions allow the teacher to formulate requirements for educational materials for bachelors and control and evaluation tools for current and intermediate certification.

Keywords

finite element method, bachelor of mechanical engineering.

УДК 621.9(045)

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БАЗОВЫХ ОТВЕРСТИЙ
ТОНКОСТЕННЫХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

*А. М. ФИРСОВ, канд. техн. наук, доцент
А.Г. ОВЧАРЕНКО, доктор техн. наук, профессор
В.В. СМИРНОВ, канд. техн. наук, доцент
А.Н. РОМАШЕВ, канд. техн. наук, доцент
(БТИ АлтГТУ, г. Бийск)*

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

В статье проведен анализ причин формирования отклонений размеров и формы отверстий корпусных деталей с тонкими стенками переменной толщины. Выявлены основные факторы, влияющие на эти отклонения. Предложен подход по определению величины отклонений размеров и формы отверстий с учетом упругих и тепловых деформаций элементов технологической системы. Получены зависимости, которые могут быть использованы в качестве составной части информационной поддержки САПР ТП механической обработки корпусных деталей с тонкими стенками переменной толщины.

Ключевые слова: тонкостенная корпусная деталь, базовое отверстие, точность, отклонение размеров и формы, упругие деформации, тепловые деформации, САПР ТП, информационная поддержка.

Введение

Выпуск конкурентоспособной продукции одна из задач современного машиностроения, которое характеризуется широкой номенклатурой выпускаемых изделий. Известно, что более 80% машиностроительной продукции выпускается в условиях серийного производства. Конкурентоспособность обеспечивается высоким качеством и своевременным выпуском продукции на рынок. Качество машиностроительной продукции оценивается на этапе эксплуатационного периода жизненного цикла изделия и определяется качеством деталей и узлов, входящих в изделие [1–4].

Одними из таких деталей являются корпуса, в базовых отверстиях которых монтируются в определенной взаимосвязи детали и узлы, то есть отверстия выполняют функцию опорных или направляющих поверхностей и подвергаются силовому, температурному, фрикционному воздействию и, во многом, определяют долговечность работы корпуса. Поэтому при изготовлении корпусных деталей необходимо обеспечивать повышенные требования к качеству этих отверстий по точности размеров, отклонению формы, волнистости, шероховатости и износостойкости поверхности [5, 6].

Так как заготовки для корпусных деталей это, в основном, отливки, то структура их материала неоднородна как в партии, так и у одной заготовки. Это особенно проявляется у заготовок корпусов с тонкими стенками и переменной толщиной стенок. К таким корпусным деталям относится большая группа корпусов цилиндров двигателей, компрессоров, пневмо- и гидроаппаратуры и др. Такие детали, для облегчения массы изделий, изготавливаются из легких сплавов – алюминиевых, магниевых. Колебание механических свойств материала

заготовки таких деталей может достигать более 40%. Отсутствие зависимостей, учитывающих изменение механических свойств заготовки у тонкостенных корпусных деталей с переменной толщиной стенок, приводит к нестабильности выходных параметров технологического процесса (ТП) в виде, например, невыполнения точности размеров и отклонение формы. Это особенно проявляется при обработке базовых отверстий, к которым предъявляются повышенные требования [1–6].

Нестабильность ТП обработки отверстий корпусных деталей может быть устранена путем расширения информационной поддержки технологической подготовки проектирования ТП изготовления базовых отверстия в виде зависимостей, моделей, позволяющих спрогнозировать условия обработки, обеспечивающих стабильное качество и определить пути управления ТП для обеспечения его стабильности по ходу выполнения. Однако, в настоящее время таких моделей проектирования ТП с учетом, приведенных выше, особенностей конструкции отверстий практически не существует.

Таким образом, исследования, направленные на установление закономерностей, обеспечивающих стабильное достижение требуемых параметров точности отверстий в тонкостенных корпусных деталях с переменной толщиной стенок, путем управления параметрами ТП, является актуальной научно-технической задачей.

Теория

Предварительными исследованиями было установлено, что работоспособность отверстий корпуса зависит от точности диаметральных размеров, отклонений формы, волнистости и шероховатости поверхности отверстий. Эти параметры определяют несущую способность опорных и износостойкость направляющих поверхностей. Однако при обработке отверстий в тонкостенных корпусах с переменной толщиной стенок наблюдается рассеяние диаметральных размеров, отклонение формы отверстия, шероховатости больше допустимого на 20-30%, т.е. наблюдается не стабильность ТП [7–9].

На основе метода экспертных оценок FMEA (Potential Failure Mode and Effects Analysis – Анализ видов и последствий потенциальных отказов) было определено, что причиной появления отклонений при выполнении ТП обработки отверстия в тонкостенных корпусных деталях с переменной толщиной стенок является неоднородная структура материала заготовки, которая образуется в результате охлаждения заготовки с переменной толщиной стенок. Экспериментальные исследования твердости поверхности отверстий показали, что твердость поверхности необработанной заготовки колеблется в пределах 20%, а после обработки с припуском 1,5...2 мм колебание твердости поверхности уже достигает 40%. Это объясняется тем, что поверхность заготовки имеет одинаковую мелкозернистую структуру толщиной 0,5...1 мм, после удаления которой, нижние слои имеют разную структуру в зависимости от толщины стенок, что приводит к большему колебанию твердости [8–11].

Проведем анализ ожидаемых погрешностей с применением расчетно-аналитического метода. Как известно поле рассеяние диаметральных размеров и отклонение формы зависит от следующих основных факторов [1–4]:

$$\Delta = f(\varepsilon, \Delta_y, \Delta_H, \Delta_T, \Sigma\Delta_\phi), \quad (1)$$

где ε – рассеяние, связанное с установкой заготовки на станке или в приспособление; Δ_y, Δ_T – рассеяние, вызванное упругими и температурными деформациями технологической системы; Δ_H – рассеяние, возникающее в результате размерного износа режущего инструмента; Δ_T – рассеяние, связанное настройкой режущего инструмента; $\Sigma\Delta_\phi$ – рассеяние, связанное с геометрическими отклонениями оборудования.

Так как в условиях многономенклатурного производства в современных условиях применяется оборудование с ЧПУ, точность перемещения которых по координатам составляет 1 мкм, имеющее автоматическую привязку инструмента, то ΔL_H , ΔL_N , $\Sigma \Delta \phi$ можно из возмущающих факторов, влияющих на точность размеров и отклонение формы, исключить.

Тогда отклонения размеров и формы отверстия будут формироваться под воздействием погрешностей, связанных с установкой, с упругими и тепловыми деформациями. Погрешность установки может привести к увеличению колебания припуска и увеличить упругие деформации элементов технологической системы (ТС).

Переменная твердость и переменный припуск приводят к изменению сил резания и разным упругим деформациям элементов ТС. В результате этого возникает рассеяние размеров и отклонение формы отверстия. Как известно, величина упругих деформаций y зависит от жесткости ТС j и силы резания P_y , действующей на эту систему [1–4]:

$$y = P_y / j. \quad (2)$$

Общая деформация ТС определяется деформациями отдельных элементов: станка (y_c); заготовки ($y_{заг}$); инструмента ($y_{ин}$); приспособления ($y_{пр}$) и обычно представляется в виде:

$$y = y_c + y_{заг} + y_{ин} + y_{пр}. \quad (3)$$

Если принять, что при обработке наиболее слабыми звеньями ТС являются инструмент и заготовка, и их деформации будут влиять на точность отверстия, то изменение упругих деформаций ТС под действием переменных значений припуска и твердости можно записать в виде:

$$\Delta y = \Delta y_{ин} + \Delta y_{заг}. \quad (4)$$

Расчетная схема для определения величины упругих деформаций при растачивании отверстия представлена на рис. 1. Расточной резец рассматривается как консольная балка (рис. 1-в), закрепленная жестко с одной стороны. Величина изменения упругой деформации инструмента $\Delta y_{ин}$ под действием переменной силы P_y может быть определена по формуле сопротивления материалов [11, 12]:

$$\Delta y_{ин} = \frac{\Delta P_y l_{ин}^3 \mu}{3 E_{ин} I_{ин}}, \quad (5)$$

где ΔP_y - изменение силы резания под действием переменных припуска и твердости; $l_{ин}$ – длина вылета расточного инструмента, μ - коэффициент динамичности, учитывает отличие динамических (при обработке) упругих деформаций от статических ($\mu = 1,2 \dots 1,5$); $E_{ин}$ - модуль упругости материала державки расточного инструмента; $I_{ин}$ - осевой момент инерции поперечного сечения державки инструмента (для державки круглого сечения $I_{ин} \approx 0,05 d^4$).

Деформация заготовки будет зависеть от способа её закрепления, от места приложения силы резания и от осевого момента инерции поперечного сечения. Например, для заготовки корпуса закрепление может быть реализовано по схеме рисунок 1б. Заготовка представлена в виде трубы, закрепленной консольно. В этом случае упругая деформация заготовки Δy_3 будет зависеть от места приложения силы резания P_y и может быть определена по формуле [12, 13]:

$$\Delta y_{заг} = \frac{\Delta P_y l_3^3 \mu}{3 E_3 I_{3зг}} \left(\frac{z^3}{3} - l_{3зг} z^2 \right), \quad (6)$$

где $l_{заг}$, $E_{заг}$, $I_{заг}$ – соответственно длина, модуль упругости материала, осевой момент инерции поперечного сечения заготовки; Z - координата приложения силы резания от места заделки.

Осевой момент инерции поперечного сечения заготовки $I_{заг}$ корпусной детали, из-за сложной формы, можно определить, исходя из принципа суперпозиции, как сумму моментов инерции простых геометрических фигур. В данном случае для заготовки в виде цилиндра, момент инерции $I_{заг}$ принят для поперечного сечения в виде кольца с диаметрами d и d_1 (рис. 1-б), который равен:

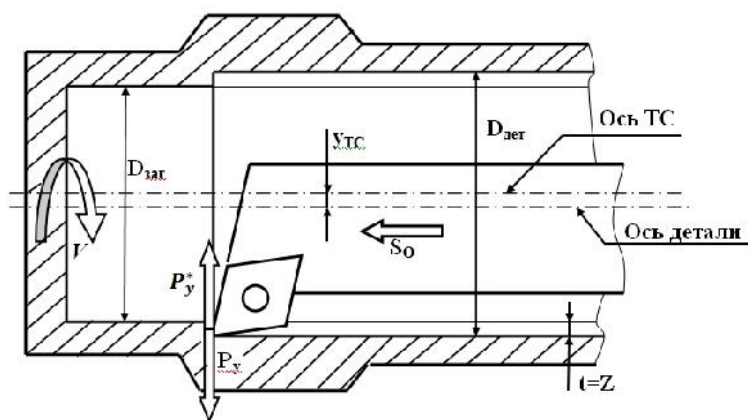
$$I_{заг} \approx 0,05d^4(1 - c^4), \tag{7}$$

где $c = d_1/d$.

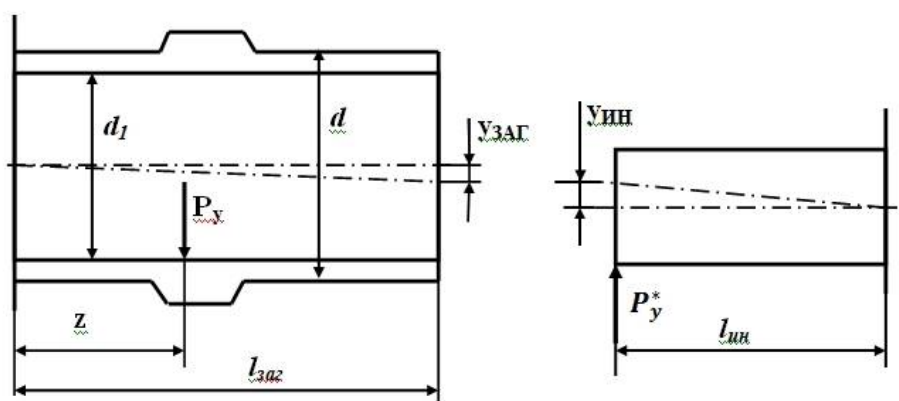
Силу резания P_y можно определить по известной эмпирической формуле [13, 14]:

$$P_y = 10 C_p t^x S^y V^m K_p, \tag{8}$$

где C_p -коэффициент учитывает условия обработки; t, S, V - соответственно глубина, подача и скорость резания; K_p - коэффициент учитывает изменения конкретных условий обработки, от используемых для определения данной формулы.



а)



б)

в)

Рис. 1. Схема для определения величины упругих деформаций при растачивании отверстия в заготовке: а – схема обработки; б – схема деформации заготовки; в – схема деформации инструмента.

Глубина резания t меняется, в зависимости от колебания припуска ΔZ , от t_{min} до t_{max} и тогда $t_{max} = t_{min} + \Delta Z$. Изменение силы резания от колебания припуска ΔP_{yZ} , при $x = 1$, в этом случае можно представить в виде

$$\Delta P_{yZ} = 10C_p \Delta Z^x S^y V^m K_p. \tag{9}$$

Переменную твердость можно выразить через коэффициент K_p , обозначив колебание твердости как ΔK_{HB} . Тогда изменение силы резания от колебания твердости ΔP_{yHB} выражается аналогичной зависимостью:

$$\Delta P_{yHB} = 10C_p t^x S^y V^m \Delta K_{HB}. \tag{10}$$

Изменение силы резания, приводят к возникновению переменных упругих деформаций инструмента $\Delta y_{инЗ}$, $\Delta y_{инНВ}$ и заготовки $\Delta y_{заЗ}$, $\Delta y_{заНВ}$, и эти деформации являются случайными. Тогда суммарное отклонение точности отверстия под воздействием переменного припуска и переменной твердости можно выразить следующим образом:

$$\Delta y = \sqrt{\Delta y_{инЗ}^2 + \Delta y_{инНВ}^2 + \Delta y_{заЗ}^2 + \Delta y_{заНВ}^2}. \tag{11}$$

Известно, что тепловые деформации тонкостенных заготовок с относительно большими обрабатываемыми поверхностями могут достигать величин, сопоставимых с допусками 7 качества, особенно при обработке внутренних поверхностей, когда поглощение тепла заготовкой увеличивается. Величина тепловой деформации ΔT может быть определена по известной формуле [1-3, 15]:

$$\Delta T = \alpha L \Delta t, \tag{12}$$

где α – температурный коэффициент линейного расширения; L – размер нагреваемого тела; Δt – отклонение температуры нагрева тела. Однако при расширении частицы тела препятствуют взаимным изменениям объема, вследствие этого возникают напряжения, которые обуславливают добавочные удлинения и сдвиги. Полная тепловая деформация ΔT_{Σ} складывается из деформации, связанной с изменением размера ΔT_L в результате изменения температуры и деформации, вызванных температурными напряжениями ΔT_{σ} . При нестационарном температурном поле и перемещающемся источнике тепла определение температурной деформации усложняется и может решено численными методами с применением компьютерного моделирования. Некоторые результаты численного моделирования температурных деформаций приведены на рис. 2.

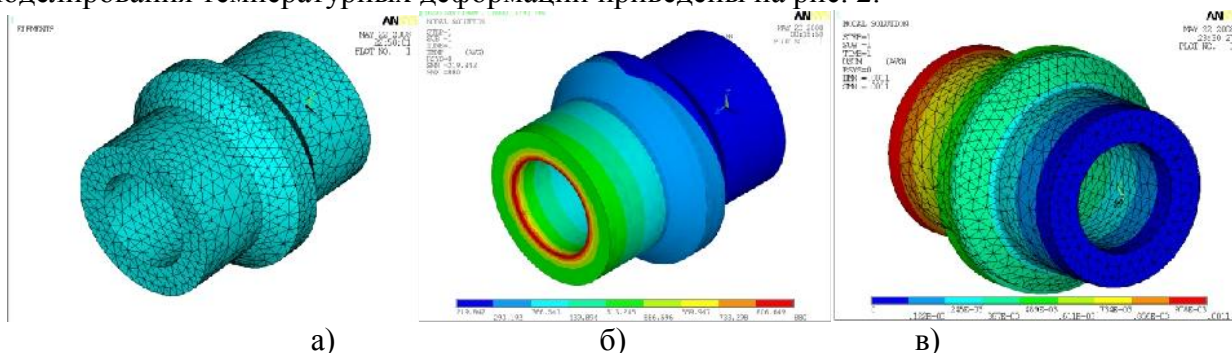


Рис.2. Результаты численного моделирования температурных деформаций заготовки:

- а – разбиение тела на конечные элементы;
- б – температурные поля при кольцевом источнике тепла;
- в – температурные деформации заготовки после обработки

Тогда суммарную погрешность Δ_{Σ} обработки отверстия тонкостенного корпуса на станке с ЧПУ с учетом переменного припуска, твердости и температурных деформаций и можно представить в виде:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_y^2 + 3\Delta T^2} \leq \Delta_{\text{доп}}. \quad (13)$$

Эта погрешность не должна превышать допустимых отклонений отверстия по точности $\Delta_{\text{доп}}$, которое может быть выражено точностью размеров или отклонением формы.

Если рассмотреть Δ_{Σ} как погрешность, которая возникает на каждом переходе, то уточнения на первом переходе можно представить в виде [1]:

$$K_{y1} = \Delta_{\Sigma 0} / \Delta_{\Sigma 1}, \quad (14)$$

где $\Delta_{\Sigma 0}$ – отклонение размера и формы заготовки.

Тогда для n переходов, как произведение уточнений на каждом переходе

$$K_{yn} = \prod (\Delta_{\Sigma n-1} / \Delta_{\Sigma n}). \quad (15)$$

Учитывая, что уточнение должно быть больше 1 и редко бывает больше 3, то основываясь на принципе максимальной производительности, можно определить минимальное количество переходов, необходимых для обработки поверхности с обеспечением требуемой точности размеров или отклонением формы.

Результаты и обсуждение

Приведенные зависимости позволяют на этапе технологической подготовки провести анализ возможных отклонений размеров и формы отверстий корпусных деталей и предпринять меры по их устранению, путем изменения параметров технологического процесса, например, изменением режимов обработки, количества переходов и т.п. Эти зависимости могут быть составной частью информационной поддержки технологической подготовки механической обработки корпусных деталей с тонкими стенками переменной толщины.

Однако, следует отметить, что при анализе причин формирования отклонений размеров и формы отверстий при обработке учтены не все факторы, а только те (по мнению авторов), которые оказывают наибольшее влияние.

Выводы

Проведен анализ причин формирования отклонений размеров и формы отверстий корпусных деталей с тонкими и переменной толщины стенками. Выявлены основные факторы, влияющие на эти отклонения. Предложен подход по определению величины отклонений размеров и формы отверстий с учетом упругих и тепловых деформаций элементов технологической системы во время обработки. Получены зависимости, которые могут быть использованы в качестве составной части информационной поддержки технологической подготовки механической обработки корпусных деталей с тонкими стенками переменной толщины.

Список литературы

1. Маталин А.А. Технология машиностроения. – СПб.: Лань, 2016. – 512 с.
2. Ковшов А.Н. Технология машиностроения. – СПб.: Лань, 2016. – 320 с.
3. Безъязычный В.Ф. Основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2016. – 568 с.

4. Научные основы технологии машиностроения / А.С. Мельников, М.А. Тмаркин, Э.Э. Тищенко, А.И. Азарова; под общ. ред. А.С. Мельникова. – СПб.: Лань, 2018. – 420 с.
5. *Степанян А.Г.* Изготовление малогабаритных корпусных деталей. – М.: Машиностроение, 1973. – 168 с.
6. Технология машиностроения / А.А. Гусев, Е.Р. Ковальчук, И.М. Колесов и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.
7. *Фирсов А.М., Вдовин А.В., Тимахович И.В.* Проектирование технологического процесса обработки резанием на основе учета отказов технологической системы // Механики XXI века. – 2013. – № 12. – С. 155–159.
8. *Татаркин Е.Ю., Фирсов А.М., Калистру В.А.* Обеспечение точности базовых отверстий корпусных деталей при групповой обработке путем прогнозирования параметрических отказов // Научно-технические проблемы в машиностроении. – 2015. – № 5. – С. 15–29.
9. *Фирсов А.М., Овчаренко А.Г.* Совершенствование технологической подготовки механической обработки с использованием метода «отказов» // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 16–21.
10. Влияние переменной толщины стенок на точность обработки базовых отверстий корпусных деталей / И.В. Трапеев, А.М. Фирсов, В.А. Калистру, В.М. Дробышев // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы 4 междунар. науч.-техн. конф., Барнаул, 23–26 сент. 2014 г. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – Ч. 2. – С. 197–200.
11. Анализ видов и последствий потенциальных отказов. FMEA: справочное руководство. – Н. Новгород: АО «НИИ КД», СМЦ «Приоритет», 1997. – 67 с.
12. *Горшков А.Г., Трошин В.Н., Шалашилин В.И.* Сопротивление материалов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с.
13. *Анурьев В.И.* Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. Т. 1 / под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.
14. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
15. *Резников А.Н., Резников Л.А.* Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

ENSURING THE ACCURACY OF MANUFACTURING THE BASE HOLES OF THIN-WALLED BODY PARTS

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

Ovcharenko A.G., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: tmk@bti.secna.ru

Smirnov V.V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: tmk@bti.secna.ru

Romashev A.N., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: tmk@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 analyzes the reasons for the formation of deviations in the size and shape of holes of body parts with thin walls of variable thickness. The main factors affecting these deviations are identified. An approach is proposed to determine the size and shape of hole deviations, taking into account the elastic and thermal deformations of the elements of the technological system. Dependencies are obtained that can be used as an integral part of information support for CAPP for mechanical processing of body parts with thin walls of variable thickness.

Keywords

thin-walled body part, base hole, accuracy, size and shape deviation, elastic deformations, thermal deformations, CAPP, information support.

УДК 621.914.1

**ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ СТАНКА С ЧПУ DMG MORI МОДЕЛИ MORI SEIKI
NMV 5000 DCG ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

*А.Н. КОРОТКОВ¹, доктор техн. наук, профессор
С.О. ЧЕРКАШИН¹, бакалавр
Е.В. ЕСКИН^{1, 2}, магистрант
А.А. КУЗНЕЦОВ^{1, 2}, магистрант
(¹КузГТУ, г. Кемерово,
²АО “КМЗ”, г. Кемерово)*

А.Н. Коротков – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачёва
e-mail: msikuzstu@mail.ru, korotkov.a.n@mail.ru

Станки с ЧПУ фирмы DMG MORI показывают высокую эффективность при изготовлении сложных корпусных деталей. Для оценки на практике их эксплуатационных возможностей команда разработчиков из КузГТУ и завода АО “КМЗ” подготовила проект “Модель проходческого комбайна для добычи угля в шахтах Кузбасса”. В ходе подготовки проекта разработаны чертежи отдельных деталей и сборочной единицы, 3D-модели деталей, файлы управляющих программ для станка DMG MORI, видео- и фотоработы над проектом, технологический маршрут сборки изделия и карта наладки инструментов. Готовый проект (в металле и с сопроводительной документацией) оценивался компетентной комиссией на Всероссийском конкурсе “CNC MASTERS 2019”. Результат оценки – Диплом за IV место среди всех регионов Российской Федерации.

Ключевые слова: станки с ЧПУ, фирма DMG MORI, файлы управляющих программ, технологический маршрут, 3D-модели, карта наладки инструментов.

Введение

Для оценки эксплуатационных возможностей станка с ЧПУ модели MORI SEIKI NMV 5000 DCG с системой ЧПУ Fanuc 3li A5 [1] на филиале кафедры “Металлорежущие станки и инструменты” [2], находящемся на АО “Кемеровский механический завод” (КМЗ) [3], была реализована возможность изготовления сложной корпусной детали в виде модели проходческого комбайна для добычи угля в шахтах Кузбасса (в масштабе 1:20) [4].

Материал изготавливаемой модели комбайна – сталь 40X. Обработка велась фрезами [5]: 1) фреза цилиндрическая со сменными твердосплавными пластинками диаметром 12 мм; 2) фреза радиусная диаметром 4 мм. Обработка осуществлялась с использованием СОЖ марки “OILCOOL CLEANLINE”.

Изготовленная модель комбайна была отправлена на Всероссийский конкурс изделий на станках с ЧПУ “CNC MASTERS 2019”, состоявшийся в г. Москва. Итоги конкурса были представлены на выставке “Металлообработка 2019” 30 мая 2019 г.

Технология изготовления модели комбайна

Сборочный чертеж модели комбайна отражен на рис. 1, где 1 - корпус, 2 - стойки для поддержки стрелы, 3 - шнек, 4 - стрела, 5 - кабина, 6 - шпилька, 7, 8 - винты.

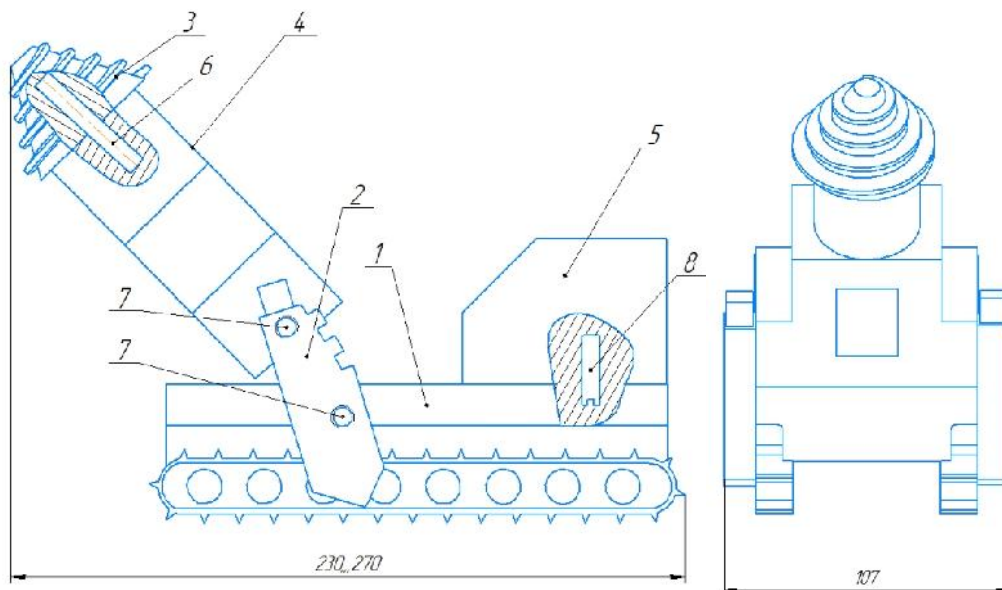


Рис. 1. Модель проходческого комбайна.

Для получения модели разработаны технологии изготовления отдельных деталей и для каждой из них подготовлены управляющие программы. [6, 7, 8] Элементы управляющих программ в форме статических изображений, иллюстрирующих отдельные (центральные) этапы изготовления деталей модели, представлены на рис. 2 - 5.

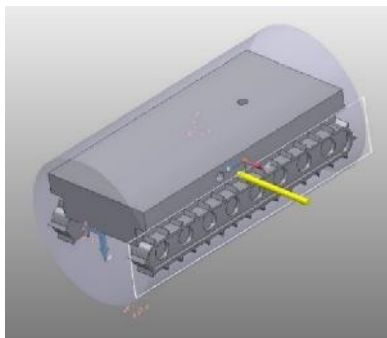


Рис.2. Изготовление корпуса

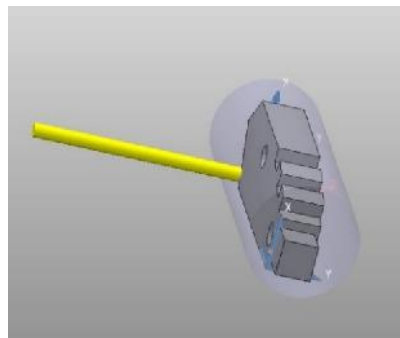


Рис.3. Изготовление стоек для поддержки стрелы

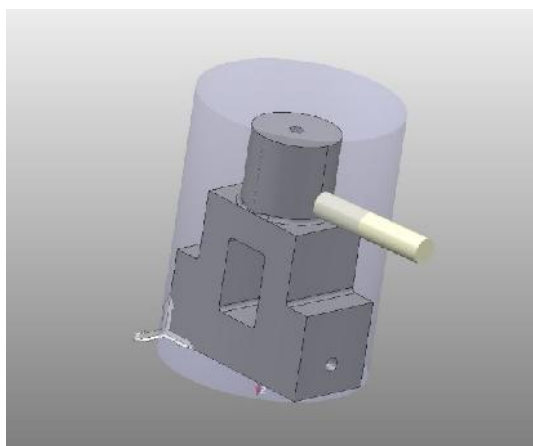


Рис. 4. Изготовление стрелы

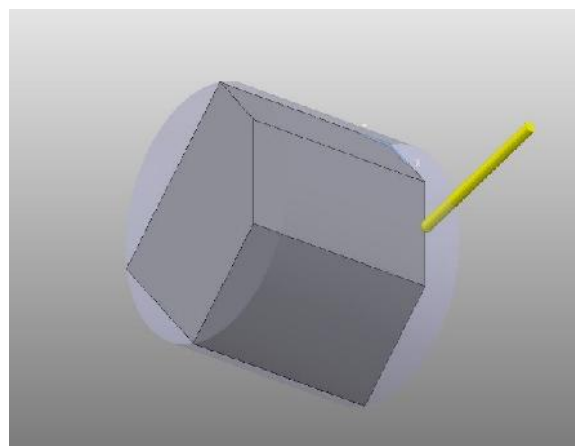


Рис.5. Изготовление кабины

На представленных рисунках инструмент (концевая фреза) условно изображен в виде цилиндрика желтого или белого цвета.

Результаты и обсуждение

Внешний вид изготовленной модели комбайна представлен на рис. 6.

Модель, отправленная на конкурс, оценивалась экспертами Академии DMG MORI, представителями фирм WSR, ЦОЛЛА/Mastercam, Sandvik Coromant, SCHUNK и Mitutoyo по ряду критериев по 100-бальной шкале.

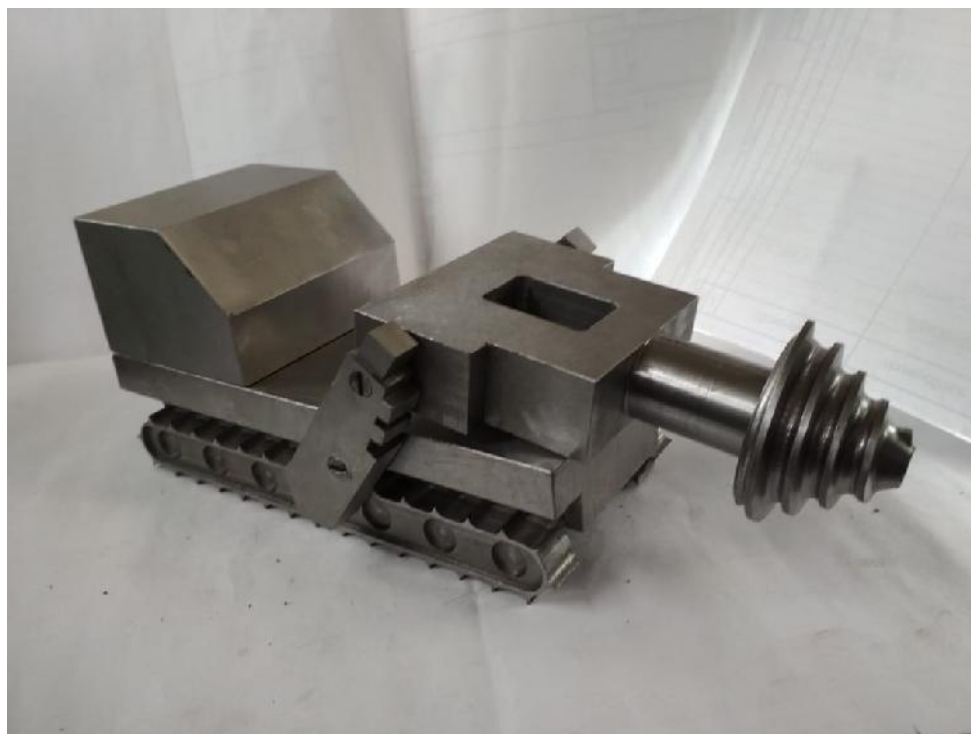


Рис. 6. Модель комбайна

Выводы

Изготовленная в металле модель комбайна, отправлена в г. Москву в конкурсную комиссию по оценке проекта вместе с сопроводительной документацией. Документация содержала: трёхминутный видеоролик о работе над проектом, презентацию учебного заведения [9] и завода [3], команды проекта, этапы создания проекта, технологии обработки на станке DMG MORI, финальную сборку. [10] Основные этапы процессы разработки и изготовления также фотографировались.

По итогам оценки проекта конкурсной комиссией принято решение о награждении данного проекта Дипломом за IV место среди всех регионов Российской Федерации (см. рис. 7).



Рис. 7. Диплом “CNC MASTERS 2019” (IV место) по итогам участия во Всероссийском конкурсе по станкам с ЧПУ.

Список литературы

1. DMG MORI «Technology Excellence»: журнал. – 2019. – № 2. – 78 с.
2. Коротков А.Н., Короткова Л.П. Подготовка специалистов по металлорежущим станкам, инструментами и управлению качеством для промышленности Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2019. – № 5. – С. 101–105.
3. Завод и люди. 85 лет Кемеровскому механическому заводу. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2014. – 159 с.
4. Ескин Е.В., Коротков А.Н. Разработка 3D модели и конструкторской документации уменьшенной копии комбайна для добычи угля [Электронный ресурс] // Россия молодая: 11

Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, Кемерово, 16–19 апр. 2019 г. – Режим доступа: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2019/RM19/pages/Articles/40202.pdf>.

5. Григорьев С.Н., Кохомский М.В., Маслов А.Р. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.

6. PowerMILL 2012. Руководство по макропрограммированию // Delcam Advanced Manufacturing Solutions. – 2011. – № 4. – 91 с.

7. Кряжев Д.Ю. Фрезерная обработка на станках с ЧПУ с системой ЧПУ FANUC: учеб. пособие. Версия 0.1. – М.: ЗАО «ИРЛЕН-инжиниринг». – 2005. – 40 с.

8. Капитальян И.А. Программирование и наладка станка с числовым программным управлением: учеб.-метод. пособие для студентов машиностроит. специальностей высш. учеб. заведений. – Минск: БНТУ, 2015. – 135 с.

9. Черкашин С.О., Галат А.А. Краткая история КузГТУ и АО «Кемеровский механический завод» [Электронный ресурс] // Россия молодая: 11 Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, Кемерово, 16–19 апр. 2019 г. – Режим доступа: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2019/RM19/pages/Articles/90219.pdf>.

10. Тмаркин М.А., Давыдова И.В., Тищенко Э.Э. Технология сборочного производства. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 270 с.

PRACTICE OF APPLICATION OF A CNC MACHINE DMG MORI MODELS MORI SEIKI NMV 5000 DCG FOR THE PRODUCTION OF COMPLEX CASE PARTS

Korotkov A.N.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: korotkov.a.n@mail.ru

Cherkashin S.O.¹, Bachelor of Engineering Science, e-mail: msikuzstu@mail.ru

Eskin E.V.^{1,2}, Master's Degree student, e-mail: msikuzstu@mail.ru

Kuznetsov A.A.^{1,2}, Master's Degree student, e-mail: msikuzstu@mail.ru

¹ Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 28 Vesennaya st., Kemerovo, 650000, Russian Federation

² JSC "Kemerovo Mechanical Plant", 31 1st Stakhanovskaya str., Kemerovo, 650021, Russian Federation

Abstract

DMG MORI CNC machines are highly efficient in the manufacture of complex body parts. To evaluate their operational capabilities in practice, the development team from KuzGTU and the plant of KMZ JSC prepared a project “Model of a roadheader for coal mining in the Kuzbass mines”. During the preparation of the project, drawings of individual parts and an assembly unit, 3D models of parts, control program files for the DMG MORI machine, video and photo work on the project, a technological route for assembling the product, and a map for setting up tools were developed. The finished project (in metal and with supporting documentation) was evaluated by a competent commission at the CNC MASTERS 2019 All-Russian competition. The result of the assessment - Diploma for IV place among all regions of the Russian Federation.

Keywords

CNC machines, DMG MORI, control program files, process route, 3D models, tool setup map

УДК 621.7.01

УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОПИТКИ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

В.С. ЮДИН, аспирант
А.В. БАЛАШОВ, канд. техн. наук, доцент
М.И. МАРКОВА, канд. техн. наук, доцент
(АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул)

А.В. Балашов – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
e-mail: bavagtu@mail.ru

В статье рассмотрены способы повышения качества поверхностного слоя прецизионных деталей маши и методы повышения стойкости шлифовальных кругов. Описана технология импрегнирования абразивных инструментов, приведены режимы пропитки абразивного инструмента бакелитовой смолой, разведенной в ацетоне или спирте. Представлена конструкция установки для пропитки шлифовальных кругов вакуумированием. Раскрыта работа предложенной установки. Установка позволяет обеспечить стабильность твердости шлифовальных кругов за счёт их вращения. Разработанная установка позволяет автоматизировать процесс пропитки абразивных инструментов и сократить расход пропиточной смеси.

Ключевые слова: абразивные инструмент, импрегнирование, прецизионные детали, установка для пропитки

Введение

В условиях современного машиностроения, возрастает количество чистовых операций для получения качественных прецизионных деталей. Одной из наиболее распространенных чистовых операций, на которых формируются параметры качества прецизионных деталей, является шлифование. Шлифование прецизионных деталей связано с высокими скоростями резания, что вызывает прижоги на прецизионных поверхностях деталей. Высокие параметры точности прецизионных деталей сложно обеспечить инструментом, в связи с его износом.

Теория

Известны следующие методы снижения к минимуму износа абразивных инструментов на стадии подготовки его к работе: заполнение пор импрегнаторами; создание прерывистой рабочей поверхности инструментов; специальная термическая обработка инструментов [1 - 3]. Для этой же цели при эксплуатации применяют специализированные смазочно-охлаждающие жидкости и твердые смазки. Для обеспечения качества поверхности из перечисленных методов повышения свойств шлифовальных кругов наиболее экономичными и легкодоступными являются пути применения импрегнированных шлифовальных кругов, однако в настоящее время отсутствуют исследования по влиянию режимов пропитки на качество поверхностей прецизионных деталей.

Пропитка абразивных кругов жидкими импрегнаторами основана на знании точной структуры абразивного инструмента. Которая характеризуется отношением объемов зерен абразива, связки и пор и основана на сохранении равенства:

$$V_3+V_c+V_{\text{п}}=100\%,$$

где V_3 - объем зерна, V_c - объем связки, $V_{\text{п}}$ - объем пор.

Пропитка абразивного инструмента основана на заполнении пор жидкими импрегнаторами. При пропитке объем зерна остается неизменным, а меняется соотношение связки и пор абразивного инструмента.

Одной из наиболее распространенных технологий импрегнирования, является технология пропитки абразивного инструмента бакелитовой смолой, разведенной в ацетоне или спирте.

Перед началом процесса импрегнирования, абразивный инструмент подлежит сушке в печах при температуре 100 градусов в течении двух часов. После просушки абразивный инструмент остывает на воздухе до температуры помещения и опускается в разогретую до 40-50 градусов ванну со смесью бакелитовой смолы и ацетона в соотношении 1:10, где проводится выдержка не менее двух часов или до заполнения пор. После чего пропитанный абразивный инструмент вынимается из ванны и ложится на поддон с решеткой на 1-2 часа для стекания излишек импрегнатора. После чего импрегнированный бакелитовым раствором абразивный инструмент помещается в нагретую до 50-60 градусов печь на 4 часа. После абразивный инструмент остывает до температуры помещения и помещается в печь на два часа при температуре 160-180 градусов для окончательного подсушивания и остывает вместе с печью до температуры помещения.

Результаты и обсуждение

Для реализации технологии бакелитирования разработана установка (рисунок 1).

Установка содержит камеру 1 для изделий, которая посредством вакуумного вентиля 2 сообщается с атмосферой. Внизу камеры 1 размещен электронагреватель 3. Под нагревателем расположен резервуар 4 для жидкого бакелита, сообщающийся с атмосферой путем патрубком 5. Под резервуаром для жидкого бакелита находится электронагреватель 6. Камера 1 снабжена герметичной крышкой 7, в которую установлены инфракрасные излучатели 8. Вакуумирование камеры производится через магистраль вакуумного вентиля 9. В нижней части камеры приварен трубопровод 10, по которому через вакуумный вентиль 11 производится подача жидкого бакелита в камеру и слив жидкого бакелита в резервуар. Также установка содержит электродвигатель 12, который путем клиноременной передачи 14 передает вращательное движение со шкива 13 на шкив 15 и вращает ось 16, которая установлена на стойках 17. Для контроля температуры предусмотрен датчик 18.

Установка работает следующим образом. Абразивный инструмент располагается вертикально в камере 1 на оси 16, камера герметично закрывается крышкой 7. Одновременно включаются электронагреватели 3,6, которые нагревают камеру 1, а также резервуар с маслом до температуры 40⁰С.

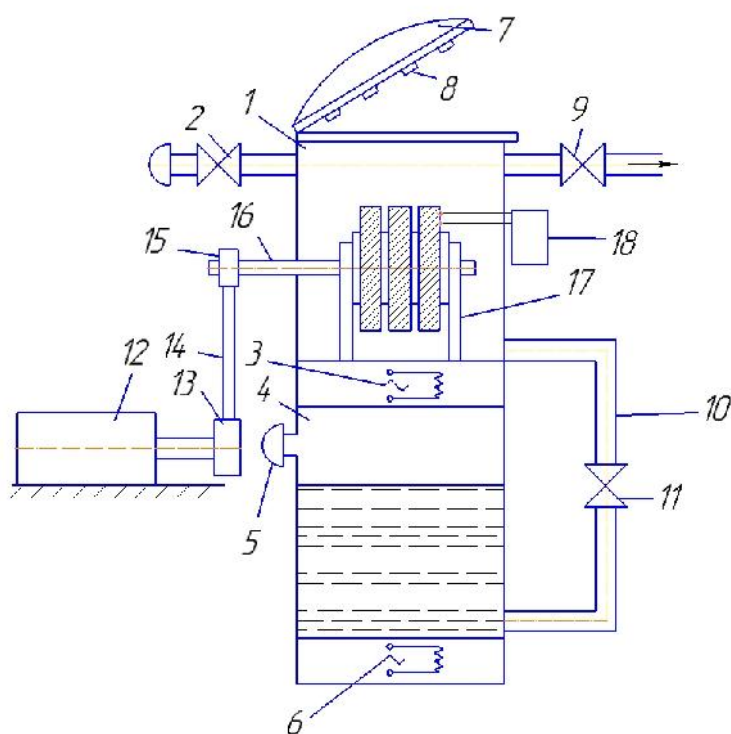


Рис. 1. Установка для бакелитирования инструмента

После этого открывается вакуумный вентиль 9, включается насос и начинается откачка воздуха из камеры 1. В процессе нагрева и вакуумирования из пор и поверхностей изделий удаляются газы и механические примеси. При разряжении в камере порядка 10^{-2} - 10^{-3} мм. рт. ст. закрывается вакуумный вентиль 9, открывается вакуумный вентиль 11 и по трубопроводу 10 разогретый жидкий бакелит из резервуара 4 под действием атмосферного давления поступает в камеру 1, заполняя ее. Таким образом, очищенные изделия оказываются наполовину в жидком бакелите. Включается электродвигатель 12, который путем клиноременной передачи 14 и шкивов 13, 15 вращает ось с абразивным инструментом, обеспечивая равномерность нагрева шлифовального круга и как следствие стабильность твердости полученных кругов. Изделия выдерживаются в жидком бакелите определенное время, необходимое для пропитки. После выдержки открывается вакуумный вентиль 2 и камера 1 заполняется воздухом, в результате чего жидкий бакелит вытекает из камеры 1 в резервуар 4. Одновременно включаются инфракрасные излучатели 8, которые нагревают вращающийся абразивный инструмент в течении времени, необходимом для сушки. Для регулировки температуры нагрева предусмотрен датчик 18. После необходимой выдержки инфракрасные излучатели 8 отключаются, одновременно с этим отключается привод электродвигателя 12 и открывается герметичная крышка 7. После остывания до температуры $20-30^{\circ}\text{C}$ абразивный инструмент вынимается.

Выводы

1. Одной из наиболее распространенных технологий импрегнирования, является технология пропитки абразивного инструмента бакелитовой смолой, разведенной в ацетоне или спирте.
2. Разработана установка для пропитки абразивных инструментов вакуумированием.

3. Разработана установка позволяет автоматизировать процесс пропитки абразивных инструментов, сократить расход пропиточной смеси и обеспечить стабильность твердости шлифовального круга.

Список литературы

1. *Шевелёва Е.А.* Обеспечение качества прецизионных деталей топливной аппаратуры при внутреннем шлифовании комбинированно-импрегнированным абразивным инструментом: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. – Барнаул, 2008. – 125 с.

2. *Братчиков А.Я.* Способы пропитки абразивных кругов. Вып. 1 // Абразивы: научн.-техн. реф. сб. – М.: НИИмаш, 1974.

3. *Лобанов А.В., Перцов Н.В., Силин С.С.* Повышение эффективности шлифования применением абразивного инструмента с наполнителем // Физика и химия обработки материалов. – 1979. – № 2. – С. 154–157.

INSTALLATION FOR IMPREGNATION OF ABRASIVE TOOLS

Yudin V.S., Ph.D. student, e-mail: bavagtu@gmail.com

Balashov A.V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: bavagtu@mail.ru

Markova M.I., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: margarita-markova@inbox.ru

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

Abstract

The article discusses ways to improve the quality of the surface layer of the precision parts of the machine and methods to increase the resistance of grinding wheels. The technology of impregnation of abrasive tools is described, the modes of impregnation of an abrasive tool with bakelite resin diluted in acetone or alcohol are described. The design of the installation for impregnation of grinding wheels by vacuum is presented. The operation of the proposed installation is disclosed. The installation allows you to ensure stability of the hardness of the grinding wheels due to their rotation. The developed installation allows you to automate the process of impregnation of abrasive tools and reduce the consumption of impregnating mixture.

Keywords

abrasive tools, impregnation, precision parts, impregnation plant

УДК 66-935.2

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ТЕХНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПИЩЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН
(ИХ ГЛАВНЫХ ПАРАМЕТРОВ)**

*В. А. КЕРЖЕНЦЕВ, канд. техн. наук, доцент
Н. В. ПЕРОВА, ст. преподаватель
Э. В. АБАРИНОВА, студент
К. А. АСЮТКОВ, студент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Перова Н.В. - 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: perova@corp.nstu.ru

Функционально-логический метод может быть применен к расчету технических параметров пищевых перерабатывающих машин. Он позволяет расширить возможности расчета и проектирования данных машин с помощью введения функционально-логических связей и анализа их размерностей. В частности, разработанный метод может обеспечить взаимосогласование параметров при расчете новых моделей машин пищевого производства и определить их главные характеристики для образования типоразмерных рядов. Другим преимуществом метода может стать возможность проведения теоретических расчетов мощности машины на начальном этапе проектирования для выбора электродвигателя.

Ключевые слова: функции механизма, логические связи, согласование параметров, технические характеристики

Введение

Проектирование машин – трудная и творческая задача для разработчиков механического оборудования. Не лишено этих трудностей и проектирование пищевых перерабатывающих машин. Облегчить разработку эффективно работающих машин помогут изучение и применение нового подхода к анализу классических формул расчета. Предлагаемые здесь математические методы больше относятся к общим вопросам, связанным с машиноведческими принципами исследования [1]. К ним можно отнести и проблему поиска такой методологии общего расчета технических характеристик машин, в которой уравнения и формулы, применяемые разработчиками для вычисления технических параметров машин, могут быть объединены логически-следственными связями и образовывать новые уравнения. Но за классически составленными формулами не всегда обнаруживается смысл действий, осуществляемых устройством. Здесь же появляется возможность преобразования формул с помощью логических операций. Параметры машин имеют определенные размерности, функционально являющиеся величинами системы единиц СИ: кг, м, с - основные для механических систем [2]. Как известно, исследуемые параметры связываются между собой путем составления алгебраических уравнений через знак равенства. Соединенные в одной формуле параметры, выраженные через размерные единицы, создают уравнения связей между параметрами. В результате дальнейших преобразований по правилам логических вычислений появляются новые размерности и величины приобретают новый смысл, а действия машин получают новые понятия и

расширение функций. Например, такой параметр, как производительность, включает понятия массы как «килограмм» (кг) и продолжительности как «время» (час), за которое масса продукта должна быть переработана машиной. И можно считать, что указанное соединение образует некую логическую связь между массой продукта и временем, что выражается через отношение двух величин в одном параметре: (кг/ч). В принципе, исследуемые параметры и их размерности отражают свойства и способности машины выполнять определенные функции. Функции сохраняются в структуре машины в виде логически обоснованных соотношений, существующих между элементами кинематической цепи, или звеньями, или параметрами машины. Например, приведенное выше понятие «производительность» отражает способность машины вырабатывать определенное количество продукции в единицу времени и эта функция постоянно присутствует в механической структуре, но материально проявляется только при включении машины в работу. По причине того, что в классической формуле смысл производительности сохранен, то подставляя в формулу разные числовые значения, можно рассчитать и выбрать из них требуемые, а затем сравнить результаты вычислений и принять нужное значение.

Ниже даны примеры специально проведенных аналитических исследований пищеперерабатывающих машин, найдены методы расчета, которые могут быть доведены до конкретного результата, приближающиеся к уравнениям функционально-логических связей. Эти исследования включали: выбор режимов переработки, расчеты продолжительности операций, их производительности, вычисления скорости, мощности, геометрических размеров, оптимальных загрузок, силовых нагрузок и пр. Практическое применение метода позволит модернизировать перерабатывающие машины, работающие в промышленности. Например, выявить резервные возможности машин и увеличить дозагрузку рабочей камеры, если мощность установленного электродвигателя превышает расчетную величину.

Если параметры структурных связей машины зашифрованы в логической структуре формул в смысле системной взаимной увязке параметров друг с другом, то такая увязка может относиться и к звеньям. Продвижение продукта в машине определяет способ переработки продукта, а ее рабочие звенья могут быть отражены на кинематической схеме устройства. Таким образом, логически обоснованные величины параметров, записанные в алгебраической форме, определяют в совокупности способ получения продукта и задают механическую структуру для осуществления этого способа.

Из логически-обоснованных возможностей проектирования, определяемых структурой машины, разработчик может установить уравнения связей, записать их в алгебраической форме, разработать конструкцию устройства и, что главное, обеспечить выполнение машиной функций, приводящих к следующим действиям:

- подведению к устройству мощности ($N = H \cdot m/c$) достаточной и необходимой для ведения технологических операций с продуктом;
- взаимодействие между звеньями и продуктом с силой, необходимой и достаточной для продвижения продукта ($H = \text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$);
- придания рабочей скорости « v » и ускорения « a » звеньям и продукту в соответствии с законом «действия и противодействия» ($v = \text{м}/\text{с}$; $a = \text{м}/\text{с}^2$);
- создания давления на продуктовую массу ($P_a = H/m^2$) в соответствии с условиями технологического процесса обработки продукта и обеспечения жесткости в месте контакта со звеньями (H/m);
- загрузки камеры продуктовой массой в соответствии с ограниченным объемом продукта W и его плотностью ρ и ($m = W\rho$);
- продвижения продукта в зоне обработки длиной L , соответствующей длительности ведения технологического процесса ($L = vt$);

и другие действия, связанные с применением вращающего момента, количества движения, кинетической энергии, и пр.

Цель работы

Разработать расчет основных параметров пищеперерабатывающих машин путем введения функционально-логических методов проектирования.

Теория. Функционально-логический метод расчета

Ниже приведены сведения о результатах проведенных исследований пищеперерабатывающих машин. Общеизвестно, что результаты вычислений параметров, которые проведены по классическим методикам, не всегда точны из-за вводимых упрощений и ограничений, или неточно составленных формул, или же результат зависит от численных значений коэффициентов, имеющих широкие пределы изменений [3]. И тогда трудно понять, какой же из результатов более объективен. Желательно ограничить разброс значений параметров определенными условиями или рамками для получения более точного результата. Это могут быть, например, условия согласованности между параметрами, входящими в формулу (то есть взаимосогласованностью) [4]. Совместная согласованность может быть такой, которая позволит самим параметрам устанавливаться в соподчиненное (взаимоподчиненное) положение друг к другу. Проведенные исследования показывают, что это возможно [5].

Разработчик машины установит взаимосогласования между параметрами логическими методами и представит новую запись расчетных формул. При этом численные значения параметров будут жестко согласованы друг с другом в новой форме записи. Тогда выявится главное следствие такого метода расчета – возможность получить еще на стадии предварительного проектирования точные технические показатели машины. И среди них – технологическая мощность, величину которой необходимо знать еще до начала проектирования, чтобы обосновать выбор электродвигателя. При этом, функционально-логический метод предполагает выделить исследуемый параметр (путем преобразования классически сформированных формул) и определить его значение в зависимости от входящих в формулу других переменных, принятых в качестве аргументов.

Распространяя опыт такого метода расчета на исследование неизвестного параметра, можно выделить его в уравнении через знак равенства в качестве переменной (левая часть уравнения). А значения известных величин представить в качестве аргумента (правая часть). Тогда можно найти численное значение исследуемого параметра.

В приведенных выше работах расчетные уравнения представлены в виде сочетания буквенных переменных, между которыми создается взаимоотношение логически обусловленных и взаимно согласованных связей между параметрами. Это придает вновь созданному буквенному образованию (уравнению) некоторый другой смысл.

Формула метода

В основе функционально-логического метода лежит объединение технических параметров машины, сформированных буквенными сочетаниями, в обобщенное алгебраическое уравнение (составленное по правилам логики с учетом степенных функций). Метод позволяет выделить исследуемый параметр (в первой степени), представить его как

переменную, а остальные параметры уравнения принять как постоянные величины (в качестве аргументов). Применяв к сформированному уравнению свойства прямого и взаимнообратного соответствия, можно получить численное значение исследуемого параметра. Аналогично, для численного определения другой неизвестной величины, находящейся в системной увязке с параметрами устройства, отделить её от других, представив в первой степени, подставить в новое *обобщенное* уравнение известные параметры, или параметр, только что рассчитанный на предыдущем шаге расчетов, и произвести вычисления.

Данный метод вводит в логическое согласование исследуемые параметры машин, их переформулирование через логические связи в новое выражение и после этого производятся их расчет по правилам вычислительных операций с учетом степенных функций. Именно эта форма расчета подходит для исследования машин пищевого производства.

Приведем результаты исследования картофелеочистительной машины типа МОК по классическим формулам [6]. Расчеты показали, что можно увеличить загрузку камеры картофелем, подтвердив это вычислением количества движения массы картофеля. И главное, позволили найти обобщенную формулу, функционально представляющую собой уравнение связи между такими основными техническими характеристиками машины как технологическая мощность процесса очистки картофеля N , масса порции картофеля m , и частота вращения n абразивной чаши. Формула, объединяющая эти параметры, имеет вид:

$$N = A_2 n_{\text{ч}} m^{1.33}, \quad (1)$$

где A_2 – объединение коэффициентов, характеризующая их общую величину (и среди них – основной оператор, управляющий значениями величин в одном расчетном цикле, принятый как отношение между размерами клубня картофеля и рабочей камеры).

Как следует из формулы (1), она определяет технологическую мощность, численное значение которой можно определить, подставив в формулу известные значения. Как же можно использовать формулу (1) для вычисления других характеристик машины? Форма записи (1) позволяет получить путем логических преобразований, проведенных с учетом степенных функций, формулу для вычисления массы порции картофеля, загружаемой в рабочую камеру машины. Она имеет вид:

$$m_{\text{H}} = \left(\frac{N}{A_2 n_{\text{ч}}} \right)^{0.75}. \quad (2)$$

Масса картофеля, рассчитанная по формуле (2), будет соответствовать той порции картофеля, для переработки картофеля и предназначена мощность N .

Аналогичными действиями можно получить из формулы (1) другую, по которой можно вычислить частоту вращения рабочего органа:

$$n_{\text{опт}} = \frac{N}{A_2 m^{1.33}}. \quad (3)$$

И также она будет соответствовать в полной мере мощности, рассчитанной по формуле (1).

Еще один главный параметр – производительность картофелечистки может быть рассчитана по формуле (2), если ввести в нее требуемое время t обработки картофеля массой m :

$$Q_{\text{H}} = \left(\frac{N_{\text{H}}}{A_2 n_{\text{ч}}} \right)^{0.75} \frac{1}{t}. \quad (4)$$

Расшифровка метода

В приведенных выше формулах проявляются замечательные свойства такой формы записи как свойства прямого и взаимного соответствия, [5]. Формула (1) имеет свойство прямого соответствия (ПрС), если степени параметров в правой части положительны, а переменная N увеличивается по мере увеличения значений правой части. Если в формуле (1) переменные имеют отрицательное значение, то можно сказать, что формулы (2) и (3) обладают свойством взаимного соответствия (ВОбС), то есть по мере увеличения знаменателей переменные m и n уменьшают свои значения. Особо отметим, что указанные переменные в форме ВОбС могут меняться со знаменателем местами (с учетом степенных функций). Однако указанная операция перемены мест в формулах, обладающих свойством ВОбС, может быть осуществлена в том случае, если числитель сохраняет свое постоянное значение [5]. Таким образом, получается, что при фиксированном значении числителя искомая переменная может меняться местами со знаменателем и в этом случае знаменатель будет являться *определяющей величиной*, и она может быть изменена самим расчетчиком для получения нужного значения переменной. Кстати, формулы прямого соответствия, при выделении нового параметра могут быть преобразованы в формулу ВОбС. Знаменатель в формуле ВОбС может состоять из нескольких параметров или содержать какие либо коэффициенты, тогда каждый параметр в знаменателе также может быть изменен соответствующим образом, как например, знаменатель (A_2n) в формулах (2), (4), состоящей из произведения параметров A_2 и n . Свойство ВОбС проявляется между переменной Q и той же переменной (A_2n) . В этих формулах переменными являются величины A_2 и n , а аргументом служит параметр N . Это значит, что относительно параметра N формулы преобразованы так, что в итоге рассчитываемая переменная и знаменатель формул (образно говоря), меняются местами, (но с учетом показателей степеней). Получается, что если ввести в формулы (2) и (3) численную величину числителя (то есть параметр N), то можно определять численные значения или параметра m , или параметра n (они являются взаимосвязанными).

Еще одна проблема для разработчика – образовывать типоразмерные ряды проектируемых машин. Эта проблема может быть решена с помощью творческой работы проектировщика с предлагаемой здесь системой функционально-логических связей. Создатели машин стремятся к тому, чтобы следующие машины, разрабатываемые в данной серии, имели бы продолжение в развитии её возможностей, то есть, имели бы лучшие характеристики: более высокие показатели производительности, надежности, меньшую мощность, габаритность и пр. Для оценки и сравнения моделей в типоразмерных рядах требуется расчет их удельных показателей. Рассчитать удельные показатели перерабатывающих машин менее трудоемко помогут предлагаемые функционально-логические методы расчета.

Результаты и обсуждение

В приведенном выше материале обосновано применение новой методологии расчета перерабатывающих машин. В работе выявлено строение формул, образованных функционально-логическими связями, определены возможные действия с формулами, подтвержденные вышеприведенными математическими операциями.

Одним из преимуществ метода является теоретическое определение мощности машины еще до начала этапа проектирования, чтобы на последующих этапах применить правильно (объективно) выбранный электродвигатель. Метод позволяет иметь обобщенную

единую расчетную структуру, содержащую внутри себя (в логическом смысле) значения основных технических характеристик машины или их параметров. (Параметры зашифрованы в логической структуре формул *во взаимной системной увязке*).

Выводы

Как показано в приведенных выше примерах (пищеперерабатывающие машины типа картофелечистки МОК) возможно применение математических методов для объединения логическим путем основных технических параметров машин. Это позволило ввести в рассмотрение классически составленные формулы, приведенные в первоисточниках, представить их как функции некоторого устройства машины и образовать взаимосвязанные отношения между параметрами его, включая и главные характеристики машин. Введение логических связей с их размерностями позволило согласовать параметры и сделать результаты вычислений зависимыми от значений других параметров. Запись таких вычислений в форме функционально-логических связей позволило ввести новый метод в расчеты пищеперерабатывающих машин. Он углубляет знания о машинах, расширяет возможности расчетных методов и позволяет объективно и точно определять технические параметры исследуемых машин вплоть до представления их как параметров типоразмерного ряда.

Приведенные материалы, рассчитанные в известных первоисточниках указанных источников вплоть до числовых значений, позволят студентам рассчитать и разработать конструкции лабораторных образцов исследуемых машин, инженерно-техническим работникам пищеперерабатывающих предприятий – образцы промышленных макетов, а инженерам и работникам пищеперерабатывающих фабрик и заводов – модернизировать машины, работающие в промышленности.

Список литературы

1. *Крайнев А.Ф.* Словарь-справочник по механизмам. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. – 560 с.
2. *Чертов А.Г.* Физические величины: справ. пособие. – М.: Высшая школа, 1990. – 335 с.
3. *Хлунова Ю.В., Фомина К.А.* Исследование технических параметров шнековых конвейеров (сравнение расчетных величин с ТХ) // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 21–24 нояб. 2013 г. : в 10 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – Ч. 4. – С. 7–11.
4. *Керженцев В.А., Перова Н.В.* Повышение точности расчетов шнековых конвейеров путем переопределения независимой переменной (аргумента) // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 4 (61). – С. 48–62.
5. Новые перспективные возможности расчета шнековых конвейеров / В.А. Керженцев, Н.В. Перова, Г.М. Наливайченко, С.Н. Твердохлебов // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4, № 2. – С. 85–91.
6. Машины и аппараты пищевых производств: учеб. для вузов. В 2 кн. Кн. 1 / С.Т. Антипов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков и др. – М.: Высшая школа, 2001 – 703 с.

**DETERMINATION BY FUNCTIONAL-LOGICAL METHOD OF TECHNICAL
CHARACTERISTICS OF FOOD PROCESSING MACHINES
(THEIR MAIN PARAMETERS)**

Kerzhencev V. A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kerjencev46@ngs.ru

Perova N. V., Senior Lecturer, e-mail: perova@corp.nstu.ru

Abarinova E.V., Student, e-mail: abarinova1998@mail.ru

Asyutkov K.A., Student, e-mail: asyutkov@mail.ru

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

Abstract

Functional - logical method can be applied to the calculation technical parameters of food processing machines. This method allows to expand the capabilities of calculation and design of food processing machines by introducing functional - logical relationships and analysis of their dimensions. Functional - logical method can provide compatible of parameters and the calculation of new models of food production machines and their main characteristics for the formation of standard size range.

Another advantage of this method may be the possibility of carrying out theoretical calculations of the machine power on phase for the selection of an electric motor.

Keywords

mechanism functions, logical connections, compatible of parameters, technical characteristics

УДК 66-935.2

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛЧКА ПО ВЕЛИЧИНЕ МОЩНОСТИ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

*В. А. КЕРЖЕНЦЕВ, канд. техн. наук, доцент
Н. В. ПЕРОВА, ст. преподаватель
А. С. ГИЗЗАТУЛИН, студент
Ю. С. ТРОФИМОВА, студент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Перова Н.В. - 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: perova@corp.nstu.ru

Разработанный авторами метод функционально-логичеcких связей позволяет расширить возможности при расчете пищеperерабатывающих машин, в частности, волчков. Он вводит логические понятия связей между параметрами машин и математически описывает отношения между звеньями кинематических цепей и продуктом, а также между самими механизмами. Метод обосновывает и раскрывает на конкретном примере волчка связи между звеньями и продуктом в пищевой машине, представляя эти связи логическими функциями, выраженных уравнениями в буквенной форме. Логические связи, которые были до этого скрыты или не всегда понятны для смыслового определения, раскрыты с помощью размерностей при переменных в уравнениях и введением соответствующих новых параметров. На приведенном примере (волчок К6-ФВП) показана возможность применения предлагаемого математического метода к расчету основных технических параметров машин, объединенных логическим путем в общем расчетном процессе.

Ключевые слова: волчок, ножевые решетки, мощность, электродвигатель, логические связи, функция, согласование параметров.

Введение

Разработчики машин часто встречаются с затруднениями в расчетах конструктивно-технологических параметров. Особенно это касается машин пищевого производства, например, волчков [1]. Для волчков и других пищеperерабатывающих машин проблема заключается в том, что их проектирование желательно начинать с определения их главных технических характеристик: производительности, мощности, объема камер и др. От них зависят значения внутренних параметров механизмов волчка. Соединение звеньев в кинематические цепи внутри механизма будут определять функции, для которых предназначен механизм. Конечное звено цепи (или её промежуточное звено) формирует определенный параметр механизма, который должен быть рассчитан, чтобы правильно сконструировать всё устройство. Но не все числовые величины удастся определить разработчику машины. Рассчитать значения параметров, участвующих в конструировании машины – одна из задач проектирования волчка.

Другая задача для разработчика волчков заключается в сложности их структуры. Волчок имеет в своем составе четыре механизма, обеспечивающие выполнение четырех

основных функций. Это: продвижение мясного продукта (сырья) к подрезной решетке подающим шнеком; создание давления на продукт рабочим шнеком для продвижения его в волчке, и резание мясного сырья ножами. В конструкции высокопроизводительных волчков дополнительно устанавливается четвертый механизм, содержащий одновитковую лопасть для быстрой загрузки сырья в волчок [2].

Волчок является машиной непрерывного принципа действия. Для обеспечения непрерывного потока сырья через волчок предусмотрен привод отдельно для подающего шнека и отдельно для рабочего шнека, чтобы совместить скорости продукта. Поэтому необходим выбор электродвигателя, общего для обоих шнековых валов.

Расчет волчков начинают вести с определения главного параметра волчка – диаметра его ножевых решеток [3 – 4]. Однако для анализа работы волчка как целостного механизма этого недостаточно. Более того, отдельные механизмы волчка потребляют от электродвигателя разные значения мощности. Желательно знать значения этих мощностей и, в частности, мощность, требуемую для продвижения продукта через решетки.

Вопрос распределения мощности по механизмам волчка исследован в работе [5]. Было установлено, что потребление мощности для продвижения продукта через ножевые решетки составляет $N_1 = 8,9\%$ от всей мощности и равно 1421 Вт. Установив значения мощности на продвижение продукта через решетки, можно вести их расчёт по данной величине.

Исследованиями мощности занимались многие авторы по классически составленным формулам [1 – 4], но не выявлено формул, чтобы вести расчет решеток волчков по мощности продвижения продукта через решетки. На скорость продвижения через них продукта оказывают установленные между решетками ножи, влияние которых на мощность зависит от размера ножевых решеток, числа и диаметров отверстий в них. Для выяснения этого вопроса предлагается данная работа, в которой исследуются логические связи между главными параметрами волчков, позволяющие вести расчет решеток по мощности продвижения через них продукта.

Цель работы

Определить функционально-логическими методами параметры ножевых решеток волчков по известной мощности, требуемой на продвижение продукта через решётки.

Теория. Функционально-логические методы расчета параметров

В работе [5] выявлено, что между параметрами решеток, производительностью и скоростью продукта, проходящего через решетки, существуют определенные отношения, (взаимоотношения), которые можно рассматривать как связи, возникающие между ними. Связи можно определить как зависимости, описываемые уравнениями, обеспечивающими согласованность параметров кинематической цепи с продуктом (его скоростью или изменением его состояния). Можно сказать, что между звеньями цепи и продуктом образуются связи по передаче информации. Эти связи выражены через параметры, которые представлены буквенными переменными, имеющими соответствующие размерности, над которыми можно производить логические преобразования.

Таким образом, связи между звеньями также являются логически определёнными. Математические действия над уравнениями, описывающими такую передачу информации, можно принять как функционально-логический метод расчета параметров устройства и

применять его к проектированию машин (к их числовому расчету). Это позволит конструировать машины на более высоком уровне.

Покажем, как можно разработать логически связную систему расчета какого-либо механизма, объединив в ней параметры уравнения величин, входящих в систему в виде классически составленных формул. Большинство устройств машин, их механизмов или узлов уже рассмотрено в технической литературе и для них имеется ряд математических формул, которые могут являться основой для описания расчетных методов с помощью предлагаемых функционально-логических связей. Вид классических уравнений не всегда позволяет определить наличие функционально-логических связей между параметрами кинематической цепи и продуктом, или даже между параметрами самих механизмов машины, осуществляющих функции по переработке продуктов. Раскрытию логических связей помогут соответствующие размерности при параметрах. Выражения размерностей, принадлежащих формулам, определяют смысл произведенного действия на продукт (и даже функции передачи механического действия от звена к звену). Объединить классически составленные уравнения в некоторую логически связную систему – творческая задача исследователя и проектировщика машин.

Применим метод к расчету разных механизмов волчка.

1. Так, звено кинематической цепи, продвигающей продукт через ножевые решётки – это шнек. Он имеет шаг витков S , (м), и вращается с частотой n (мин⁻¹) и может перемещать продукт своими витками с некоторой линейной скоростью, определяемой для шнека произведением Sn (м/мин) по типу «винт-гайка». Продукт из-за трения о звенья отстает по скорости движения от витков шнека и скорость продукта описывается уравнением $v = Snk$ (м/мин). Соответствие скоростей друг другу обеспечивает функцию взаимодействия продукта со шнеком через параметр функции связи k .

2. Параметр « k » в функции связи (уравнение $v = Snk$, м/мин) является коэффициентом связи между линейной скоростью кинематической пары «винт-гайка» и скоростью продукта. Коэффициент « k » в этом смысле обеспечивает взаимное согласование между обеими скоростями. То есть шнек воздействует витками на продукт, а продукт получает движение со скоростью v . Происходит проявление логической связи между перемещением (в метрах), продолжительностью перемещения (в минутах) и скоростью (в м/мин). Появляется действие преобразования двух переменных, имеющих разные размерности, в третье.

3. Из уравнения скорости $v = Snk$ можно обратным действием, путем логического преобразования формулы, найти выражения для двух других параметров: $S=v/(nk)$ и $n=v/(Sn)$. Все три приведенные функции связаны друг с другом, и каждый параметр в образованных таким образом функциях зависит от значения других. Проявление связи, представленной через коэффициент k , разработчик сможет переопределить ее в другой форме (в более сложных функциях). Размерность связи сохраняется, если представить её коэффициентом с размерностью (k м/мин) или как простое число k , а размерность отнести к выражению v (v м/мин). Или даже разбить этот коэффициент на две или более частей (для лучшего понимания действия сложной связи).

4. Функция $v=Sn$ и функции $S=v/(nk)$ и $n=v/(Sn)$ имеют отрицательные степени переменных. Они имеют свойство взаимно-обратного соответствия (ВОБС): с формулами, обладающими функцией ВОБС, можно совершать логические действия, облегчающие ведение расчетов: если числитель в уравнениях является константой (неизменяемое число, постоянное по величине), то искомая функция (переменная в левой части уравнения) может меняться местами со знаменателем дроби (правая часть) с учетом степеней переменных. Это свойство может быть использовано для быстрого определения знаменателя при перестановки его на место функции, а функции на место знаменателя (с учетом изменения степеней) и последующего численного расчета.

5. Дальнейшее продвижение шнеком продукта вдоль горловины волчка приводит к появлению еще одной функции в кинематической цепи. Эта новая функция описывается формулой логической связи, проявляющейся между последним витком шнека, продуктом и ножевой решеткой (см. в [6] коэффициент связи A_1). Это – функция давления продукта на ножевую решетку и она характеризуется размерностью (Н/м^2).

6. При дальнейшем продвижении продукта в горловине волчка на него оказывают действие ножи, установленные между ножевыми решетками. Ножи находятся в контакте с плоскостями решеток, закрепленных в горловине, и прижаты к ножевым решеткам с усилием затяжки всего режущего механизма опорной решеткой. При вращении ножей между ними и решетками возникают усилия, которые проявляются как функция жесткости (Н/м , см. в [6] коэффициент связи A_3).

7. При дальнейшем продвижении продукта к выходной решетке вновь появляется функция давления, то есть образуется еще одна логическая связь между продуктом и последней ножевой решеткой (см. в [5] коэффициент связи A_2). В данном случае, функции обеих решеток объединены в одной формуле.

8. Еще одно действие, осуществляемое одновитковой лопастью волчка, определяет функцию подачи сырья в волчок (см. в [5] коэффициент связи A_4).

Итак, представленные соображения по введению функционально-логического исследования в структуру механизма могут рассматриваться как целостный математический аппарат, применяемый к проектируемому устройству для выявления в машине определенных функций. Функции сохраняются в структуре машины в виде логически обоснованных соотношений (связей). Например, понятие «скорость» отражает способность машины продвигать определенное количество продукции в единицу времени. А функция давления A_1 , жесткости A_3 и другие отражают способности машины производить определенные действия над продуктом, обеспечивают правильный технологический процесс переработки его. Эти способности кинематической цепи обеспечивать процесс переработки постоянно присутствуют в механической структуре машины как функции, но фактически проявляется только при включении машины в работу. По причине того, что смысловое выражение функций (например, скорости в классической формуле «скорость») сохранены, то, подставляя разные числовые параметры в формулы, можно получать разные значения параметров и принимать нужные для дальнейшего исследования.

Далее, по уравнениям, составленным в [5 – 6], можно сформировать систему функционально-логических связей между главными параметрами системы. Они выражены следующими взаимосогласованными уравнениями и содержат четыре главные характеристики машины, приводимые как технические характеристики на чертежах категории ВО. Математически эти характеристики представлены через свои буквенные обозначения: производительность Π , мощность N привода, скорость n главного рабочего органа (звена) и размера зоны обработки продукта (например, D – размер решеток), образующих между собой цепочку взаимосвязанных функций:

$$\Pi = \frac{N}{A_1 A_2 B_1}, \quad N = A_2 D_p^2 n_p, \quad n_p = \frac{N}{A_2 D_p^2}, \quad D_p = \left(\frac{N}{A_2 n_p}\right)^{0.5}, \quad (1)$$

где A_1 – безразмерный коэффициент связи между частотой вращения шнека, производительностью и диаметром решеток; A_2 – коэффициент связи, использующий коэффициенты живых сечений подрезной решетки и обеих ножевых решеток (имеет размерность Дж/м^2 , характеризующий работу давления при продвижении продукта через решетки); B_1 – коэффициент использования площади обеих решёток в их совместной работе

и учитывающий плотность продукта после измельчения ножами; (имеет размерность удельного объема продукта, кг/м³).

Теперь, если поставлена задача вести проектирование по величине мощности, то функционально-логический метод позволяет это делать также и для любого механизма машины, используя значение мощности, потребляемой этим механизмом. Перед проектированием важно знать контрольные значения главных характеристик машины и других менее значимых параметров. Важны также коэффициенты уравнений связей, особенно тех, которые имеют размерности. Поэтому первым этапом в исследовании машин с использованием функционально-логического метода желательно сначала применить этот метод к исследованию машины, действующей в промышленности и принятой за прототип, и для неё определить контрольные числовые значения параметров.

Для промышленного волчка К6-ФВП [1] мощность N_1 , требуемая для перемещения продукта через решетки, рассчитывается по следующей формуле [5]:

$$N_1 = D_p^2 \frac{\pi}{4} (K_{пр} + 2K_k + K_m) n_p a z, \quad (2)$$

где $K_{пр} = 0,42$ – 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; $a = 3500$ Дж/м² – удельный расход энергии на перерезание волокон, $z = 8$ – количество перьев ножей (два четырёхперьевых ножа).

Мощность N_1 , формула (2), расходуется на продвижение продукта через устройство всех решеток, состоящее из одной подрезной решетки, одной ножевой решетки с большими отверстиями и одной ножевой решетки с малыми отверстиями.

Формулы связей функционально-логического метода, приведенные в (1), позволяют составлять цепочки взаимосогласованных функций для внутренних параметров механизма, вести расчеты неизвестных параметров решеток подстановкой в цепочку известных. Продолжая подстановки в формулы значения рассчитанных величин, находят значения всех параметров.

Результаты и обсуждение

Из логически-обоснованных возможностей проектирования, предлагаемых функционально-логическим методом для расчета параметров, разработчик может творчески разработать уравнения связей, записать их в алгебраической форме, рассчитать размеры устройства, как это сделано для решеток волчка, и главное, обеспечить выполнение машиной таких функций:

- подвод к устройству технологической мощности ($N = Н \cdot м/с$) шнеком при обеспечении необходимой частоты вращения для получения заданной производительности;
- взаимодействие между решетками и продуктом для создания сил сжатия (Ньютон: $Н = кг/(м \cdot с^2)$) и обеспечения движения продукта через решетки;
- обеспечение свойств жесткости (между решетками и ножами, Н/м, [5] для резания продукта в пространстве рабочей зоны между режущими инструментами и опорной решеткой волчка;
- создание давления на продуктивную массу шнеком ($Па = Н/м^2$) при передвижении продукта вдоль горловины волчка;
- придания звеньям рабочей скорости « v » перемещающими продукт механическими звеньями ($v = м/с$).

Выводы

В статье приведено обоснование применения новой методологии расчета пищевого перерабатывающих машин. Выявлено, что формулы метода могут обладать свойствами ВОБС и это облегчает расчет параметров и позволяет выявить их взаимосогласованность путем образования функционально-логических связей.

Главным положительным результатом данной работы является возможность получения объективного результата расчета параметра, так как для исследуемого параметра он принимается в качестве аргумента, то есть заранее известной величины, например, величины мощности устройства. Появляется возможность проводить дальнейший расчет параметров по мощности выбранного типа электродвигателя. Таким образом, наравне с заданной величиной производительности и принятой технологической мощностью можно сразу произвести расчет всех других внутренних параметров машины.

Приведенный функционально-логический метод проектирования может быть применен к другим пищевым перерабатываемым машинам, для которых в технической литературе приведены формулы, классически составленные для расчетов и которыми можно воспользоваться. Так, установлено, что имеется возможность разработать функции логических связей и произвести расчеты машин, применяемых в промышленности. Для некоторых из них были проведены расчеты в классическом стиле и получены объективные результаты.

Список литературы

1. Машины и аппараты пищевых производств: учеб. для вузов. В 2 кн. Кн. 1 / С.Т. Антипов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков и др. – М.: Высшая школа, 2001. – 703 с.
2. Зуев Н.А., Пеленко В.В. Технологическое оборудование мясной промышленности. Мясорубки: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2019. – 80 с.
3. Ивашов В.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности. В 2 ч. Ч. 2. Оборудование для переработки мяса. – М.: КолосС. – 2001. – 552 с.
4. Технологические расчеты в дипломном и курсовом проектировании: учеб. пособие / Р.Э. Хабибуллин, И.Ф. Кабиров [и др.]; Казан. гос. технол. ун-т. – Казань, 2004. – 76 с.
5. Мощность, потребляемая волчком, и ее распределение по механизмам волчка / В.А. Керженцев, Н.В. Перова, Н.С. Древецкий, А.С. Косилов // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 275–281.
6. Разработка в табличной форме расчетных материалов и расчет механизмов волчка / В. А. Керженцев, Н. В. Перова, А. Н. Бредихина, Н. С. Печоркина // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 282–289.

DETERMINATION OF PARAMETERS OF MEAT GRINDER BY THE VALUE OF POWER OF THE ELECTRIC MOTOR USING FUNCTIONAL-LOGIC DESIGN METHODS

Kerzhencev V. A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kerjencev46@ngs.ru

Perova N. V., Senior Lecturer, e-mail: perova@corp.nstu.ru

Gizzatullin A. S., Student, e-mail: gizzatullin_99@mail.ru

Trofimova Y. S., Student, e-mail: Trofimova9433@gmail.com

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

Abstract

The proposed method of functional - logical relationships allows expanding the possibilities for calculating food processing machines, in particular, meat grinder. This method introduces the logical concepts of the relationship between the parameters of machines and mathematically describes the relationship between the links of the kinematic chains and the product, as well as between the mechanisms themselves. The method substantiates and reveals, on a specific example, the top of the connection between the links and the product in a food machine; representations of these connections by logical functions expressed by equations in alphabetical form. Logical connections that were previously hidden or not always clear for a semantic definition are disclosed using the dimensions of the variables in the equations and the introduction of new parameters. The above example (meat grinder K6 - FVP) shows the possibility of applying the proposed mathematical method to the calculation of the main technical parameters of machines, which are logically combined in a common calculation process.

Keywords

meat grinder, knife grids, power, electric motor, logical connections, function, parameter matching

УДК 669.017:539.43

**ДИСЛОКАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ**

*И.С. ЕРОХИНА, старший преподаватель
А.Б. МАКСИМОВ, канд. техн. наук, доцент
(КГМТУ, г. Керчь)*

Максимов А. Б. – 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82,
Керченский государственный морской технологический университет,
e-mail: aleksandrms@yandex.ru

В работе проанализировано изменение дислокационной структуры стали по слоям при циклическом пластическом изгибе. При изгибе образца величина деформации линейно возрастает от центра к поверхности. На основании данных о плотности дислокаций в центральном, промежуточном и поверхностном слоях проведен расчет изменения предела текучести в каждом слое в зависимости от степени деформации и числа циклов изгиба. Показано, что расчетные значения предела текучести при одинаковой суммарной деформации практически не зависят от положения слоя по толщине. Причем расчетные значения предела текучести по толщине соответствуют значения предела текучести при растяжении при условии равенства суммарной деформации при циклическом изгибе и растяжении. Установлены соотношения между суммарной деформацией при циклическом изгибе и расчетной (рассчитанной по плотности дислокаций).

Ключевые слова: низколегированная сталь, циклическая деформация изгибом, плотность дислокаций, вектор Бюргера, упрочнение стали.

Введение

В ряде работ [1, 2] показано, что деформационное воздействие циклическим пластическим изгибом в холодном, теплом или горячем состояниях позволяет повысить прочностные свойства толстолистового проката из низколегированных сталей при приемлемом уровне пластичности и ударной вязкости. Пластическое деформирование готового толстого листа возможно только путем изгиба, так как при этом не изменяются геометрические характеристики. Кроме того, это энергетически выгоднее, чем деформация прокаткой.

Известно, что деформация изгибом плоского образца сопровождается неравномерным распределением деформации по сечению: от нулевого значения в центре (на нейтральной линии) до максимального значения на поверхности [3]. Однако, как показано в работе [4 - 6] при пластическом изгибе происходит смещение нейтральной линии и вследствие цикличности деформации центральная часть испытывает пластическую деформацию. Кроме того, при изгибе одна сторона образца растягивается, а другая – сжимается. Наличие неравномерной деформации по сечению образца и одновременное растяжение одной стороны и сжатие другой отличает этот вид деформации от монотонного растяжения или сжатия. Поэтому изменение микроструктуры и, вследствие этого, механических свойств по

сечению образца, также будет отличаться. Стандартные методы испытания на растяжение и ударную вязкость интегрально оценивают эти характеристики по всему объему образца [7]. Литературных данных по учету и анализу вышеупомянутых особенностей циклического изгиба на свойства стали не обнаружено.

Целью исследования настоящей работы являлось проанализировать влияние неравномерного распределения деформации при пластическом изгибе на механические свойства низколегированных сталей.

Материал и методика исследования

В качестве материала исследования использованы образцы на растяжение из толстолистовой стали 10Г2С1. Образцы деформировали по схеме чистого изгиба со степенью разовой деформации 5,5% [1]. Образцы, после деформационной обработки циклическим изгибом, испытывали на растяжение с определением предела текучести, временного сопротивления разрыву и относительного удлинения.

Результаты и их обсуждение

Сопоставим кривые упрочнения стали при однонаправленной и циклической деформации.

Расчетные степень деформации и предел текучести стали определили по формулам [8 – 10]:

$$\varepsilon_{\text{рас}} = \rho b L_d, \quad (1)$$

$$\sigma_T = \sigma_0 + 0,5Gb\sqrt{\rho}, \quad (2)$$

где ρ – плотность дислокаций, м^{-2} ;

b – вектор Бюргера, $2,5 \cdot 10^{-10}$ м;

L_d – длина свободного пробега дислокаций, м;

σ_0 – исходный предел текучести, МПа;

G – модуль сдвига, $7,5 \cdot 10^5$ МПа.

За длину свободного пробега дислокаций принимаем средний размер ферритного зерна.

На рисунке 1 представлены расчетные зависимости упрочнения поверхностного, промежуточного и центрального слоев при циклическом изгибе нормализованной стали 10Г2С1 со степенью разовой деформации 5,5% в холодном состоянии. В качестве исходных данных использованы результаты электронно-микроскопических исследований [1, 11 – 17]. Для сравнения там же представлены фактические данные по растяжению.

Видно, что расчетные и фактические данные расположены вблизи прямой линии. Это свидетельствует о едином характере упрочнения независимо от вида деформирования и степени разовой деформации.

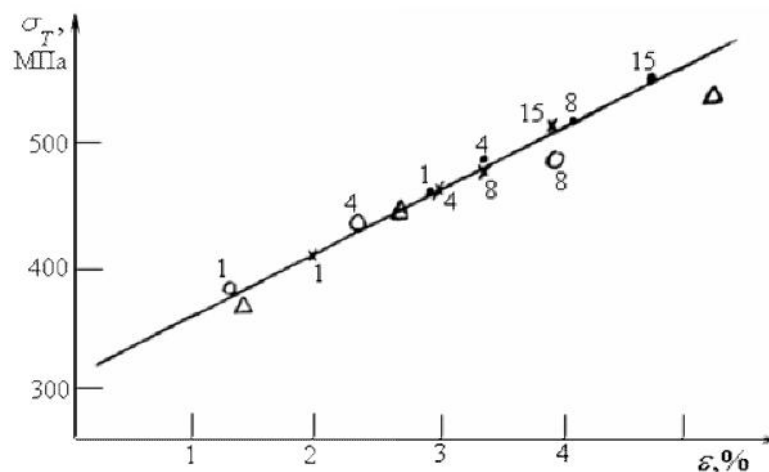


Рис. 1. Упрочнение нормализованной стали 10Г2С1 при изгибе (●, x, o) и растяжении (Δ): (●, x, o) – соответственно поверхностный, промежуточный и центральный слой

Анализ данных показывает, что связь между суммарной деформацией и расчетной можно представить в виде:

$$\varepsilon_{\text{сум}} = 1,85 \rho b L_d \cdot 100\%, \text{ при } 0 < \varepsilon_{\text{сум}} < 5\%, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\text{сум}} = 4,2(\rho b L_d - 0,26) \cdot 100\%, \text{ при } \varepsilon_{\text{сум}} > 5\%, \quad (4)$$

Расчетные значения предела текучести по слоям образца в зависимости от числа циклов изгиба находятся в хорошем соответствии с фактическими данными, характеризующими интегрально упрочнение всего сечения образца (рис. 2).

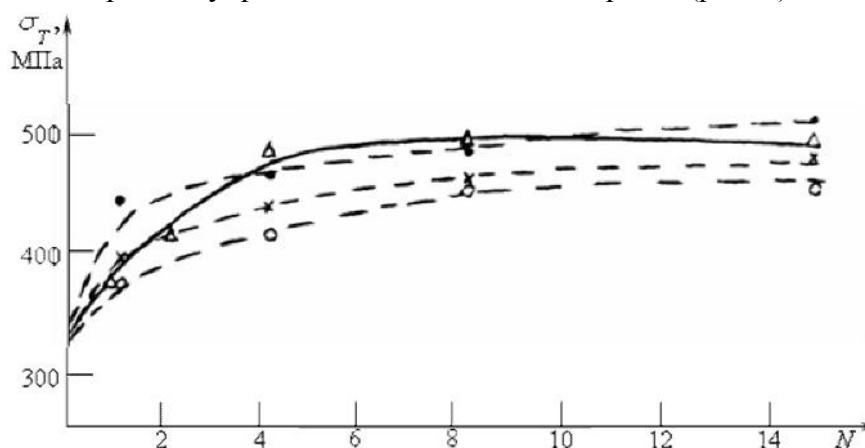


Рис. 2. Расчетное (●, x, o) и фактическое (Δ) упрочнение нормализованной стали 10Г2С1 при изгибе. Обозначения на рисунке 1

Таким образом, на основе фактической кривой упрочнения стали в данном исходном состоянии и, используя уравнения (1 – 3), можно оценить упрочнение при циклическом изгибе.

Известно [9, 10], что относительное изменение плотности стали ($\Delta\gamma/\gamma$), (где γ – плотность) стали, обусловленное дислокациями, определяется по формуле:

$$(\Delta\gamma/\gamma) = 2\rho b^2, \quad (5)$$

Используя формулу (1), получим:

$$(\Delta\gamma/\gamma) = 2b \frac{\varepsilon}{d} = 5 \cdot 10^{-10} \frac{\varepsilon}{d}, \quad (6)$$

Отсюда следует, что чем меньше межбарьерное расстояние, тем при меньшей деформации достигается одинаковое изменение плотности. Поэтому, чем дисперснее структура стали, тем меньше должна быть величина допустимой суммарной деформации.

Выводы

Полученные экспериментальные данные по связи исходной микроструктуры стали и характером изменения механических свойств при деформации подтверждают, что чем меньше межбарьерное расстояние, тем при меньшей деформации достигается одинаковое изменение плотности дислокации.

Расчетные значения относительного изменения плотности, вычисленные по формуле (5), на порядок выше, чем фактические. Это, по-видимому, свидетельствует о наличии пор и субмикротрещин. Возможно, что основная доля увеличения объема происходит за счет раскрытия уже имеющихся в исходном металле упругих микротрещин.

Список литературы

1. Подгайский М.С., Максимов А.Б., Нескуб Ю.П. Влияние деформации циклическим изгибом на дислокационную структуру стали 10Г2С1 // Известия Академии наук СССР. Металлы. – 1985. – № 5. – С. 131–133.
2. Максимов А.Б. Разработка модели упрочнения низколегированной стали при пластической деформации циклическим изгибом // Новые материалы и новые технологии в металлургии и машиностроении. – 2012. – № 1. – С. 87–90.
3. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов. – М.: МГТУ, 2000. – 592 с.
4. Максимов А.Б., Гуляев М.В. Распределение деформации по толщине широкого бруса при циклическом пластическом изгибе // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58, № 7. – С. 486–490.
5. Максимов А.Б., Гуляев М.В. Распределение прочности по толщине бруса при пластическом изгибе // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2015. – № 2. – С. 39–43.
6. Максимов А.Б., Ерохина И.С. Толстолистовой прокат с изменяющимися механическими свойствами по толщине // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2019. – Т. 62, № 8. – С. 587–593.
7. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч. 2. Механические испытания. Конструкционная прочность. – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с.
8. Физическое материаловедение. Вып. 3 / под ред. Р. Кана. – М.: Мир, 1968. – 484 с.
9. Скуднов В.А., Богачев Ф.А. Закономерности изменения плотности при ОМД // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1986. – № 8. – С. 48–53.
10. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
11. Панов Д.О., Балахнин А.Н., Титова М.Г. Эволюция структуры и свойств при интенсивной термоциклической обработке холоднодеформированной закаленной системно-легированной стали 10Х3Г3МФ // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 11. – С. 17–22.

12. Козлов Э.В., Тришкина Л.И., Попова Н.А. Место дислокационной физики в многоуровневом подходе к пластической деформации // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14, № 3. – С. 95–110.
13. Дегтярев М.В. Стадийность эволюции структуры железа и конструкционных сталей при сдвиге под давлением // Физика металлов и металловедение. – 2005. – Т. 99, № 6. – С. 47–60.
14. Металловедение и сварка: лабораторный практикум: учеб. пособие / В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко, А.П. Орлов, О.В. Кузьмин. – СПб., 2011. – 55 с.
15. Пантлеон В.Л. Структура деформации в сопоставлении с зернистой структурой после интенсивной пластической деформации // Вопросы материаловедения – 2007. – № 4 (52). – С. 13–23.
16. Концева Н.В., Михоленко Д.А., Ефимова Ю.Ю. Эволюция микроструктуры и свойств при нагреве феррито-перлитных углеродистых конструкционных сталей с ультрамелкозернистой структурой, сформированной интенсивной пластической деформацией // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 9. – С. 85–91.
17. Эволюция дислокационной структуры аустенитной стали X16H15M3T1 в зависимости от степени холодной пластической деформации / Г.Д. Бокучава, И.В. Папушкин, В.И. Бобровский, Н.В. Катаева // Поверхность, рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. – 2015. – № 1. – С. 49–57.

DISLOCATION MECHANISM OF STEEL HARDENING UNDER CYCLIC PLASTIC BENDING

Yerokhina I.S., Senior Lecturer, e-mail: irina-kerchanka@yandex.ru

Maksimov A.B., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: aleksandrmks@yandex.ru

Kerch State Marine Technological University, 82 Ordzhonikidze str., Kerch, 298309, Russian Federation

Abstract

The paper analyzes the change of the dislocation structure of steel in layers under cyclic plastic bending. When the sample is bent, the amount of deformation increases linearly from the center to the surface. Based on data on the density of dislocations in the central, intermediate and surface layers, the change in the yield strength in each layer was calculated depending on the degree of deformation and the number of bending cycles. It is shown that the calculated values of the yield strength for the same total deformation practically do not depend on the position of the layer in thickness. Moreover, the calculated values of the yield strength for the thickness correspond to the values of the yield strength under stretching, provided that the total deformation under cyclic bending and stretching is equal. The relations between the total deformation during cyclic bending and the calculated one (calculated from the dislocation density) are established.

Keywords

low-alloy steel, cyclic bending deformation, dislocation density, the Burgers vector, steel hardening.

УДК 669.3/7.017

СТРУКТУРА И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Si-Cu СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*М.В. ПОПОВА, доктор техн. наук, профессор
М.А. МАЛЮХ, ст. методист
(СибГИУ, г. Новокузнецк)*

Попова М.В. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: m.popova@rdtc.ru

Изучено влияние меди на микроструктуру и температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) сплавов системы Al-30÷40%Si-Cu. Результаты дилатометрических исследований показали, что введение легирующих элементов в равных количествах приводит к снижению теплового расширения сплава Al-30%Si-30%Cu до значений $6,0\div 6,9\cdot 10^{-6}$ град⁻¹ во всем температурном интервале испытаний. Показано, что высоколегированный сплав Al-40%Si-40%Cu имеет самые низкие значения ТКЛР в рабочем интервале температур ($\alpha_{50-150}=4,5\cdot 10^{-6}$ град⁻¹), нежели тройные сплавы с тем же суммарным содержанием легирующих элементов, но с другим их соотношением.

Металлографический анализ показал, что легирование медью сплавов Al-Si-Cu с содержанием кремния в количестве 30% и более, приводит к увеличению размеров частиц кремнистой фазы. Структура тройных сплавов Al-40%Si-Cu характеризуется крупными пластинчатыми кристаллами кремнистой фазы. Установлено, что легирование медью в больших количествах приводит к снижению предела растворимости кремния в алюминии.

Ключевые слова: алюминий, кремний, медь, легирование, структура, температурный коэффициент линейного расширения.

Введение

Для развития современных отраслей промышленности, в том числе, авиакосмической, электровакуумной и прецизионного приборостроения необходимы легкие сплавы с заданными теплофизическими свойствами, такими как теплопроводность, теплоемкость, плотность и температурный коэффициент линейного расширения [1, 2]. Сплавы с заданным ТКЛР применяются для получения вакуум-плотных спаев со стеклом, а также для производства изделий с высокой точностью размеров при различных температурах окружающей среды. В настоящее время в промышленности в качестве сплавов с заданным ТКЛР применяются инвары и суперинвары, а также спеченные алюминиевые сплавы (САС). Недостатками инваров являются большая плотность (8130 кг/м³) и высокое содержание дорогих и дефицитных легирующих элементов, в первую очередь, никеля и кобальта [3]. Сплавы САС имеют малую плотность (2730 кг/м³), но недостаточно низкий ТКЛР (не ниже $13,5\cdot 10^{-6}$ град⁻¹). Кроме того, недостатками порошковой технологии являются высокая остаточная пористость и высокая стоимость изготовления заготовок [4]. Поэтому разработка составов сплавов с заданными значениями ТКЛР остается актуальной и важной проблемой для материаловедения.

Многолетние исследования в данной области позволяют утверждать, что разработка новых легких сплавов с регламентированным ТКЛР возможна на основе системы Al-Si-Cu

[5, 6]. Изучение ТКЛР двойных сплавов Al–Si и Al–Cu показало, что он может изменяться в широком диапазоне, величина которого, прежде всего, определяется содержанием легирующих элементов, а также технологическими факторами, такими как способ обработки расплава [7–10]. И кремний, и медь значительно снижают ТКЛР алюминиевых сплавов, если их содержание многократно превышает равновесную растворимость в алюминии [11–13].

Введение меди и магния в сплавы Al–Si способствует их упрочнению при термической обработке за счет образования интерметаллидных фаз, что значительно повышает механические свойства силуминов [14–16]. Значительный объем литературных источников содержит результаты исследований структуры и механических свойств двойных и тройных сплавов на основе алюминия [17 – 19]. Интересные результаты получены при изучении процессов неравновесной кристаллизации, позволяющей улучшить параметры структуры и свойства тройных сплавов Al–Si–Cu [20 – 22]. Однако в научной литературе встречается гораздо меньше сведений о влиянии большого содержания кремния и меди на тепловое расширение алюминиевых сплавов [23, 24]. В основном, исследования посвящены изучению их влияния на теплопроводность и на коэффициент теплопередачи [25 – 27].

В связи с этим, целью настоящей работы являлось изучение микроструктуры и ТКЛР сплавов системы Al–Si–Cu, содержащих медь в количествах 15÷50%.

Методика экспериментального исследования

Выплавку сплавов проводили в печи шахтного типа в алундовом тигле. В качестве шихты использовали алюминий марки А7, кремний Кр0 и медь марки М1. После расплавления шихтового алюминия в него вводили кремний в количестве 30 % и 40 % и медь в количестве 15, 20, 40 и 50 %. Расплав заливали в алюминиевый кокиль ($t_{\text{зал.}} = 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$).

Из полученных слитков изготавливали образцы для дилатометрического и металлографического исследований. Изучение теплового расширения осуществляли на дифференциальном оптическом фоторегистрирующем дилатометре системы Шевенара в интервале температур испытания 50 – 450 °С, погрешность определения составляла $\pm 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Изучение микроструктуры проводили с помощью оптического микроскопа *OLYMPUS GX-5* (увеличение 200÷1000 крат). Электронно-микроскопические исследования и рентгеноспектральный микроанализ были проведены с помощью растрового электронного микроскопа *Carl Zeiss AG - EVO 50 Series*.

Результаты и их обсуждение.

При изучении микроструктуры сплавов Al-30%Si-Cu было установлено, что при содержании меди в количестве 20÷40 %, в их структуре наблюдаются крупные кристаллы кремнистой фазы пластинчатой формы (рис. 1 а, б, в), между которыми располагается сильно травящаяся эвтектика (α +Si+CuAl₂). Выявлено, что у сплавов с содержанием 40 % меди, кристаллы кремнистой фазы не имеют четкой огранки.

Структура сплавов Al-40%Si-Cu характеризуется крупными пластинчатыми кристаллами кремнистой фазы. Причем, с увеличением содержания меди до 50%, уменьшается объемная доля эвтектики (рис. 1 г, д, е).

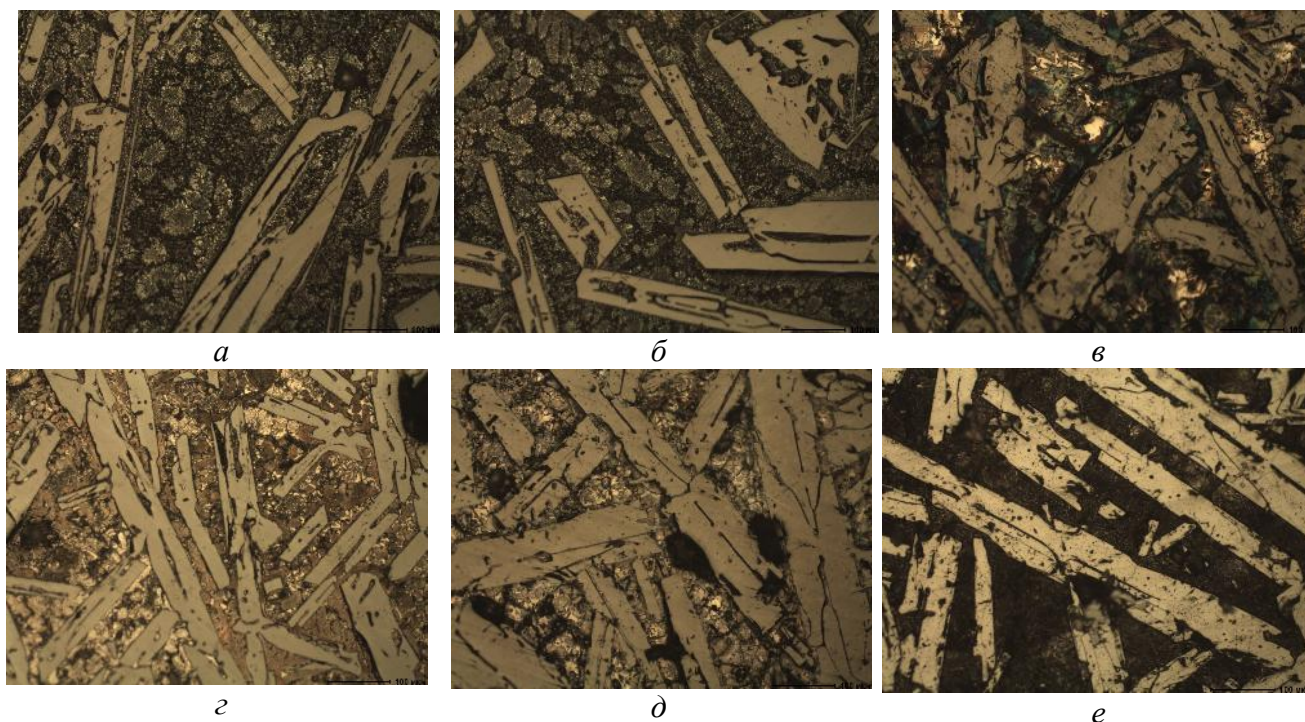


Рис.1. Влияние содержания меди на микроструктуру сплавов Al-30% Si- Cu (а, б, в) и Al-40 % Si-Cu (г, д, е): 20 % Cu (а), 30 % Cu (б), 40 % Cu (в), 15 % Cu (г), 40 % Cu (д), 50 % Cu (е)

Изучение сплавов Al-40%Si-Cu методом растровой электронной микроскопии позволило установить, что в их структуре наряду с крупными пластинчатыми кристаллами кремнистой фазы присутствует эвтектика (α +Si+CuAl₂), объемная доля которой уменьшается с увеличением содержания меди (рис. 2). Результаты рентгеноспектрального микроанализа подтверждают наличие фазы CuAl₂ в исследуемых сплавах.

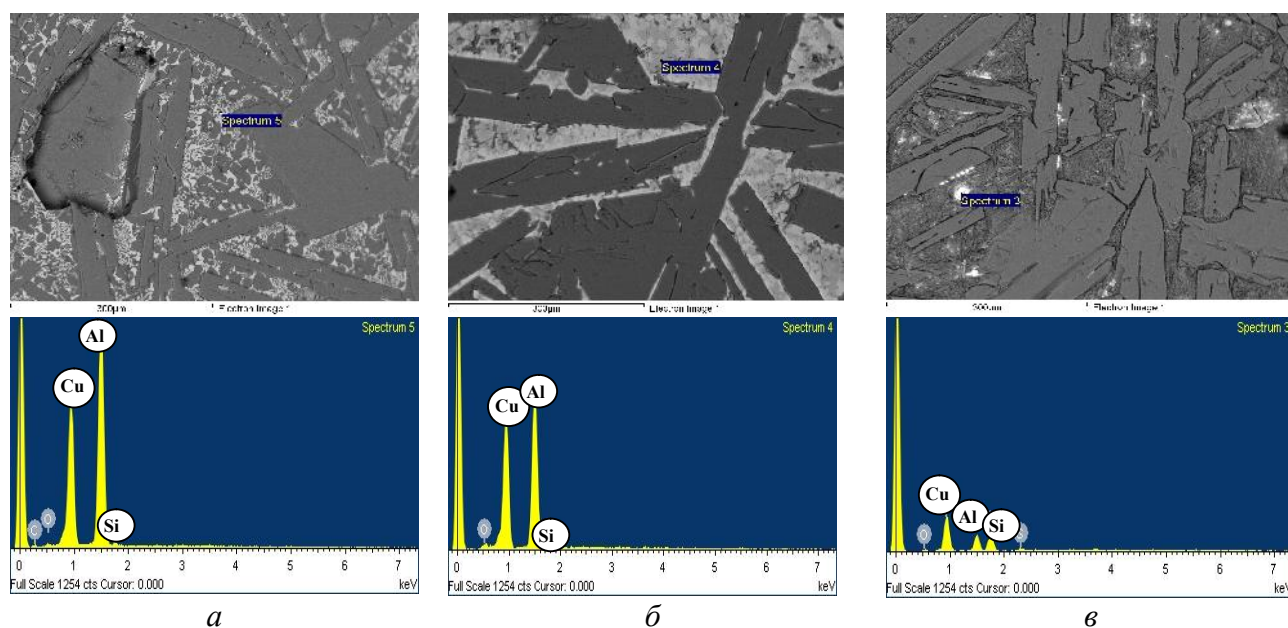


Рис. 2. Микроструктура и элементный состав сплава Al – 40 % Si – Cu с различным содержанием меди: 15 % Cu (а), 40 % Cu (б), 50 % Cu (в)

При определении ТКЛР изучаемых сплавов было установлено, что введение меди в сплавы Al-30%Si и Al-40%Si в количестве 20÷50% способствует снижению их теплового расширения (таблица 1).

Таблица 1

Влияние меди на тепловое расширение сплавов Al – (30÷40 % Si)

Основа сплава	Содержание меди, %	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$ град ⁻¹ при температуре нагрева, °С								
		50	100	150	200	250	300	350	400	450
Al-30% Si	20	12,5	12,3	12,4	12,5	12,0	11,9	12,2	12,4	11,4
	30	6,0	6,3	6,3	6,4	6,5	6,5	6,7	6,7	6,9
	40	6,1	6,2	6,2	6,2	7,2	7,5	7,6	7,8	8,0
	50	6,5	7,1	7,2	7,3	8,0	9,1	9,9	9,9	9,5
Al-40% Si	-	12,5	13,3	13,5	13,9	14,5	12,8	11,9	11,7	10,9
	20	8,9	9,1	9,2	9,3	9,4	9,6	9,7	9,9	10,1
	40	4,4	4,5	4,5	6,7	6,2	6,3	6,3	6,7	7,0

Исследования теплового расширения сплавов Al-30%Si, содержащих от 20 до 40 %Cu показали стабильные значения ТКЛР в интервале 50÷450 °С. Введение кремния и меди в равных количествах по 30 % снижает температурный коэффициент линейного расширения сплава до значений $6,0 \div 6,9 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Исследования теплового расширения сплавов Al-40%Si, содержащих от 20 до 40%Cu позволили установить, что сплав с равным содержанием кремния и меди имеет самые низкие значения ТКЛР в рабочем интервале температур, нежели тройные сплавы с тем же суммарным содержанием легирующих элементов, но с другим их соотношением.

Предложены возможные области для практического применения разработанных составов тройных сплавов, близких по ТКЛР к промышленным инварам (таблица 2).

Таблица 2

Возможная область применения новых сплавов

Сплав с регламентированным ТКЛР		Средний $\alpha \cdot 10^6$ град ⁻¹ в интервале температур, °С		Область применения
инвар	новый сплав	инвар	новый сплав	
30НКД	40Si – 40 Cu– Al	$\alpha_{20-100} = 4,6$	$\alpha_{20-100} = 4,5$	соединение с керамикой, низкотемпературными припоями, цементами, клеями
29НК	Al – 30Si – 30 Cu	$\alpha_{20-100} = 6,3$	$\alpha_{20-100} = 6,1$	
47НХР	Al – 40Si – 20 Cu	$\alpha_{20-200} = 9,1$	$\alpha_{20-200} = 9,1$	вакуум-плотные соединения со стеклами

Особенности теплового расширения тройных сплавов представлены в виде трехмерной поверхности, построенной с помощью программы StatSoft Statistica 6.0 (рис. 3).

Полученные графики позволяют наиболее четко представить температурно-концентрационные области, при которых ТКЛР имеет низкие значения. С их помощью можно выявить взаимосвязь между величиной ТКЛР изучаемых сплавов и двумя переменными параметрами, такими как содержание меди и температура испытания.

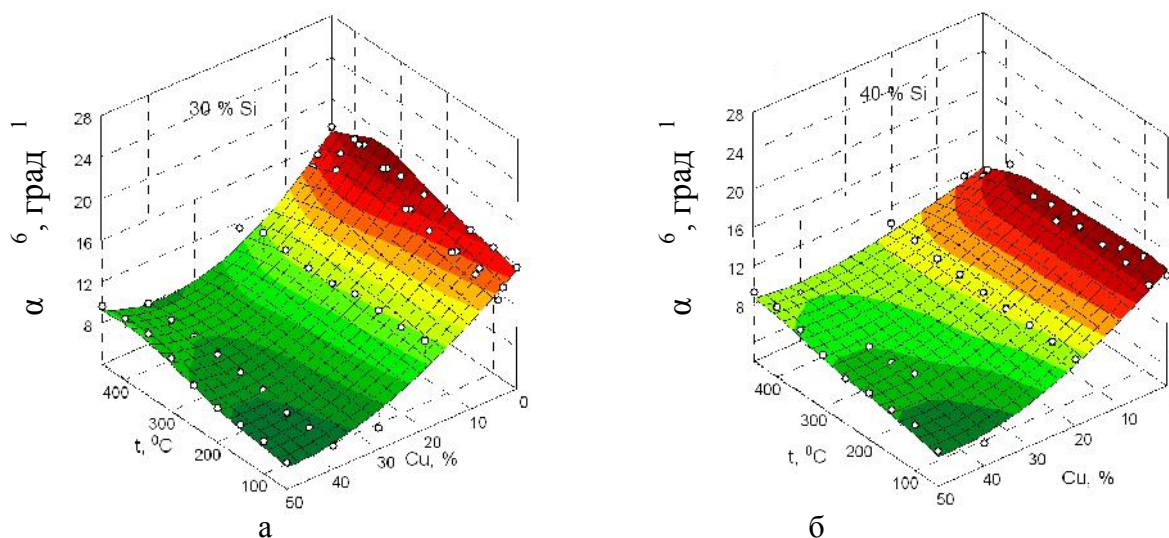


Рис. 3. Особенности теплового расширения тройных сплавов:
а – сплав на основе Al – 30% Si ; б – сплав на основе Al – 40% Si

Результаты дилатометрического анализа показали, что значения ТКЛР тройных сплавов, содержащих равное количество кремния и меди, близки к значениям ТКЛР промышленных инваров в интервале температур 20 – 200°C и имеют явное весовое преимущество перед ними. Таким образом, полученные легкие сплавы могут быть использованы как альтернатива тяжелым инварам.

Выводы

Металлографические исследования показали, что структура высоколегированных сплавов характеризуется крупными пластинчатыми кристаллами кремнистой фазы, между которыми располагается тройная эвтектика ($\alpha + \text{Si} + \text{CuAl}_2$). Выявлено, что при увеличении содержания меди уменьшается объемная доля эвтектики. Результаты рентгеноспектрального микроанализа позволяют утверждать, что между кристаллами кремнистой фазы имеются участки эвтектики с повышенным содержанием меди, которые соответствуют местам расположения частиц фазы CuAl_2 .

Получены новые легкие сплавы с низким ТКЛР, которые могут быть использованы как альтернатива инварам (30НКД, 29НК, 47НХР) в интервале температур эксплуатации 20 – 200°C.

Список литературы

1. Ларионов Л.Н., Юрченко Ю.Ф. Тепловые свойства металлов и сплавов: справочник. – Киев: Наукова думка, 1985. – 440 с.
2. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов: справочник. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1959. – 356 с.
3. Инвары: учеб. пособие / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, С.А. Ладышев [и др.]. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – 126 с.

4. Гопиенко В.Г., Смагоринский М.Е., Григорьев А.А. Спеченные материалы из алюминиевых порошков. – М.: Металлургия, 1993. – 320 с.
5. 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.
6. О влиянии кремния на тепловое расширение алюминия А7 / В.К. Афанасьев, А.В. Горшенин, М.В. Попова, А.Н. Прудников, М.А. Старостина (Малюх) // Металлургия машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 23–26.
7. Popova, M.V. Frolov V.F., Lyubushkina A.N. On linear expansion of alloyed aluminum alloys with silicon // Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy. – 2003. – № 2. – P. 38–40.
8. About anomaly of linear expansion of industrial silumins / V.K. Afanas'ev, A.A. Ruzhilo, A.N. Lyubushkina, M.V. Popova // Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy. – 2003. – № 10. – P. 16–17.
9. Features of thermal expansion of special-purpose aluminum alloys after treatment of melt and heat treatment / V.K. Afanasyev, M.V. Popova, M.A. Malyukh, A.N. Prudnikov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411. – Art. 012010 (7 p.).
10. Effect of melt treatment with water vapor on thermal expansion of alloy Al – 20–40% Si / V.K. Afanasyev, M.V. Popova, S.V. Dolgova, A.V. Gorshenin, M.A. Malyukh // Metallurgist. – 2019. – Vol. 63, № 1–2. – P. 87–95.
11. Hidnert P., Krider H.S. Thermal Expansion of Aluminum and Some Aluminum Alloys // Journal of Research of the National Bureau of Standards. – 1952. – Vol. 48, № 3. – P. 209–220.
12. Влияние меди на линейное расширение алюминиевых и кремниевых сплавов / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, Н.Б. Лаврова, Г.Г. Мажитова, М.В. Попова, В.А. Самонь // Металлургия машиностроения. – 2013. – № 4. – С. 16–19.
13. Тепловое расширение сплавов Al-Cu после обработки расплава и термообработки / В.К. Афанасьев, М.А. Малюх, М.В. Попова, В.А. Лейс, С.В. Долгова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 2 (71). – С. 87–94.
14. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of an Al-Si-Cu-Mg-Ni Aluminium Alloy after Thermal Exposure / X. Feng, P.L. Jian, Ch. G. Yong, Y. Zhong // Materials Science Forum. – 2013. – Vol. 765. – P. 486–490. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.765.486>.
15. Effects of Si, Cu and Mg on the High-Temperature Mechanical Properties of Al-Si-Cu-Mg Alloy / J. Zhengyi, L. Xianghua, J. Sihai, H. Jingtao // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 652–654. – P. 1030–1034. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.652-654.1030>.
16. Chen C.L., West G.D., Thomson R.C. Characterisation of Intermetallic Phases in Multicomponent Al-Si Casting Alloys for Engineering Applications // Materials Science Forum. – 2006. – Vol. 519–521. – P. 359–364. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.519-521.359>.
17. Morphology of intermetallic phases in Al-Si cast alloys and their fracture behaviour / L. Hurtalová, E. Tillová, M. Chalupová, J. Belan // Production Engineering Archives. – 2015. – Vol. 6/1. – P. 2–5. – DOI: [10.30657/pea.2015.06.01](https://doi.org/10.30657/pea.2015.06.01).

18. *Biswas P., Prasadu K. D., Mondal M. K.* Effect of Bi addition on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-17.6Si alloy // *Materials Research Express*. – Vol. 6. – 12 p. – DOI: 10.1088/2053-1591/ab4d34.

19. *Panušková M., Tillová E., Chalupová M.* Relation between mechanical properties and microstructure of cast aluminum alloy AlSi9Cu3 // *Strength of Materials*. – 2008. – Vol. 40. – P. 98–101. – DOI: 10.1007/s11223-008-0026-8.

20. Microstructural Development in a Ternary Al-Cu-Si Alloy during Transient Solidification / I.L. Ferreira, D.J. Moutinho, L.G. Gomes, O.L. Rocha, P.R. Goulart, A. Garcia // *Materials Science Forum*. – 2010. – Vol. 636–637. – P. 643–650. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.636-637.643>.

21. *Wei Y.Yu., Wen J. L., Nai R. L.* Microstructures and Properties of Al-Cu-Si Brazing Foils by Melt-Spun Processing // *Advanced Materials Research*. – 2012. – Vol. 583. – P. 268–271. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.583.268>.

22. Intermetallic compounds in the Al-Si-Cu system / C.T. Rios, R. Caram, C. Bolfarini, W.J. Botta // *Acta Microscopia*. – 2003. – Vol. 12. – P. 77–82.

23. *Xue W. Z., Wang R.C., Peng J.* Expansion Behavior and Microstructures of Hypereutectic Al-Si Alloys Subjected to Thermal Cycling // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 937. – P. 145–149. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.937.145>.

24. Effects of rare earth Er addition on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al–20% Si alloy / Q. Li, T. Xia, Y. Lan, P. Li, L. Fana // *Materials Science and Engineering: A*. – 2013. – Vol. 588. – P. 97–102.

25. Knipling K.E. Dunand D.C., Seidman D.N. Criteria for developing castable, creep-resistant aluminum-based alloys-A review // *International Journal of Materials Research*. – 2006. – Vol. 97 (3). – P. 246–265.

26. *Huang Y.Y., Hu Z.L., Wang J.J.* Research Progress on the Aluminum Alloy with High Thermal Conductivity // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 574. – P. 396–400. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.574.396>.

27. *Kang S.B., Kim D.B., Cho J.H.* Effect of Copper Variation and Thermomechanical Treatment on Microstructure and Properties in Aluminum Alloy Fin Stock for Heat Exchanger // *Materials Science Forum*. – 2012. – Vol. 706–709. – P. 311–316. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.706-709.311>.

**STRUCTURE AND THERMAL EXPANSION OF HIGH-ALLOY ALLOYS
OF THE Al-Si-Cu SYSTEM FOR SPECIAL PURPOSES**

Popova M.V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: m.popova@rdtc.ru

Malyuh M.A., Senior methodologist, e-mail: starostina_ma1976@mail.ru

Siberian state industrial university, 42 Kirov str., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Abstract

The influence of copper on the microstructure and temperature coefficient of linear expansion (TCLE) of Al-30÷40% Si-Cu alloys was studied. The results of dilatometric studies have shown that the introduction of alloying elements in equal quantities leads to a decrease in the thermal expansion of the Al-30%Si-30%Cu alloy to values of $6,0\div 7,0\cdot 10^{-6} \text{ deg}^{-1}$. Increasing the copper content to 40% not only does not lead to a further decrease in the TCLE values, but its increase is observed in the high-temperature test range. It was found that an alloy with an equal content of alloying elements Al-40%Si-40%Cu has the lowest TCLE values in the entire test interval ($\alpha_{50-150} = 4,5\cdot 10^{-6} \text{ deg}^{-1}$) than triple alloys with the same total content of alloying elements, but with a different ratio.

Metallographic analysis has shown that the introduction of copper into alloys with a non-eutectic composition of Al-30%Si-Cu, in which microstructure, in addition to eutectic, initially contains particles of the siliceous phase, contributes to an increase in the size of these particles. The structure of Al-40%Si-Cu alloys is characterized by large plate crystals of the siliceous phase. Moreover, with an increase in the copper content to 50%, the volume fraction of eutectic decreases. It is shown that the limit of solubility of silicon in aluminum decreases with high copper content.

Keywords

aluminum, silicon, copper, alloying, structure, temperature coefficient of linear expansion.

УДК 669.13:621.753.5

**О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕЛОГО НЕЛЕГИРОВАННОГО ЧУГУНА
В КАЧЕСТВЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА**

В.К. АФАНАСЬЕВ¹, академик РАЕН, доктор техн. наук, профессор
М.В. ПОПОВА¹, доктор техн. наук, профессор
С.В. ДОЛГОВА¹, мл. научн. сотр.
И.А. ЖИБИНОВА², канд. техн. наук, доцент
А.П. ЧЕРНЫШ³, канд. техн. наук, доцент
(¹ СибГИУ, г. Новокузнецк,
² НФИ КемГУ, г. Новокузнецк,
³ НИИ-филиал СФНЦА РАН, г. Кемерово)

Попова М.В. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: m.popova@rdtc.ru

Представлены результаты исследований структуры и свойств нелегированного чугуна без выделений графита. Путем термоциклической обработки расплава доменного передельного чугуна возможно подавить процесс графитизации в нем и получить белый нелегированный чугун с ледебуритной структурой. Показано, что разработанный белый нелегированный чугун в литом состоянии отличается не только высокой твердостью 450–500 НВ (50 HRC), но и прочностью ($\sigma_b = 450\text{--}500$ МПа). Проведены экспериментальные исследования по влиянию различных режимов термической и термоциклической обработки в интервале 80–1200°C на твердость белого нелегированного чугуна. Изучено влияние различных закалочных сред и времени нагрева под закалку. Показано, что после закалки с 900 °С в кипящую воду резцы из этого чугуна имеют твердость 65–67 HRC, что позволяет обрабатывать древесину, древесностружечные композиции, низкоуглеродистые стали.

Ключевые слова: белый нелегированный чугун, инструмент, микроструктура, твердость, графит, ледебурит, термическая обработка.

Введение

Постоянно возрастающий уровень жизнедеятельности человека предусматривает необходимость создания инструментальных материалов все более высокой производительности, которая обеспечивается повышением твердости, теплостойкости и износостойкости. Поэтому в мировой практике постоянно совершенствуются составы инструментальных материалов, в первую очередь, для режущего инструмента, но чаще всего с увеличением их стоимости [1, 2].

Первоочередной задачей в области разработки новых материалов является создание новых сплавов через вырабатывание ресурса известных. Прежде всего, это касается наиболее дешевого, но с низкими механическими свойствами доменного чугуна. Для улучшения свойств доменного чугуна самым распространенным способом является его легирование большим количеством дорогостоящих элементов (до 30–50 %). Для повышения твердости, износостойкости и теплостойкости чугуна необходимы ванадий и хром, препятствующие

графитизации чугуна. Они способствуют образованию ванадиево-карбидных каркасов эвтектических колоний и высоколегированной металлической матрицы [3–5].

Исследования последних лет показывают, что перспективными материалами для изготовления деревообрабатывающих инструментов являются инструментальные сплавы на основе белых чугунов [6, 7]. Разработаны твердые сплавы на основе высокоуглеродистых комплексно-легированных белых чугунов, которые могут быть использованы в качестве сравнительно дешевого заменителя дорогостоящих вольфрамсодержащих твердых сплавов типа ВК. В этих новых сплавах применяется сочетание больших количеств хрома, а также ванадия и марганца. Сильман Г.И. с соавторами отмечают [6], что при рациональном составе может быть достигнута высокая твердость изделий (67-70 HRC), что соответствует твердости сплавов ВК15 – ВК20. Более того, для изготовления дереворежущего инструмента возможно применение хромованадиевого белого чугуна не только в литом состоянии, но после горячей деформации [7]. Инструмент из высокопрочного чугуна с отбеленной поверхностью можно использовать также и для почвообработки [8].

В настоящей работе в качестве основы был принят белый нелегированный доменный чугун (БНЧ). Он вообще не содержит дорогостоящих легирующих элементов (W, V, Cr, Ni), однако в нем полностью отсутствуют выделения графита и твердость его в литом состоянии довольно высокая – 50-53 HRC. Разработанные профессором Афанасьевым В.К. с соавторами способы получения чугуна без выделений графита за счет модифицирования серого чугуна или его высокотемпературного термоциклирования, подробно описаны в монографиях [9–11], получены патенты РФ на способы обработки чугуна расплава [12–14].

Цель работы – обосновать возможность и целесообразность использования разработанного белого нелегированного чугуна для изготовления режущих элементов деревообрабатывающего инструмента.

Методика экспериментального исследования

Белый нелегированный чугун был получен путем высокотемпературной термоциклической обработки (ТЦО) доменного передельного чугуна производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Термоциклическую обработку проводили в индукционных печах Кузнецкого машиностроительного завода. После переплава чугун имел следующий химический состав, масс. %: углерод 3,7; кремний 1,65; марганец 0,44; фосфор 0,085; сера 0,075. В отличие от обычного переплава, чугун после ТЦО имеет ледебуритную или перлитно-ледебуритную структуру, без выделений графита. Методом литья по выплавляемым моделям из него были получены токарные резцы, из которых вырезали образцы для исследований структуры и свойств. Термическую обработку проводили в электропечах сопротивления типа СНОЛ.

Изучение микроструктуры БНЧ осуществляли с помощью оптического микроскопа ОРТОН при увеличениях $\times 100$ и 200 . Механические свойства образцов определяли по стандартным методикам [15]. Статистическую обработку результатов механических испытаний проводили по известным методикам [16, 17] проверки статистических гипотез и

вычисления выборочных числовых характеристик при малом объеме выборки ($n < 50$) в режиме «Описательная статистика» Microsoft Excel. После закалки резцы проверяли на наличие трещин на магнитном дефектоскопе.

Результаты и обсуждение

Разработанный БНЧ отличается не только высокой твердостью (450–500 НВ), но и прочностью ($\sigma_B = 450\text{--}500$ МПа). В отличие от износостойких высоколегированных чугунов известных марок эти свойства могут быть обеспечены непосредственно в литом состоянии (табл. 1). Сравнение свойств высоколегированных чугунов и БНЧ показывает полное преимущество последнего.

Таблица 1

Механические свойства легированных чугунов (ГОСТ 7769-82)
и белого нелегированного чугуна

Марка чугуна	Временное сопротивление σ_B , МПа, не менее	Относительное удлинение δ , %	Твердость НВ
ЧХ16	350	-	400-450
ЧХ16М2	170	-	490-610
ЧХ22	290	-	330-610
ЧХ28Д2	390	-	390-640
ЧХ32	290	-	245-340
ЧЮ22Ш	290	-	241-364
ЧН4Х2	200	-	400-650
ЧН15Д3Ш	340	4	120-255
ЧН19Х3Ш	340	4	120-255
БНЧ	490	-	450-500

Примечание. Прочность и твердость высокохромистых и никелевых чугунов указана после нормализации и низкотемпературного отпуска, а прочность и твердость БНЧ – в литом состоянии.

Для повышения свойств высоколегированные белые чугуны закалывают от температуры 900–1100°C в масле для получения высоколегированного аустенита. Затем проводят отпуск при температуре 500–520°C. При отпуске происходит мартенситное превращение и выделение из матрицы высокодисперсных частиц карбидов, что обеспечивает эффект вторичного упрочнения. В результате достигаются высокая твердость (63–68 HRC), теплостойкость и износостойкость [18, 19]. Однако обычные нелегированные чугуны не

восприимчивы к упрочняющей термической обработке. В отличие от них, прочность и твердость БНЧ можно повысить путем закалки или ТЦО.

На рис. 1 показано изменение прочностных свойств БНЧ после нагрева в интервале 80–1000 °С с последующим резким охлаждением. Здесь хорошо видно, что значения предела прочности и предела текучести сохраняются до 500 °С, а нагрев выше 700 °С приводит к резкому разупрочнению БНЧ в связи с развитием процессов графитизации. Для сравнения следует заметить, что графитизация алмаза – самого твердого природного инструментального материала – также начинается при 700 °С.

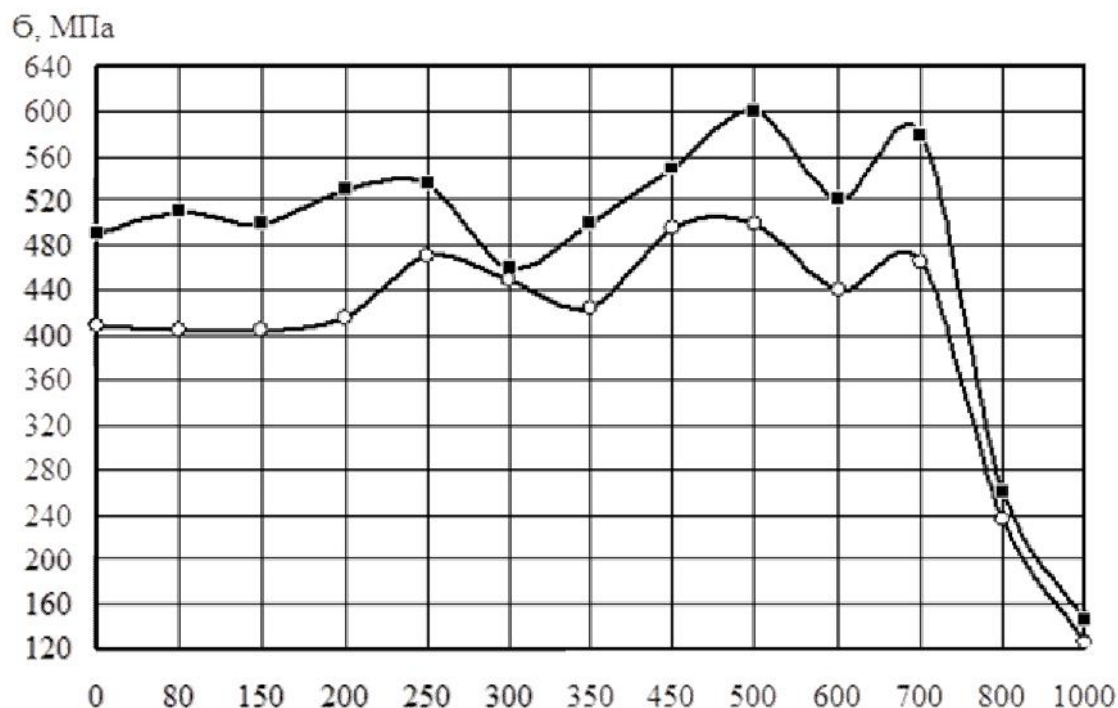


Рис. 1. Влияние температуры нагрева на механические свойства белого нелегированного чугуна ($\tau = 5$ ч, охлаждение в воде): \circ - $\sigma_{0,2}$; \blacksquare - σ_B , МПа

К достоинствам БНЧ относится также возможность повышения твердости после термической обработки. Так, например, в табл. 2 показана твердость закаленных токарных резцов из БНЧ, полученных методом литья по выплавляемым моделям. Видно, что высокие значения твердости, равные 65–67 HRC, могут быть получены после закалки с 900 °С в кипящую воду после выдержки 1–5 ч.

Таблица 2

Влияние времени нагрева при 900 °С на твердость закаленных токарных резцов из БНЧ (охлаждение в кипящую воду)

Время нагрева, ч	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Твердость, HRC	50-52	61-63	64-66	65-67	66-67	66-67	65-66	66-67	64-66	64-66	67-68

Для практики термической обработки важно решение вопроса о применении охлаждающей среды при закалке. Чугун с ледебуритной структурой, как и быстрорежущая сталь, имеет низкую теплопроводность. Естественно, что при охлаждении БНЧ с высоких температур возможно образование закалочных трещин.

В табл. 3 приведены результаты исследования твердости и склонности к трещинообразованию токарных резцов после закалки с 900 °С ($\tau=1$ ч) в различных средах. Установлено, что резцы из БНЧ даже при охлаждении на воздухе твердеют. Твердость после закалки на воздухе увеличивается с 50 HRC до 54–55 HRC. Почти такую же твердость быстрорежущая сталь имеет после нагрева в соляной ванне и охлаждении через воду в масло. Охлаждение в холодной воде с 900°С при той же выдержке 1 ч повышает твердость до 60–69 HRC, но появляются закалочные трещины. Установлено, что резцы из БНЧ приобретают высокую твердость (64–66 HRC) при охлаждении с 900 °С в подогретое трансформаторное масло, причем без образования закалочных трещин (табл. 3). Закалка в кипящий 1,5 %-ный водный раствор CH_3COOH также дает высокую твердость без образования трещин. Таким образом, во избежание образования закалочных трещин необходимо проводить закалку БНЧ в горячую воду или в подогретое масло.

Таблица 3

Влияние закалочной среды на твердость токарных резцов из доменного чугуна без выделений графита ($T_{\text{зак}} = 900$ °С, $\tau = 1$ ч)

Среда охлаждения	Твердость HRC	Наличие трещин
Литой, без т/о	50	–
Воздух	54–55	нет
Холодная вода	66–69	есть
Кипящая вода	64–66	нет
Кипящий 1,5 %-ный водный раствор CH_3COOH	64–66	нет
Трансформаторное масло (80-100 °С)	64–66	нет

Повышение температуры термической обработки показало, что нагрев при 1000 °С даже в виде термоциклической обработки с короткой выдержкой 20 мин стабильно снижает твердость закаленных резцов до 61–63 HRC вместо получаемых при закалке с 900 °С 64–66 HRC. Основной опасностью нагревов под закалку выше 900 °С является разложение цементита с соответствующим образованием графита. На рис. 2 хорошо видно, что циклирование с нагревом до 1000 °С в наибольшей мере увеличивает объемную долю сильно травящихся темных участков, в результате уменьшается объемная доля цементита и снижается твердость БНЧ.

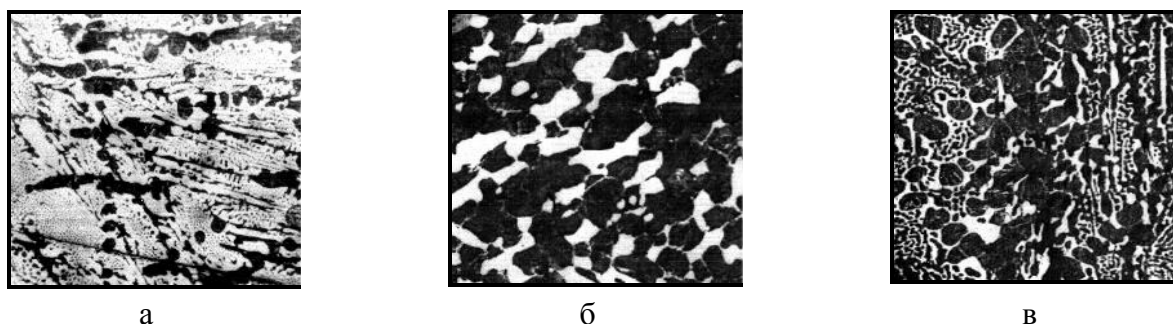


Рис. 2. Микроструктура белого нелегированного чугуна без (а) и после термообработки (б, в), $\times 300$: б – 900°C , 20 мин, кипящая вода – 15 циклов; в – 1000°C , 20 мин, масло (90°C), 15 циклов

При изучении влияния малоцикловой высокотемпературной термоциклической обработки на свойства резцов из БНЧ (1 цикл – 1200°C , 1 ч, охлаждение на воздухе) было установлено, что микротвердость цементита увеличивается уже после двух циклов ТЦО, а затем стабилизируется (рис. 3).

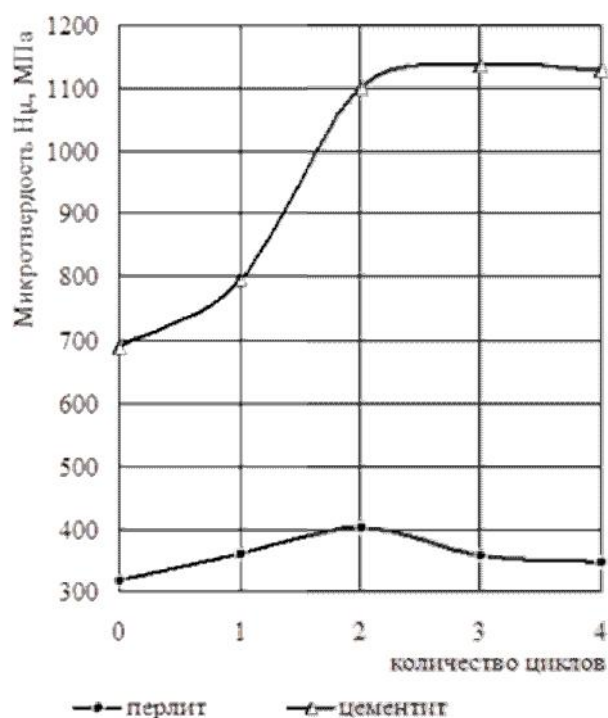


Рис. 3. Влияние термоциклической обработки (1 цикл – 1200°C , 1 ч, охлаждение на воздухе) на микротвердость структурных составляющих БНЧ

Полученные данные подтверждают возможность значительного повышения свойств БНЧ после термической обработки и необходимость более глубокого изучения влияния режимов термической обработки литого инструмента из чугуна на его структуру и механические свойства.

Результаты работы позволяют утверждать, что белый нелегированный чугун может успешно пополнить группу выдающихся инструментальных материалов. Экономическая

эффективность применения инструмента из БНЧ взамен инструмента из быстрорежущих сталей или твердых сплавов определяется резким различием в их стоимости.

Выводы

Инструмент из белого нелегированного чугуна, получаемый путем переработки доменного чугуна в расплавленном состоянии, без введения дорогостоящих легирующих элементов, может приобретать довольно высокую твердость 65 – 67 HRC в закаленном состоянии. Во избежание образования закалочных трещин необходимо проводить закалку БНЧ в горячую воду или в подогретое масло.

Результаты работы показывают целесообразность получения режущего инструмента из такого доступного и дешевого материала, как БНЧ, имеющего после термической обработки высокую твердость и хорошие режущие свойства – не ниже, чем у инструмента из углеродистых сталей. Такой инструмент может быть использован для обработки дерева, древесностружечных материалов и низкоуглеродистых сталей.

Список литературы

1. Machining of Hard Materials: Provides a discussion of recent advancements in hard machining / edit. D.J. Paulo – London: Springer-Verlag London Limited, 2011. – 211 p.
2. *Зубков Н.Н.* Инструментальные материалы для изготовления лезвийных инструментов // Наука и образование. – 2013. – № 5. – С. 75–100. – DOI: 10.7463/0513.0569432.
3. *Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V.* Structure features and properties of high-alloy white irons // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. – 2013. – № 5. – P. 3–8.
4. *Печенкина Л.С., Сильман Г.И., Рукавицына А.А.* Влияние хрома и ванадия на структуру малоуглеродистых белых чугунов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11, № 6. – С. 13–17.
5. *Полухин М.С., Камынин В.В.* Влияние структурных факторов на триботехнические свойства антифрикционных чугунов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 11–2. – С. 43–47.
6. *Сильман Г.И., Дмитриева Н.В., Грядунов С.С.* Свойства литых твердых сплавов и их применение в деревообработке // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2006. – № 2. – С. 66–69.
7. *Алифанов А.В.* Применение горячедеформированного хромованадиевого белого чугуна для получения дереворежущего инструмента // Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (67). – С. 157–161.
8. Формирование износостойких зонально-распределенных структур деталей орудий для почвообработки из высокопрочного чугуна / В.А. Моторин, Д.С. Гапич, Л.В. Костылева, А.Е. Новиков, А.Г. Жутов // Известия нижевожского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2018. – № 4 (52). – С. 369–376.
9. Доменный чугун – металл будущего / В.К. Афанасьев, С.А. Гладышев, М.В. Попова [и др.]. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2005. – 343 с.

10. Металлография чугуна / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, М.В. Попова, М.М. Сагалакова, А.О. Токарев и др.; науч. ред. В.К. Афанасьева. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 482 с.
11. Быстрорежущая сталь и инструментальный чугун / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, М.В. Попова, С.В. Магазов, А.В. Кольба, А.П. Черныш; науч. ред. В.К. Афанасьева. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 630 с.
12. Пат. RU 2130081, МКИ C21C1/00. Способ обработки чугуна / В.К. Афанасьев, М.В. Чибряков, М.М. Сагалакова, А.Н. Прудников, М.В. Попова ; патентообладатель Сибирский государственный индустриальный университет. – № 98111318/02 ; заявл. 08.06.98 ; опубл. 10.05.99.– Бюл. № 13.
13. Патент RU 2370548, МПК C21D5/02. Способ термоциклической обработки чугуна / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, А.Л. Майтаков [и др.] ; патентообладатель Сибирский государственный индустриальный университет. – № 2008129969/02 ; заявл. 21.07.2008 ; опубл. 20.10.2009.
14. Патент RU 2367688, МПК C21C1/08. Способ модифицирования серого чугуна / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, А.Л. Майтаков [и др.] ; патентообладатель Сибирский государственный индустриальный университет. – № 2008129970/02 ; заявл. 21.07.2008 ; опубл. 20.09.2009.
15. *Золотаревский В.С.* Механические свойства металлов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: МИСИС, 1998. – 400 с.
16. *Степнов М.Н., Шаврин А.В.* Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 399 с.
17. *Everitt B.S., Dunn G.* Applied multivariate data analysis. – London: Arnold ; New York: Oxford University Press, 2001. – 342 p.
18. *Chien L.Y., Fu J.C., Yung N.P.* Research on the Wear Resistance of High-Chromium White Cast Iron and Multi-Component White Cast Iron // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Vol. 859. – P. 64–69. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.859.64>
19. *Koryagin Yu.D., Il'ichev V.L.* Estimation of the Heat Stability of Hardened Cr-V Cast Irons // *Materials Science Forum*. – 2016. – Vol. 870. – P. 558–563. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.870.558>.

**POSSIBILITY OF USING WHITE UNALLOYED CAST IRON
AS INSTRUMENTAL MATERIAL**

Afanasyev V.K.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: in_afanaseva@mail.ru

Popova M.V.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: m.popova@rdtc.ru

Dolgoва S.V.¹, Junior Researcher, e-mail: sv_dolgov@mail.ru

Zhibinova I.A.², Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: irina.zhibinova@mail.ru

Chernysh A.P.³, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: tmrm@mail.ru

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

² Kemerovo State University, Novokuznetsk Branch, 23 Tsiolkovsky st., Novokuznetsk, 654041, Russian Federation

³ Kemerovo Research Institute of Agriculture, Branch of Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the RAS, 47 Tsentral'naya st., Novostroika village, 650510, Russian Federation

Abstract

This article presents the results of studies of the structure and properties of the new instrumental material - unalloyed cast iron without graphite release. In order to obtain such cast iron, the liquid blast furnace cast iron was thermocyclically treated. By means of thermocyclic treatment it is possible to suppress the graphitization process and obtain white cast iron with the structure of ledeburite. It is shown that the developed not alloyed white cast iron in a cast state has high hardness 450-500 HB (50 HRC) and strength $\sigma_B = 450-500$ MPa. Studies were carried out on influence of different modes of thermal and thermocyclic treatment in the range of 80-1200 ° C on hardness of cast iron without graphite release. It has been found that the strength and hardness of unalloyed white cast iron can be increased after heat treatment. Influence of various quenching media and heating time for quenching is studied. It is shown that after quenching from 900 ° C in boiling water cutters from white unalloyed cast iron have hardness 65-67 HRC, which allows to treat wood, particle boards, low-carbon steels.

Keywords

White unalloyed cast iron, cutting instrument, microstructure, hardness, graphite, ledeburite, thermal treatment.

УДК 621.793.71

ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВ КАРБИДА БОРА*

*А.А. БИНЦЕВА¹, магистрант
Е.Е. КОРНИЕНКО¹, канд. техн. наук, доцент
В.И. КУЗЬМИН², канд. техн. наук, доцент
(¹ НГТУ, г. Новосибирск,
² ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск)*

Бинцева А.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: sashazhoidik@gmail.ru

В статье рассматриваются структурные особенности покрытий, полученных из порошков карбида бора (B_4C) при помощи технологии воздушно-плазменного напыления с кольцевым вводом порошка. На пластинах из стали 20 формировали покрытия из порошка B_4C , плакированного 30 % масс. Ni, и чистого B_4C . Использовали две конфигурации плазматрона, отличающиеся, кроме прочего, диаметром выходного канала и температурой плазмы. Результаты структурных исследований композиционных покрытий, проведенных с использованием оптической и растровой электронной микроскопии, показали, что покрытия являются многофазными и характеризуются наличием частиц B_4C , распределенных в матрице, содержащей бориды никеля (Ni_3B , NiB и Ni_3B_4). Микротвердость частиц карбида бора в таких покрытиях составляет 30...40 ГПа, матрицы – 4,0...5,5 ГПа. В то же время плазменное напыление порошка чистого карбида бора с использованием конфигурации плазматрона «Керамика» позволило получить высококачественные покрытия, микротвердость которых достигла 40...45 ГПа.

Ключевые слова: плазменное напыление, покрытие, карбид бора, B_4C , B_4C -Ni-P.

Введение

Карбид бора (B_4C) является вторым по твердости синтетическим материалом: по этому свойству он уступает только кубическому нитриду бора, но, в отличие от последнего, карбид легче и дешевле производить, поэтому он используется более широко. Карбид бора идеален в качестве абразива для обработки твердых материалов. Благодаря высокой износостойкости этот материал используется для изготовления сопел пескоструйных аппаратов, фильер, матриц и т.д. Кроме того, защитные покрытия из карбида бора, обладающего высокой температурой плавления и низкой способностью захвата водорода, можно наносить на контактирующие с плазмой компоненты термоядерных установок для защиты их от эрозии [1, 2].

В ряде работ покрытия из карбида бора были сформированы при помощи разных технологий [3-12]. Среди этих методов следует выделить плазменное напыление, отличающееся универсальностью и высокой производительностью. Однако, при напылении порошка карбида бора возникают трудности, связанные со свойствами напыляемого материала: B_4C обладает низкой теплопроводностью, поэтому частицы не успевают прогреться в потоке плазмы. Помимо этого, порошок B_4C пластически не деформируется при соударении с поверхностью подложки или поверхностью уже затвердевшего покрытия из-за низкой пластичности напыляемого

* Работа выполнена при финансовой поддержке Студенческого гранта НГТУ. Исследования выполнены на оборудовании ЦКП ССМ НГТУ.

материала. Решением обозначенной проблемы может являться формирование композиционных покрытий, в которых частицы карбида бора распределены в матрице из материала, пластичность и теплопроводность которого выше, чем у B_4C [3, 4]. Кроме того, ранее авторами работы было показано, что технология воздушно-плазменного напыления с кольцевым вводом порошка обеспечивает более эффективный нагрев и ускорение частиц по сравнению с точечным вводом, что способствует значительному повышению качества керамических и металлических покрытий [13-15]. Таким образом, целью данной работы являлось сравнение структуры и свойств композиционных покрытий $Ni-B_4C$ и покрытий из «чистого» карбида бора, полученных при помощи технологии воздушно-плазменного напыления с кольцевым вводом порошка.

Методика экспериментального исследования

Нанесение покрытий осуществляли в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН на установке плазменного напыления порошковых покрытий «Термоплазма 50-01». Установка создана на базе электродугового плазматрона «ПНК-50», оснащенного узлом кольцевого ввода порошка с газодинамической фокусировкой. В работе были использованы две конфигурации плазматрона: «Керамика» и «Металл». Конфигурация «Керамика» обеспечивает более низкую скорость и высокую температуру плазмы и предназначена для напыления тугоплавких материалов. Конфигурация «Металл» обеспечивает более высокую скорость потока и предназначена для напыления металлических покрытий. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа использовали воздух. Смесь воздуха и пропан-бутана подавали на завесу анода плазматрона для защиты анода от эрозии.

В качестве материалов для формирования покрытий использовали коммерческие порошки чистого и плакированного 30 мас. % Ni карбида бора ($B_4C-30Ni$). Размеры частиц порошка $B_4C-30Ni$ находились в диапазоне 40...100 мкм. Размер частиц порошка чистого карбида бора составлял 20 мкм (B_4C-20) и 40 мкм (B_4C-40). Порошки напыляли на пластины из стали 20. Перед напылением поверхность пластин подвергали пескоструйной обработке. Режимы плазменного напыления представлены в таблице 1.

Таблица 1

Режимы плазменного напыления покрытий

Порошок	Конфигурация плазматрона	Выходной диаметр сопла, мм	Ток/напряжение дуги, А/В	Дистанция напыления, мм
$B_4C-30Ni$	«Металл»	8	180/265	170
B_4C-20	«Керамика»	8	200/220	100
B_4C-40	«Керамика»	10	200/228	140

Для проведения металлографических исследований использовали оптический микроскоп Axio Observer A1m (Carl Zeiss) и растровый электронный микроскоп EVO50 XVP (Carl Zeiss), оснащенный микроанализатором EDS X-Act. Микротвердость структурных составляющих покрытий оценивали на твердомере 402MVD (Wolpert Group) при нагрузке 25 г. Объектами исследования служили образцы, вырезанные из пластин с покрытиями в перпендикулярном направлении. Микрошлифы подготавливали по стандартной методике: шлифование на шкурках и полирование с использованием суспензии, содержащей частицы оксида алюминия. Травление поверхности покрытий $B_4C-30Ni$ осуществляли раствором 10 мл HCl , 0,1 мл HNO_3 и 10 г $FeCl_3$.

Результаты и обсуждение

На рис. 1, а представлено изображение покрытий $B_4C-30Ni$. Их толщина составляет

около 1200 мкм. На изображениях микроструктуры (рис. 1, б-г), полученных с помощью оптического и растрового электронного микроскопа, видно, что покрытия состоят из темно-серых частиц неправильной формы, равномерно распределенных в светлой матрице. После травления вокруг темно-серых частиц обнаруживается глобулярная эвтектика (рис. 1, в, г). Размеры глобулей составляют ~500 нм.

Согласно результатам микрорентгеноспектрального анализа (таблица 2, участок 1) темно-серые частицы по химическому составу соответствуют карбиду бора, а матрица состоит из боридов никеля различной стехиометрии: Ni_3B , NiB и Ni_3B_4 (таблица 2, участки 2-4). Участки эвтектики содержат (таблица 2, участок 5) Ni , B и P . Таким образом, можно сделать вывод, что в процессе плазменного напыления частицы B_4C не расплавляются полностью. Однако B_4C частично разлагается по реакции $B_4C \rightarrow 4B(тв) + C(тв)$, и B вступает в реакцию с Ni , образуя бориды никеля.

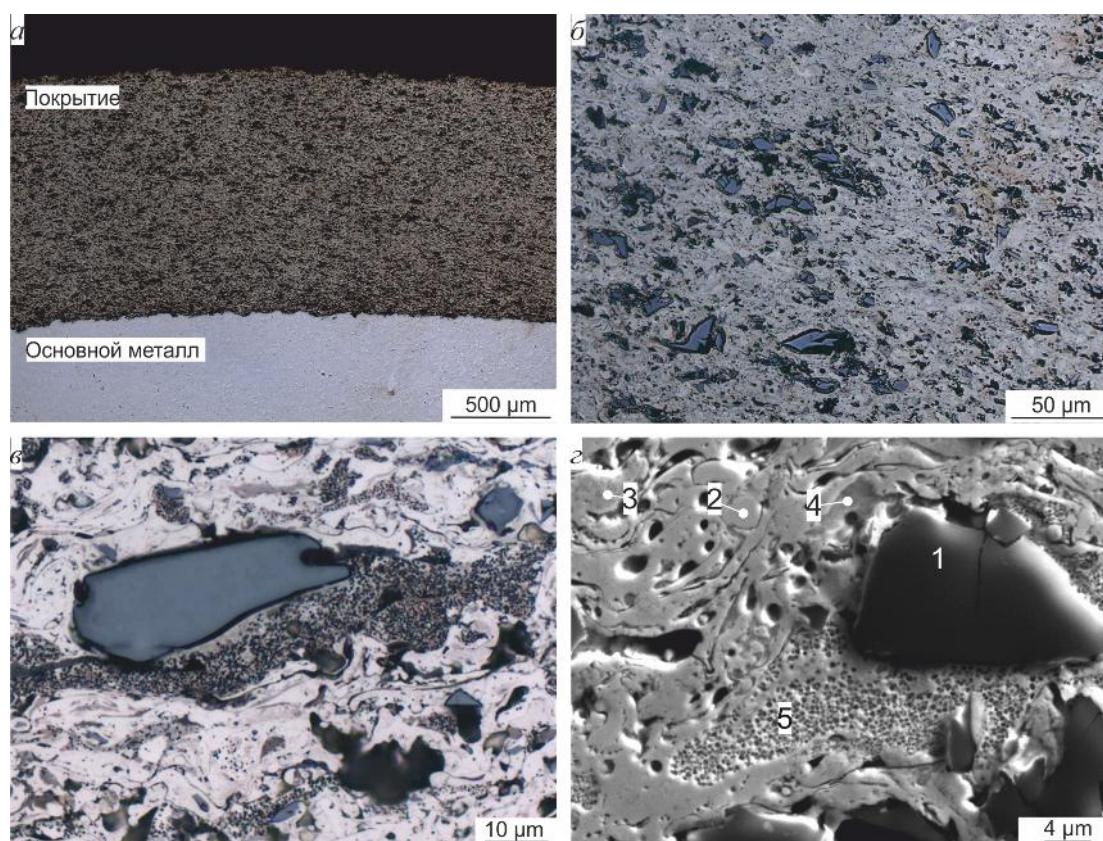


Рис. 1. Общий вид покрытия B_4C -30Ni (а); микроструктура материала покрытия до травления (б); микроструктура материала покрытия после травления (в, г); а-в оптическая микроскопия; г – растровая электронная микроскопия в обратно отраженных электронах: 1 – частица B_4C ; 2–4 – бориды никеля; 5 – эвтектика

Таблица 2

Результаты микрорентгеноспектрального анализа покрытия B_4C -30Ni

Номер участка	Химический элемент, ат. %				
	Ni	B	C	O	P
1	0,08	86,55	13,03	0,3	0,02
2	57,71	22,73	8,22	2,12	9,22
3	40,37	44,53	10,23	2	2,87
4	49,65	25,69	13,10	3,23	8,33
5	44,26	26,06	7,35	9,36	12,97

Результаты дюрометрического анализа показали, что микротвердость частиц B_4C составляет 30...40 ГПа, матрицы – 4,5...5 ГПа, эвтектических участков – 2...2,5 ГПа. Полученные значения микротвердости карбидных частиц оказались ниже приведенных в литературе, что связано с разложением и обеднением углеродом карбида бора в процессе плазменного напыления. В связи с этим, авторами было принято решение использовать другую конфигурацию плазматрона для нанесения покрытий из порошка карбида бора B_4C-20 и B_4C-40 для обеспечения оптимальных механических свойств покрытий.

Изображения микроструктуры покрытий B_4C-20 и B_4C-40 , полученные с помощью растровой электронной микроскопии, представлены на рис. 2. Толщина покрытий составляет 200...500 мкм. Покрытие B_4C-40 характеризуется высокой плотностью (рис. 2, б), тогда как в покрытиях B_4C-20 наблюдается несплошности и трещины (рис. 2, а), образовавшиеся, предположительно, из-за возникновения остаточных напряжений. Необходимо отметить, что эти покрытия были получены с использованием плазматрона с меньшим диаметром сопла, что обеспечило большую среднюю скорость частиц в струе плазмы. Микротвердость обоих покрытий составляет около 40...45 ГПа, что хорошо согласуется с литературными данными.

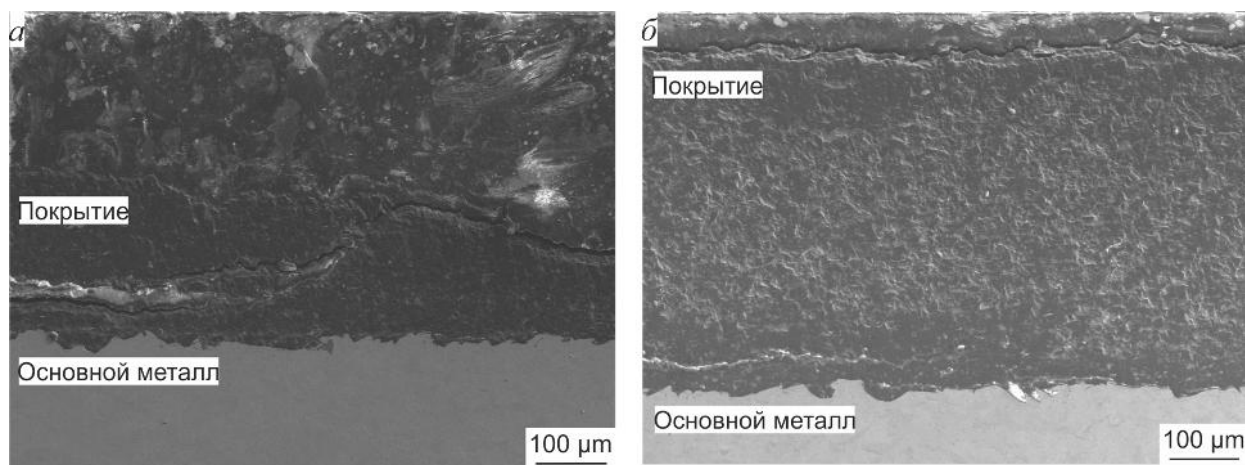


Рис. 2. Микроструктура покрытий: а – B_4C-20 ; б – B_4C-40

Выводы

1. Микроструктура композиционных покрытий, полученных из порошка карбида бора, плакированного 30 мас. % Ni, является многофазной и включает как частицы B_4C , так и Ni_3B , NiB и Ni_3B_4 .
2. Технология воздушно-плазменного напыления с кольцевым вводом порошка позволяет получать качественные покрытия из чистого карбида бора, микротвердость которых достигает 40...45 ГПа.
3. Для получения бездефектных покрытий из порошка размером 40 мкм оптимальным выходным диаметром сопла плазматрона конфигурации «Керамика» является диаметр 10 мм.

Список литературы

1. Беграмбеков Л.Б., Бужинский О.И. Свойства карбида бора и его использование в качестве защитных покрытий на первой стенке токамака // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2006. – № 4. – С. 14–20.
2. Установка для нанесения карбида бора и тестирования материалов и покрытий при интенсивном плазменном облучении / Э.А. Азизов, А.А. Айрапетов, Л.Б. Беграмбеков, О.И. Бужинский, С.В. Вергазов, А.В. Грунин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер.

Термоядерный синтез. – 2014. – Т. 37, № 4. – С. 30–38.

3. Microstructures and tribological properties of vacuum plasma sprayed B₄C-Ni composite coatings / H. Zhu, Y. Niu, C. Lin, L. Huang, H. Ji, X. Zheng // *Ceramics International*. – 2013. – Vol. 39, iss. 1. – P. 101–110. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2012.05.101.

4. Preparation and oxidation behavior of B₄C-Ni and B₄C-TiB₂-TiC-Ni composite coatings produced by an HVOF process / M. Rafiei, M. Salehi, M. Shamanian, A. Motallebzadeh // *Ceramics International*. – 2014. – Vol. 40, iss. 8, pt. B. – P. 13599–13609. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.05.081.

5. Microstructure, properties and thermal stability of W/B₄C multilayer coating synthesized by ion beam sputtering / B. Huang, W. Le, Y. Wang, X. Luo, Y. Yang // *Applied Surface Science*. – 2019. – Vol. 464. – P. 10–20. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.09.077.

6. Cold spray additive manufacturing: A viable strategy to fabricate thick B₄C/Al composite coatings for neutron shielding applications / N.H. Tariq, L. Gyansah, J.Q. Wang, X. Qiu, B. Feng, M.T. Siddique, T.Y. Xiong // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 339. – P. 224–236. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.02.007.

7. *Chen C., Feng X., Shen Y.* Synthesis of Al-B₄C composite coating on Ti-6Al-4V alloy substrate by mechanical alloying method // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 321. – P. 8–18. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.04.042.

8. *Ebrahimian-Hoaaeinabadi M., Azari-Dorcheh K., Moomir-Vaghefi S.M.* Wear behavior of electroless Ni-P-B₄C composite coatings // *Wear*. – 2006. – Vol. 260, iss. 1–2. – P. 123–127. – DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.020.

9. *Monir Vaghefi S.M., Saatchi A., Ebrahimian-Hoaaeinabadi M.* Deposition and properties of electroless Ni-P-B₄C composite coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – Vol. 168, iss. 2–3. – P. 259–262. – DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00926-X.

10. *Araghi A., Paydar M.H.* Electroless deposition of Ni-P-B₄C composite coating on AZ91D magnesium alloy and investigation on its wear and corrosion resistance // *Materials and Design*. – 2010. – Vol. 31, iss. 6. – P. 3095–3099. – DOI: 10.1016/j.matdes.2009.12.042.

11. Effect on residual stresses in plasma sprayed Al-Si/B₄C composite coatings subjected to thermal shock / O. Sarikaya, E. Celik, S.C. Okumus, S. Aslanlar, S. Anik // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 200, iss. 7. – P. 2497–2503. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.08.071.

12. Al-Si/B₄C composite coatings on Al-Si substrate by plasma spray technique / O. Sarikaya, S. Anik, S. Aslanlar, S.C. Okumus, E. Celik // *Materials and Design*. – 2007. – Vol. 28, iss. 9. – P. 2443–2449. – DOI: 10.1016/j.matdes.2006.09.007.

13. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials / V.I. Kuzmin, A.A. Mikhal'chenko, O.B. Kovalev, E.V. Kartaev, N.A. Rudenskaya // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2012. – Vol. 21, № 1. – P. 159–168. – DOI: 10.1007/s11666-011-9701-6.

14. Воздушно-плазменное напыление покрытий из самофлюсующихся порошковых материалов / Е.Е. Корниенко, Е.Ю. Лапушкина, В.И. Кузьмин, С.П. Ващенко, И.П. Гуляев [и др.] // *Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий*. – 2015. – Т. 1, № 6. – С. 229–237.

15. Повышение эффективности плазменного напыления порошковых покрытий / В.И. Кузьмин, Е.В. Картаев, С.П. Ващенко, Д.В. Сергачёв, Е.Е. Корниенко // *Вестник Югорского государственного университета*. – 2014. – № 2 (33). – С. 7–14.

AIR PLASMA SPRAYING OF BORON CARBIDE COATINGS

Binceva A.A.¹, Graduate student, e-mail: sashzhoidik@gmail.ru

Kornienko E.E.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

Kuzmin V.I.², Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: vikuzmin57@mail.ru

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Abstract

Boron carbide coatings were obtained by air-plasma spraying with annular injection of powder. Two different configurations of plasma torch were used for the application of the coatings. Commercially manufactured 70 wt% B₄C/30 wt% Ni (B₄C-30Ni) clad powder and «pure» boron carbide powders of 20 (B₄C-20) and 40 (B₄C-40) μm were used. B₄C-30Ni coatings were applied using «Metal» configuration of plasma torch, which provides lower plasma temperatures and is used for application of metals. Coatings from «pure» B₄C powder were sprayed using «Ceramics» configuration, which provides higher temperatures and lower plasma flow rates. Optical and scanning electron microscopy (SEM) as well as energy dispersive X-ray spectroscopy revealed that B₄C-30Ni coatings exhibit low porosity and consist of boron carbide particles surrounded by matrix of nickel borides. SEM of B₄C-20 revealed cracks inside the coating whereas B₄C-40 appeared solid. It was found that the B₄C-40 exhibit the highest Vickers hardness that is in the range of 40 to 45 GPa. Thus the possibility of formation of high quality ultra hard coatings out of boron carbide was shown. These findings have significant importance to the development of boron carbide coatings for high-performance applications.

Keywords

plasma spraying, annular injection, coating, boron carbide, B₄C, B₄C-Ni-P

УДК 669-15:621.793.6

**ИССЛЕДОВАНИЕ БОРОХРОМИРОВАННЫХ СЛОЕВ НА СТАЛИ 20,
ПОЛУЧЕННЫХ В УСЛОВИЯХ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО
И ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРЕВА***Е.С. АЛХИМОВА, аспирант**А.С. ВОЛКОВ, студент**Б.А. МАКСИМОВ, студент**И.Г. СИЗОВ, доктор тех. наук, профессор**И.П. ПОЛЯНСКИЙ, канд. техн. наук**(ВСГУТУ, г. Улан-Удэ)*

Сизов И.Г. – 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
e-mail: office@esstu.ru

В статье представлены результаты поверхностного насыщения стали 20 бором совместно с хромом из обмазок с использованием изотермического и термоциклического нагрева. Дан сравнительный анализ микроструктур в зависимости от способа обработки. Исследована микротвердость борохромированных слоев, а также влияние количества циклов нагрева на толщину диффузионного и содержание в нем химических элементов.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, борохромирование в обмазках, термоциклирование, двухкомпонентное насыщение, диффузия, микротвердость, микрорентгеноспектральный анализ.

Введение

Химико-термическая обработка широко используется для поверхностного упрочнения металлов и сплавов с целью повышения механических свойств (твердость, износостойкость, теплостойкость и т.д.) и повышения их стойкости в условиях воздействия на них агрессивных сред при различных температурах (стойкость против коррозии, кавитационная эрозия, кислотостойкость, жаростойкость и т.д.) [1, 2]. Такая обработка позволяет изменять химический состав поверхности, в результате чего формируются диффузионные слои отличающиеся структурой от насыщаемого металла и обладающими высокими механическими свойствами.

Одним из эффективных способов диффузионного насыщения сталей является борирование. Боридные слои обладают высокой твердостью (до 22000 МПа в случае образования в слое фазы FeB и до 16000 МПа – Fe₂B) и износостойкостью. Однако, при этом обладают высокой хрупкостью. Высокая хрупкость объясняется анизотропией теплового расширения боридных фаз (FeB и Fe₂B) [3]. Снижение хрупкости слоя может быть устранено за счет легирования боридного слоя различными элементами (C, Cu, Si, Ti, Cr, Al, N и др.), получением однофазного слоя (содержащего только фазу Fe₂B), либо формированием композиционной структуры.

При многокомпонентном насыщении диффузионные слои формируются с качественно новой структурой и обладают более широким спектром свойств. Такие слои получают одновременным или последовательным насыщением двумя или более химическими элементами.

В данной работе исследован процесс одновременного насыщения бором и хромом. Борохромирование проводят для повышения твердости, износо- и жаростойкости, реже для защиты от коррозионного воздействия [1, 4].

Методы и материалы исследования

Борохромирование проводили на образцах из стали 20 размерами 15×15×5 мм, на поверхность которых наносили обмазку состава 60% В₄С + 35 % Cr₂O₃ + 5 % NaF. Толщина обмазки составляла 4-6 мм [5]. Изотермическую и термоциклическую обработку проводили при 1000 °С. Общее время выдержки при 1000 °С составляло 4 ч. для каждого процесса.

Режимы термоциклического борохромирования представлены на рисунке 1 [6].

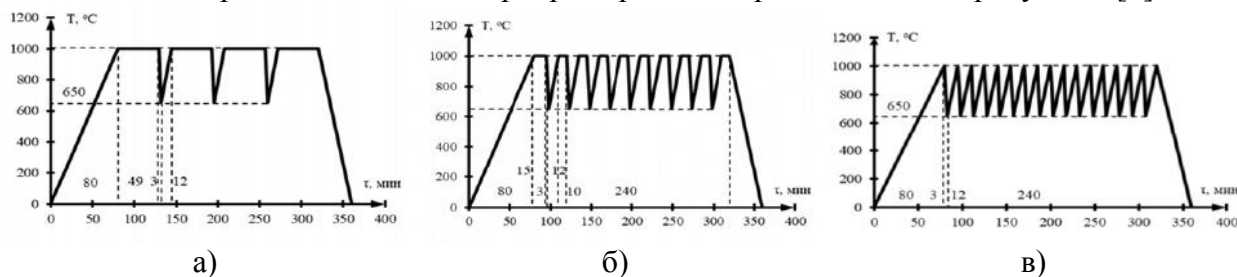


Рис. 1. Режимы термоциклического борохромирования: а) 4 цикла, б) 10 циклов, в) 16 циклов

Металлографический анализ проводили на металлографическом микроскопе Neophot-21. Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,1 кг. Микрорентгеноспектральный анализ проводили на растровом электронном микроскопе JSM-6510LV JEOL с системой для микроанализа INCA Energy 350 в Центре коллективного пользования «Прогресс» ВСГУТУ.

Результаты и обсуждение

В результате изотермического и термоциклического борохромирования были получены слои игольчатого строения, по морфологии напоминающие структуры классических боридных слоев (рисунок 2).

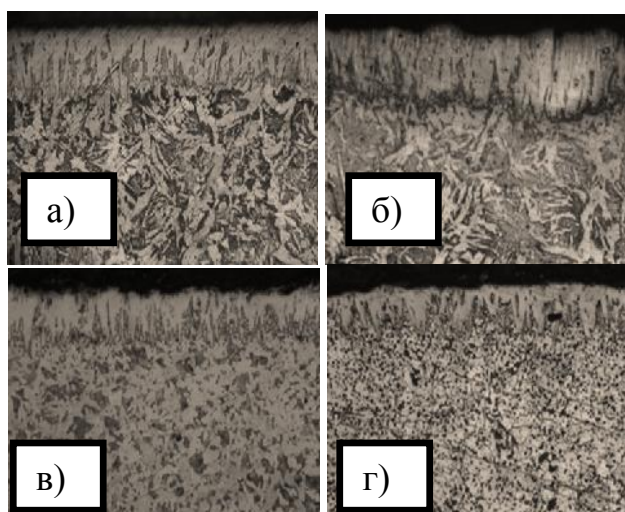


Рис. 2. Микроструктуры борохромированных слоев на стали 20, ×200:
а) изотермический, б) термоциклирование 4 цикла, в) термоциклирование 10 циклов,
г) термоциклирование 16 циклов

Толщина диффузионных слоев изменяется в зависимости от способа нагрева: наибольшая толщина составляет после изотермического процесса. При термоциклическом нагреве толщина слоя уменьшается с увеличением количества циклов, что связано с уменьшением времени при высокотемпературной выдержке (таблица 1).

Таблица 1

Влияние способа обработки на глубину диффузионного слоя.

Марка стали	Глубина диффузионного слоя, мкм			
	Изотермический	Термоциклический		
		4 цикла	10 циклов	16 циклов
20	130	120	100	90

Исследование микротвердости борохромированных слоев показало, что наибольшую микротвердость слои имеют после изотермической обработки – 16450 МПа. В результате термоциклической обработки микротвердость, с увеличением количества циклов, незначительно снижается и составляет: при 4-х циклах – 15800 МПа, 10 циклов – 15280 МПа и при 16 циклах – 15000 МПа.

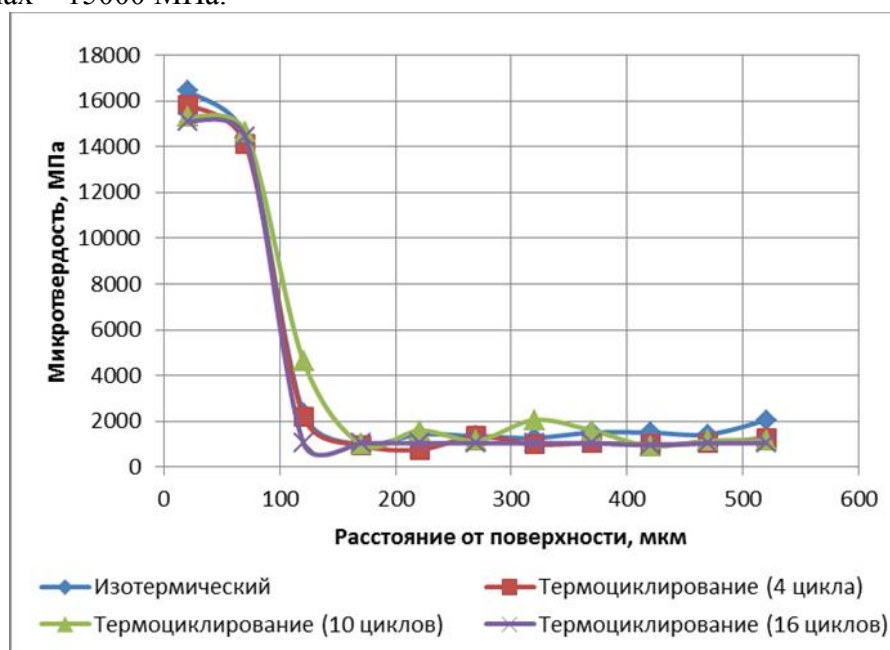


Рис. 3. Влияние способа обработки на микротвердость диффузионного слоя

Микрорентгеноспектральный анализ не выявил какой либо зависимости между количеством циклов и содержанием хрома в диффузионном слое (таблица 2). Как видно из приведенных данных максимальное значение составляет 1,05 %, в остальных случаях его содержание очень мало и составляет 0,8-0,9 % масс.

Таблица 2

Влияние способа обработки на содержание хрома в диффузионном слое (результаты МРСА)

Марка стали	Среднее содержание хрома в диффузионном слое, масс. %			
	Изотермический	Термоциклический		
		4 цикла	10 циклов	16 циклов
20	0,97	0,81	0,84	1,05

Малое количество хрома в диффузионном слое, вероятнее всего связано с отсутствием одновременной диффузии бора и хрома и объясняется полным совпадением интервалов одновременной диффузии, в котором на диаграмме состояния образуются стойкие при рабочих температурах соединения, не имеющие области гомогенности [7].

Выводы

1. На основании исследований микротвердости и металлографического анализа было установлено, что небольшое содержание хрома в диффузионном слое позволяет снизить твердость боридных слоев до 15000 МПа и получить диффузионный слой, состоящий преимущественно из Fe₂B фазы, которая является наиболее предпочтительной в виду высокой хрупкости боридных слоев.

2. Исследованные в работе режимы термоциклической обработки не привели к существенным изменениям структуры борохромированного слоя. Однако, с увеличением количества циклов происходит измельчение зерен в структуре основного металла, что оказывает положительное влияние на его механические свойства.

Список литературы

1. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник / Г.В. Борисенко, Л.А. Васильев, Л.Г. Ворошин и др. – М.: Metallurgia, 1981. – 424 с.
2. Ворошин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А. Теория и технология термической обработки. – М.: Минск: Новое издание, 2010. – 304 с.
3. Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. Бориды. – М.: Атомиздат, 1975. – 376 с.
4. Balandin Yu.A. Surface hardening of die steels by diffusion boronizing, borocopperizing, and borochromizing in fluidized bed // Metal Science and Heat Treatment. – 2005. – Vol. 47 – P. 103–106. – DOI: 10.1007/s11041-005-0037-z.
5. Пат. RU 2459011, 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.
6. Влияние химико-термоциклической обработки на структуру и свойства бороалитированного слоя / И.П. Полянский, И.Г. Сизов, У.Л. Мишигдоржийн, Д.Н. Шадрин, Т.В. Нагорный // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2015. – Т. 55, № 4. – С. 51–56.
7. Иванова Т.Г. Изучение диффузии бора в углеродистых и легированных сталях: дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07 : защищена 15.10.2015. – Барнаул, 2015. – 150 с.

STUDY OF BOROCROME STEEL 20 ARE RECEIVED IN THE CONDITIONS ISOTHERMIC AND THERMOCYCLIC HEATING

Alkhimova E.S., Ph.D. student, e-mail: alximova87@mail.ru

Volkov A.S., Student, e-mail: alex.Volkov170399@mail.ru

Maksimov B.A., Student, e-mail: RafaelmcRay@mail.ru

Sizov I.G., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: RafaelmcRay@mail.ru

Polyansky I.P., Ph.D. (Engineering), e-mail: RafaelmcRay@mail.ru

East Siberia State University of Technology and Management, 40V Klyuchevskaya st., Ulan-Ude,
670013, Russian Federation

Abstract

The article presented the results of surface saturation steel 20 with boron together with chromium from coatings using isothermal and thermo cyclical heating. Granted comparative analysis of microstructures depending on the treatment method. Investigated micro hardness of borochroming layers, as well as influence of quantity cyclicaes heating on the thickness diffusion layer and the content in it chemical elements.

Keywords

chemical-thermal treatment, borochroming in coating, thermo cyclical, two-component coating, diffusion, micro hardness, micro-X-ray spectral analysis.

УДК 658.5.012.1

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА
СПЛАВА 55Ni-17Cr-5Fe-3Mo ПРИ АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ***

М.В. РАШКОВЕЦ¹, аспирант
А.А. НИКУЛИНА¹, канд. техн. наук, доцент
Р.В. МЕНДАГАЛИЕВ², аспирант
Н.Г. КИСЛОВ², аспирант
(¹ НГТУ, г. Новосибирск,
² СПбГМТУ, г. Санкт-Петербург)

Рашковец М.В. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: mrashkovets@mail.ru

В работе рассмотрены механические свойства, структура и фазовый состав сплава, сформированного аддитивной технологией без применения термической обработки. Исследования тонкой структуры показали, что за счет высоких скоростей охлаждения формируется дендритная структура, характеризующаяся высокой плотностью дислокаций и наличием частиц. При испытаниях на растяжение было выявлено, что более высоким уровнем механических свойств обладает материал с продольным расположением слоев.

Ключевые слова: структура, фазовый состав, механические свойства, жаропрочный никелевый сплав, аддитивные технологии

Введение

Жаропрочные сплавы на основе никеля широко используются для лопаток в авиационных и промышленных газотурбинных двигателях с рабочей температурой до 700 °С. Механические свойства никелевых жаропрочных сплавов напрямую зависят от конечной структуры и фазового состава, полученных в результате соответствующей термической обработки. В случае структурных составляющих большое значение имеет междендритное расстояние, которое является зоной формирования эвтектики γ/γ' и выпадения первичных карбидов [1, 2]. В отношении фазового состава рассматриваемый сплав 55Ni-17Cr-5Fe-3Mo, как и другие жаропрочные никелевые сплавы упрочняется за счет выделения частиц γ' фазы с базовым составом Ni₃Al в матрице твердого раствора никеля. Режимы термической обработки влияют на объемную долю и форму упрочняющей γ' фазы, эвтектики γ/γ' , ГПУ фаз, карбидов [3].

Применение аддитивных технологий позволяет формировать сложнопрофильные изделия не только снизив время, но и сократив потери исходного дорогостоящего материала в сравнении со стандартными производственными технологиями [4 - 6]. Точность форм конечного изделия контролируется исходной 3D моделью, по контуру которой слой за слоем создается готовая металлическая деталь.

Аддитивный процесс характеризуется высокими скоростями охлаждения, приводящими сплав в неравновесное состояние, что можно сравнить с закалкой, являющейся первой стадией стандартной термической обработки жаропрочных никелевых сплавов.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-27001.

Повторное термическое влияние при послойном формировании изделий может оказывать влияние на материал сравнимое со следующей ступенью термической обработки – отпуском. Таким образом, при аддитивном процессе возможно исключение необходимой термической обработки.

Целью данной работы является исследование механических свойств, структуры и фазового состава сплава 55Ni-17Cr-5Fe-3Mo, сформированного аддитивной технологией без применения последующей термической обработки.

Методика проведения эксперимента

В эксперименте применялся аддитивный процесс, относящийся к типу прямого подвода тепла и материала, где исходным материалом являлся порошок, а в качестве энергии использовался лазерный луч. Аддитивная установка разработана в СПбГМУ. При формировании образца применялись следующие параметры: мощность лазера 1300 Вт, скорость подачи порошка 43 г/мин, скорость сканирования 25 мм/с, шаг слоя 0,6 мм. Фракционный состав исходного порошка составлял 40 – 120 мкм.

Структура продольного сечения образца была изучена на оптическом микроскопе с предварительным травлением шлифованной поверхности раствором 2 мл HNO_3 , 4 мл HCl и 2 мл H_2O_2 . Тонкое исследование структуры и фазового состава проводилось с использованием просвечивающей электронной микроскопии. Механические испытания на растяжение были проведены при комнатной температуре согласно ГОСТ 1497-84.

Результаты исследований

Дендритное строение продольного сечения образца, характерное для высоких скоростей охлаждения, представлено на рисунке 1 а, б. Рост дендритного зерна имеет направленный характер и распространяется на большую часть слоя (2), при этом зона сплавления слоев (1) характеризуется более мелким строением (рис. 1 б).

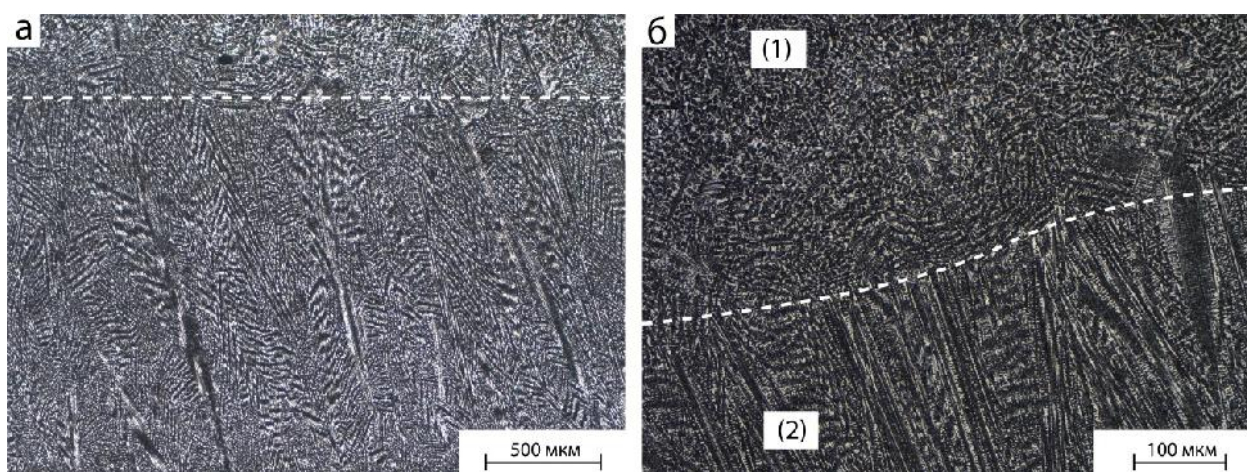


Рис. 1. Металлография микроструктуры продольного сечения образца при различных увеличениях.

Результаты исследований с использованием просвечивающей электронной микроскопии показали высокую плотность дислокаций (рис. 2 а) и наличие частиц (рис. 2 б). Образование большого объема дислокаций связано с пластической деформацией в сплаве, происходящей под действием высоких термических напряжений при послойном формировании изделия. Размеры и геометрия частиц согласно литературным данным [1, 2] говорят об их принадлежности к топологически плотноупакованным соединениям. Образование подобных фаз расширяет температурный диапазон кристаллизации, что увеличивает восприимчивость материала к растрескиванию при затвердевании сплава.

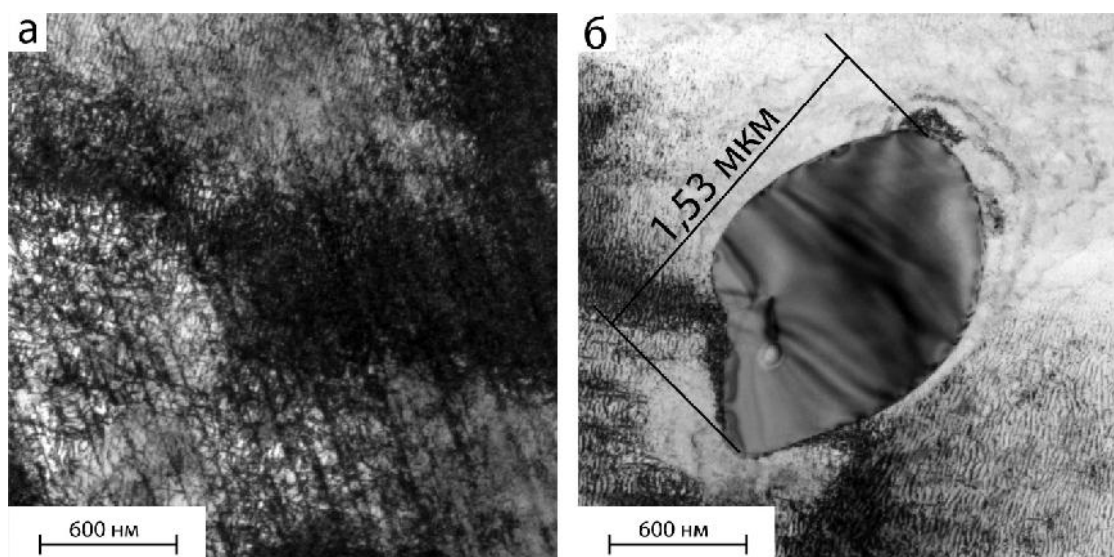


Рис. 2. Снимки ПЭМ: а – скопление дислокаций; б – частица ГПУ фазы.

Механические свойства, полученные при растяжении плоского образца с продольным (рис. 3 а) и поперечным (рис. 3 б) расположением слоев, представлены в таблице 1.

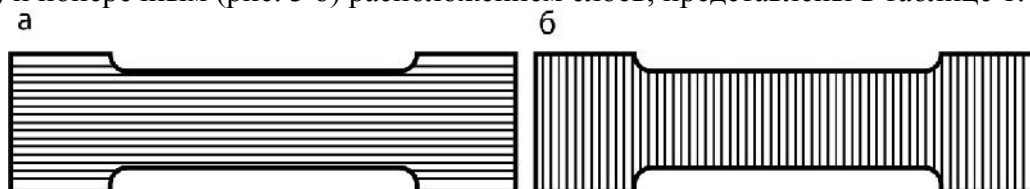


Рис. 3. Схематическое изображение плоских образцов для испытаний на растяжение: а – продольное расположение слоев; б – поперечное расположение слоев.

Таблица 1

Механические свойства жаропрочного никелевого сплава, полученного аддитивной технологией

Направление расположения слоев	σ _в , МПа	σ _т , МПа	δ, %
Продольное	626	359	13,2
Поперечное	527	367	9,2

Учитывая, что предел прочности данного сплава 55Ni-17Cr-5Fe-3Mo (*Inconel718*), полученный при 595 °С/1000 ч., составляет 760 МПа [7], теоретически можно предположить, что сплав обладает фазовым составом, соответствующим термически обработанному материалу.

Выводы

При изготовлении изделий ответственного назначения, работающих при высоких эксплуатационных температурах, важно достигать однородности в структурном строении и равномерности в распределении основной упрочняющей фазы. Присутствие «промежуточной» зоны между соседними слоями с измененной микроструктурой не позволяет достичь однородности по структуре в образце без дополнительной термической обработки. Снижение механических свойств материала также подтверждается более низкими значениями прочностных характеристик с поперечным расположением слоев при испытаниях на растяжение. Кроме того, высокие значения прочности выращенного сплава могут быть связаны с напряженным состоянием материала.

Для отслеживания формирования основной упрочняющей фазы запланировано исследование тонких образцов на просвечивающем электронном микроскопе с более высоким разрешением.

Список литературы

1. *Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И.* Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1981. – 416 с.
2. *Симс Ч., Хагел В.* Жаропрочные сплавы. – М.: Металлургия, 1976. – 568 с.
3. *Durand-Charre M., Davidson J.H.* The Microstructure of Superalloys. – Amsterdam: Gordon and Breach Science Publ., 1997. – 124 p.
4. Microstructure and Phase Composition of Ni-Based Alloy Obtained by High-Speed Direct Laser Deposition / M. Rashkovets, A. Nikulina, G. Turichin, O. Klimova-Korsmik, M. Sklyar // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2018. – Vol. 27 – P. 6398–6406. – DOI: 10.1007/s11665-018-3722-y.
5. *Smirnov A.A., Klimova-Korsmik O.G., Gluhov P.A.* Investigation of the Microstructure of Samples of the 08CrNi53MoNbTiAl Nickel-Base Alloy Obtained by Selective Laser Melting // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1109. – Art. 012064 (7 p.). – DOI: 10.1088/1742-6596/1109/1/012064.
6. The influence of the pause time between the passages, when Stellite 6 is deposited on the turbine wheel blades of the MAR-M200 alloy / N.G. Kislov, G.A. Turichin, O.G. Klimova-Korsmik, R.S. Korsmik // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1109. – Art. 012042 (6 p.). – DOI: 10.1088/1742-6596/1109/1/012042.
7. Характеристики Inconel 718 [Электронный ресурс] // ЕМК. Европейская металлургическая компания. – 2011–2020. – Режим доступа: https://emk24.ru/wiki/nikel_i_ego_splavy/ally_718_inconel_718_n07718_4330575/. – Загл. с экрана.

**MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE
OF 55Ni-17Cr-5Fe-3Mo ALLOY UNDER ADDITIVE MANUFACTURING CONDITION**

Rashkovets M.V.¹, Ph.D. student, e-mail: mrashkovets@mail.ru

Nikulina A.A.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: a.nikulina@corp.nstu.ru

Mendagaliev R.V.², Ph.D. student, e-mail: ruslanm888@mail.ru

Kislov N. G.², Ph.D. student, e-mail: nikitakislov@bk.ru

¹Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

²Saint-Petersburg State Marine Technical University, 3 Locmanskaya Ulitsa, Sankt-Peterburg, 190121, Russian Federation

Abstract

Nickel-based Inconel 718 alloy sample was built by high-speed direct laser deposition (HSDLD). After building up the specimen by HSDLD, it was investigated under the ‘as-built’ condition. The analysis of the microstructure sample was done by using light microscopy, which revealed the same condition as the previous studied samples, and TEM. The mechanical properties show higher value in case of longitudinal direction of layers unlike perpendicular direction.

Keywords

structure, phase composition, mechanical properties, heat-resistant nickel-base alloy, additive manufacturing.

УДК 621.723

**ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ
И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ
ПОКРЫТИЙ ИЗ ПСЕВДОСПЛАВОВ НА ОСНОВЕ X20H80**

Е.В. АСТРАШАБ, аспирант
М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, доктор техн. наук, профессор
А.Н. ГРИГОРЧИК, канд. техн. наук
В.А. КУКАРЕКО, доктор физ.-мат. наук, профессор
(ОИМ НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь)

Григорчик А.Н. – 220072, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Академическая, 12,
Государственное научное учреждение "Объединенный институт машиностроения
Национальной академии наук Беларуси"
e-mail: GrigorchikAN@gmail.com

Исследовано структурно-фазовое состояние и трибомеханические характеристики газотермических покрытий из псевдосплавов «X20H80+АД-1» и «X20H80+08Г2С» в исходном состоянии и после отжига при 550°C и 650°C. Показано, что отжиг покрытия из псевдосплава «X20H80+АД-1» приводит к выделению в нем интерметаллидов на основе Ni-Al, приводящих к существенному увеличению его микротвердости и износостойкости. В частности, микротвердость покрытия возрастает ≈ 2 раза, а износостойкость в ≈ 19 раз по сравнению с исходным состоянием. Отжиг покрытия из «X20H80+08Г2С», сопровождается выделением в нем интерметаллидной фазы FeNi, а также приводит к снижению микротвердости покрытия в 1.4 раза и износостойкости в 3 раза по сравнению с исходным состоянием.

Ключевые слова: газотермические покрытия, псевдосплавы, отжиг, фазовый состав, структура, износостойкость.

Введение

Покрытия из псевдосплавов, полученные методом газотермического напыления [1-3], обладают уникальным сочетанием триботехнических и физико-механических характеристик [4-11]. Вместе с тем, несмотря на высокие триботехнические характеристики газотермических покрытий из псевдосплавов, их физико-механические свойства, зачастую, уступают свойствам монолитных материалов. Одним из перспективных способов увеличения прочностных и триботехнических свойств покрытий из псевдосплавов является выделение в них при отжиге твердых интерметаллидных фаз [7-12]. В частности, напыленные псевдосплавы на основе никель-хромового сплава X20H80 в сочетании с алюминием и железом должны обеспечивать выделение при отжиге целого ряда интерметаллидов на основе Ni-Fe и Ni-Al, обладающих уникальными характеристиками прочности, коррозионной стойкости и магнитными свойствами. Вместе с тем, до настоящего времени остаются не исследованными структура и свойства напыленных псевдосплавов на основе никель-хромовых сплавов с железом и алюминием, как в исходном состоянии (после напыления), так и после их отжига. В связи с этим, целью данной работы являлось исследование влияния отжига газотермических покрытий из псевдосплавов на основе

«X20H80+АД-1» и «X20H80+08Г2С» на их структурно-фазовое состояние и трибомеханические свойства.

Получение образцов и методики исследований.

В качестве объектов исследований были выбраны газотермические покрытия из псевдосплавов «X20H80+АД-1» и «X20H80+08Г2С». Напыление газотермических покрытий выполнялось методом высокоскоростной металлизации с использованием установки АДМ-10 [1-3]. Химический состав напыленных псевдосплавов представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав напыленных псевдосплавов «X20H80+АД-1» и «X20H80+08Г2С»

Материал покрытия	Содержание элемента, масс. %								
	Al	Si	S	P	Cr	Mn	Fe	Zn	Ni
X20H80+АД-1	50.97	1.43	0.05	0.04	10.62	0.24	0.76	0.02	Остальное
X20H80+08Г2С	0.41	0.87	0.01	0.03	11.58	0.77	40.13	0.02	Остальное

Температура отжига покрытий составляла 550°C и 650°C. Время выдержки 30 мин для покрытий из «X20H80+08Г2С» и 60 мин для покрытий из «X20H80+АД-1», охлаждение проводилось на воздухе.

Исследование фазового состава покрытий осуществлялось на дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном кобальтовом (CoK_α) излучении при напряжении 28 кВ и анодном токе 14 мА. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ с использованием программного обеспечения AltamiStudio 3.3.

Сравнительные триботехнические испытания проводились в режиме сухого трения. Испытания выполнялись по схеме возвратно-поступательного движения призматического образца (8×6×5 мм) по пластинчатому контртелу при средней скорости взаимного перемещения ≈ 0.1 м/с. Контртело – пластина из закаленной стали У8, с твердостью 700 HV 10. Номинальная удельная нагрузка испытаний Р в условиях сухого трения составляла 1.5 МПа. Путь трения L составлял ≈ 1200 м, с промежуточными замерами массового износа.

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе газотермического напыления псевдосплавов «X20H80+АД-1» и «X20H80+08Г2С» формируются покрытия, имеющие слоистую структуру и невысокую пористость (рисунок 1 а, б). В частности, пористость покрытий из псевдосплавов не превышала $\approx 3-5$ об. %. Из представленных микроструктур (рисунок 1) можно видеть, что отжиг газотермических покрытий из псевдосплавов «X20H80+АД-1» при 550°C и 650°C приводит к существенному возрастанию их пористости. В частности, пористость отожженных при 550°C и 650°C покрытий составляет 13 и 16 об. %. В тоже время пористость покрытий из псевдосплавов «X20H80+08Г2С» в результате отжига при аналогичных температурах увеличивается незначительно (рисунок 1). Увеличение пористости при отжиге покрытий из «X20H80+АД-1» обусловлено реализацией эффектов Френкеля и Киркендалла [13-15], заключающихся в том, что при отжиге двух разнородных сваренных материалов происходит диффузия атомов более активного материала (в нашем

случае – алюминия) по вакансионному механизму в прослойки сплава X20H80. При этом, вакансии перемещаются в направлении обратном потоку диффундирующих атомов алюминия. В результате диффузионных процессов, происходит смещение границы раздела двух материалов, а также образование диффузионной пористости. В случае отжига покрытия «X20H80+08Г2С», вследствие относительно близких значений коэффициентов диффузии атомов Ni, Cr и Fe образование развитой диффузионной пористости в покрытиях не обнаруживается.

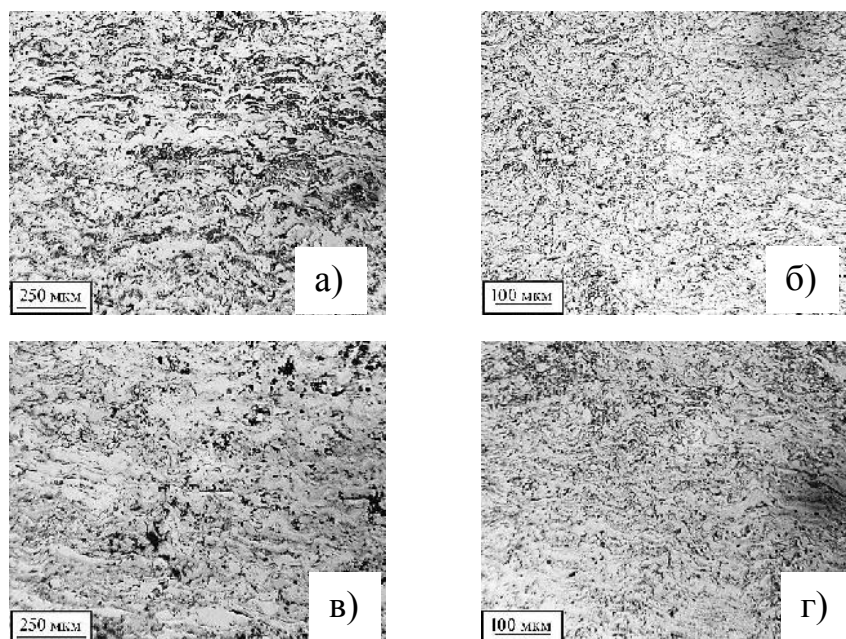


Рис. 1. Характерные микроструктуры газотермических покрытий из псевдосплавов X20H80+АД-1 (а, в) и X20H80+08Г2С (б, г) в исходном состоянии (а, б) и после отжига при 650°C (в, г)

Фазовый состав газотермических покрытий из псевдосплавов «X20H80+АД-1» и «X20H80+08Г2С» в исходном состоянии и после отжига представлен в таблице 2.

Таблица 2

Фазовый состав газотермических покрытий из псевдосплавов «X20H80+АД-1» и «X20H80+08Г2С» в исходном состоянии и после отжига

Наименование образца	Фазовый состав	HV 0.025	HV 10
X20H80+АД-1	γ -(Ni,Cr,Fe); Al	250	160
X20H80+АД-1, отжиг 550°C, 60 мин	γ -(Ni,Cr,Fe); Al ₃ Ni; NiAl; Ni ₂ Al ₃ ; Ni ₃ Al	470	245
X20H80+АД-1, отжиг 650°C, 60 мин	γ -(Ni,Cr,Fe); Ni ₂ Al ₃ ; NiAl; Ni ₃ Al	530	285
X20H80+08Г2С	α -Fe; γ -(Ni,Cr,Fe); Ni ₃ Fe; NiFe; Fe ₃ O ₄	500	355
X20H80+08Г2С, отжиг 550°C, 30 мин	α -Fe; γ -(Ni,Cr,Fe); Ni ₃ Fe; NiFe; Fe ₃ O ₄	470	300
X20H80+08Г2С, отжиг 650°C, 30 мин	γ -(Ni,Cr,Fe); α -Fe; NiFe; Ni ₃ Fe; Fe ₃ O ₄	360	270

Можно видеть, что в исходном состоянии газотермическое покрытие из псевдосплава «X20H80+АД-1» содержит фазы γ -(Ni, Cr, Fe) и Al (таблица 2). При этом фаза γ -(Ni, Cr, Fe) представляет собой твердый раствор хрома и железа в никеле (PDF Number 33-945; Space Group Fm-3m; $a=0.35537$ нм) [16]. Твердость напыленного псевдосплава «X20H80+АД-1» составляет 160 HV 10, а его микротвердость 250 HV0.025 (таблица 2). Отжиг покрытия из псевдосплава «X20H80+АД-1» при 550°C в течение 60 минут приводит к образованию интерметаллидов Al_3Ni , NiAl, Ni_2Al_3 , Ni_3Al в матричной γ -(Ni, Cr, Fe) фазе. При этом твердость покрытия возрастает до 245 HV 10, а его микротвердость до 470 HV 0.025 (таблица 2). Дальнейшее повышение температуры отжига покрытия из «X20H80+АД-1» до 650°C приводит к увеличению количества интерметаллидных фаз Ni_2Al_3 , NiAl, Ni_3Al в γ -(Ni, Cr, Fe). Твердость и микротвердость покрытия из «X20H80+АД-1» в результате отжига при 650°C возрастают до 285 HV 10 и 530 HV 0.025, соответственно (таблица 2). Существенное различие между значениями твердости и микротвердости отожженного псевдосплава связано со значительным увеличением его пористости.

В фазовом составе напыленного газотермического покрытия из псевдосплава «X20H80+08Г2С» регистрируются α -Fe, γ -(Ni, Cr, Fe), Ni_3Fe , NiFe, Fe_3O_4 (таблица 2, рисунок 2). Таким образом, в процессе напыления в покрытии из «X20H80+08Г2С» образуется большое количество интерметаллидных фаз Ni_3Fe (PDF Number 38-419; Space Group Pm-3m; $a=0.3545$ нм) и NiFe (PDF Number 47-1417; Space Group Fm-3m; $a=0.35975$ нм) [16].

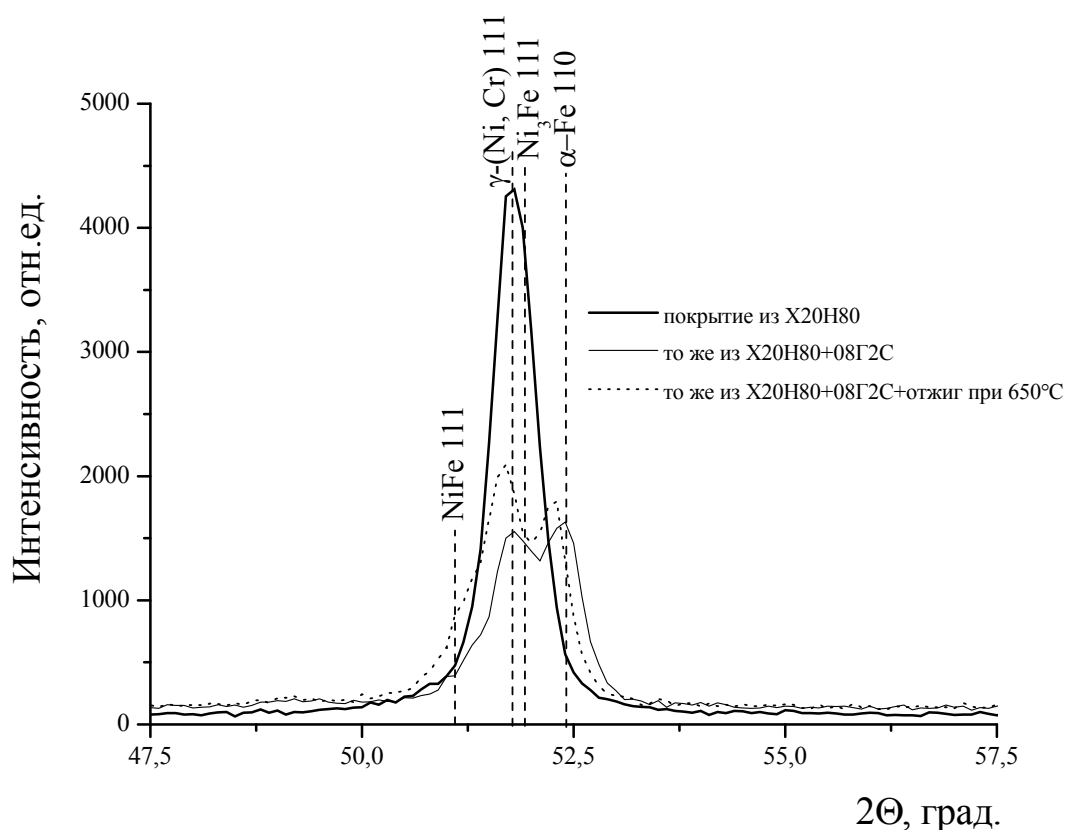


Рис.2. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK_{α}) от поверхностных слоев газотермических покрытий на основе X20H80

Твердость псевдосплава после напыления составляет 355 HV 10, а его микротвердость 500 HV 0.025 (таблица 2). Отжиг покрытия из «X20H80+08Г2С» при 550°C в течение 30 минут приводит к снижению в нем количества интерметаллида Ni_3Fe и увеличению содержания фазы NiFe (рисунок 2). Указанное изменение фазового состава псевдосплава

«X20H80+08Г2С» приводит к уменьшению значений твердости и микротвердости до 300 HV 10 и 470 HV 0.025, что связано с низкими прочностными свойствами фазы NiFe (таблица 2). Повышение температуры отжига покрытия «X20H80+08Г2С» до 650°C приводит существенному возрастанию содержания в нем интерметаллида NiFe и снижению количества Ni₃Fe. При этом значения твердости и микротвердости покрытия снижаются до 270 HV 10 и 360 HV 0.025, соответственно (таблица 2). Снижение дюрометрических свойств псевдосплава «X20H80+08Г2С» по мере увеличения температуры отжига связано с уменьшением содержания в покрытии твердой интерметаллидной фазы Ni₃Fe (рисунок 2).

Результаты триботехнических испытаний покрытий в условиях трения без смазочного материала представлены в таблице 3. Из приведенных данных можно видеть, что напыленное покрытие из псевдосплава «X20H80+08Г2С» имеет более высокую износостойкость по сравнению с покрытием из псевдосплава «X20H80+АД-1» (таблица 3). В частности, интенсивность массового изнашивания псевдосплава «X20H80+08Г2С» составляет $9.0 \cdot 10^{-3}$ мг/м, а псевдосплава «X20H80+АД-1» - $29.0 \cdot 10^{-3}$ мг/м (таблица 3). Повышенная износостойкость покрытия из псевдосплава «X20H80+08Г2С» связана с его повышенной прочностью, обусловленной составом псевдосплава, а также с наличием в его фазовом составе интерметаллида Ni₃Fe, образовавшегося при напылении (таблица 2). В результате отжига покрытий из псевдосплавов «X20H80+АД-1» и «X20H80+08Г2С» при 550°C уровни их износостойкости сближаются (таблица 3). Это связано с некоторым разупрочнением покрытия из «X20H80+08Г2С» за счет уменьшения в нем количества фазы Ni₃Fe, а также со значительным упрочнением покрытия из «X20H80+АД-1» за счет выделения в нем интерметаллидов Al₃Ni, NiAl, Ni₂Al₃, Ni₃Al (таблица 2). Повышение температуры отжига покрытия из псевдосплава «X20H80+АД-1» до 650°C приводит к еще более значительному повышению его износостойкости (таблица 3). В частности, износостойкость отожженного при 650°C покрытия из «X20H80+АД-1» увеличивается в 19 раз по сравнению с исходным состоянием (таблица 3). Увеличение износостойкости покрытия из «X20H80+АД-1» после отжига при 650°C обусловлено выделением в нем большого количества интерметаллидных фаз Ni₂Al₃, NiAl и Ni₃Al (таблица 2). В тоже время термическая обработка покрытия из псевдосплава «X20H80+08Г2С» при 650°C приводит резкому снижению его износостойкости (таблица 3), что связано с практически полным растворением в нем интерметаллида Ni₃Fe и образованием менее прочной фазы NiFe (таблица 2).

Таблица 3

Интенсивность массового изнашивания газотермических покрытий из псевдосплавов «X20H80+АД-1» и «X20H80+08Г2С» в исходном состоянии и после отжига

Покрытие	Интенсивность массового изнашивания в условиях сухого трения, $\times 10^{-3}$ мг/м
X20H80+АД-1	29.0
X20H80+ АД-1, отжиг при 550°C, 60 мин	11.5
X20H80+ АД-1, отжиг при 650°C, 60 мин	1.5
X20H80+08Г2С	9.0
X20H80+08Г2С, отжиг при 550°C, 30 мин	10.5
X20H80+08Г2С, отжиг при 650°C, 30 мин	30.0

Таким образом, можно сделать вывод, что отжиг газотермического покрытия из псевдосплавов «X20H80+АД-1» приводит к существенному увеличению его микротвердости и износостойкости. В тоже время термическая обработка покрытия из «X20H80+08Г2С» сопровождается снижением его дюрометрических и триботехнических свойств.

Выводы

Исследовано структурно-фазовое состояние и трибомеханические характеристики газотермических покрытий из псевдосплавов «X20H80+АД-1» и «X20H80+08Г2С» в исходном состоянии и после отжига при 550°C и 650°C.

Показано, что в результате напыления псевдосплава «X20H80+08Г2С» формируется покрытие, содержащее в своем фазовом составе интерметаллиды Ni₃Fe и NiFe. Микротвердость покрытия составляет 500 HV 0.025. Отжиг покрытия из псевдосплава «X20H80+08Г2С» при 550°C и 650°C в течение 30 минут приводит к уменьшению содержания в его фазовом составе интерметаллида Ni₃Fe и увеличению количества фазы NiFe, что в свою очередь обуславливает снижение микротвердости и износостойкости покрытия. В частности, отжиг покрытия приводит к уменьшению износостойкости до 3 раз по сравнению с исходным состоянием.

Покрытие из псевдосплава «X20H80+АД-1» содержит в фазовом составе γ -(Ni, Cr, Fe) и Al, а его микротвердость составляет 250 HV 0.025. Установлено, что отжиг покрытий из псевдосплава «X20H80+АД-1» при 550°C и 650°C в течение 60 минут приводит к существенному изменению его фазового состава и увеличению пористости до 13-16 об. %. В результате отжига покрытий из «X20H80+АД-1» в нем образуются интерметаллидные фазы Al₃Ni, NiAl, Ni₂Al₃, Ni₃Al, а микротвердость и износостойкость покрытия возрастают соответственно в ≈ 2 раза и ≈ 19 раз по сравнению с исходным состоянием.

Список литературы

1. Белоцерковский М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 200 с.
2. Белоцерковский М.А., Прядко А.С. Активированное газопламенное и электродуговое напыление покрытий проволочными материалами // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 12. – С. 17–23.
3. Belotserkovsky M. Steel Thermal Sprayed Coatings: Superficial Hardening by Nitrogen Ion Implantation // Welding Journal. – 2009. – Vol. 88, iss. 12. – P. 243–248.
4. Структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства псевдосплавов, напыленных из высокохромистых сталей и цветных металлов / В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик, Е.В. Астрашаб, А.В. Сосновский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т. 15, № 8. – С. 355–359.
5. Композиционные материалы в технике / Д.М. Карпинос, Л.И. Тучинский, А.Б. Сапожникова и др. – Киев: Технпса, 1985. – 152 с.
6. Galinov I.V. Investigation of the composition of Ag, Ni and Ag-Ni pseudoalloy coatings applied by electrospark alloying on a Cu substrate // Surface and Coatings Technology. – 1993. – Vol. 56, № 2. – P. 131–135.
7. Wille C.G., Tala'at Al-Kassab, Kirchheim R. Time evolution of morphology in mechanically alloyed Fe–Cu // Ultramicroscopy. – 2011. – Vol. 111, № 6. – P. 730–737.
8. Venugopal T., Prasad R.K., Murty B.S. Mechanical and electrical properties of Cu-Ta nanocomposites prepared by high-energy ball milling // Acta Materialia. – 2007. – Vol. 55, № 13. – P. 4439–4445.
9. Каму Н.В. Восстановление деталей текстильных машин металлизацией. – М.: Легкая индустрия, 1968. – 191 с.

10. Металлизация распылением / Н.В. Катц, Е.В. Антошин, Д.Г. Вадивасов и др. – М.: Машиностроение, 1966. – 200 с.
11. Пат. 291994 СССР, МПК С 23 С 7/00. Способ повышения износостойкости поршней / А.И. Пономарев, З.А. Макаева, Н.В. Комлюков и др ; заявитель: Всесоюзный проектно-технологический институт тяжелого машиностроения. – № 1362862/22-1 ; заявл. 23.09.69 ; опубл. 06.01.71. – Бюл. № 4.
12. Влияние отжига на структурно-фазовое состояние и износостойкость газотермических покрытий из железо-алюминиевых псевдосплавов / В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик, Е.В. Астрашаб, А.В. Сосновский // Актуальные вопросы машиноведения. – 2019. – Вып. 8. – 49–53.
13. Криштал М.А. Механизм диффузии в железных сплавах. – М.: Metallurgy, 1972. – 400 с.
14. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. – М.: Metallurgy, 1978. – 248 с.
15. Гольдимиidt X. Дж. Сплавы внедрения. Т. 2 / под ред. Н.Т. Чеботарева. – М.: Мир, 1971. – С. 87–120.
16. Мягков В.Г., Баюков О.А. Твердофазный синтез в эпитаксиальных Ni/Fe/MgO(001) тонких пленках // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2004. – Т. 80, № 7. – С. 555–559.

INFLUENCE OF ANNEALING ON THE STRUCTURAL-PHASE STATE AND TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF HYPERSONIC METALLIZATION COATINGS FROM FALSELY ALLOYS BASED ON Ni80Cr20

Astrashab E.V., Ph.D. student, e-mail: astrashabev@mail.ru

Belotserkovsky M.A., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mbelotser@gmail.com

Grigorichik A.G., Ph.D. (Engineering), e-mail: GrigorichikAN@gmail.com

Kukareko V.A., Ph.D. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: v_kukareko@mail.ru

The State Scientific Institution “Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”, 12 Akademicheskaya str., Minsk, 220072, Republic of Belarus

Abstract

The structural-phase state and tribomechanical characteristics of hypersonic metallization (HM) coatings from falsely alloys “Ni80Cr20 + Al99,3” and “Ni80Cr20 + 08Mn2Si” in the initial state and after annealing at 550°C and 650°C were investigated. It is shown that annealing of the coating from the falsely alloy “Ni80Cr20 + Al99,3” leads to a significant increase in its microhardness and wear resistance. In particular, the microhardness of the coating increases ≈ 2 times, and the wear resistance ≈ 19 times in comparison with the initial state. Annealing of the coating from “Ni80Cr20 + 08Mn2Si” leads to a decrease in its microhardness by 1.4 times, and wear resistance decreases by 3.0 times compared with the initial state.

Keywords

hypersonic metallization, falsely alloys, phase state, structure, wear resistance.

УДК 669.715: 621.74.047

УПРОЧНЕНИЕ ЗЕМЛЯНЫХ ОТЛИВОК ИЗ БИНАРНЫХ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ

*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

Исследована возможность улучшения структуры и механических свойств земляных отливок из бинарного заэвтектического силумина Al-20 % Si за счет оптимизации модифицирующего состава и параметров обработки расплава. Установлено, что введение в модифицирующий состав на основе фосфор- и кислородсодержащих веществ (фосфористая медь, оксиды железа) рафинирующего реагента (хлорида марганца) несколько уменьшает эффективность его воздействия на первичные кристаллы β -Si. Однако значительное снижение газовой пористости в отливках из заэвтектического силумина позволяет повысить их временное сопротивление разрыву на 15÷27 % по сравнению со свойствами модифицированного силумина.

Ключевые слова: заэвтектический силумин, отливка, структура, кристаллы первичного кремния, эвтектика, упрочнение.

Введение

Одними из самых распространенных алюминиевых сплавов являются сплавы на основе системы Al-Si с довольно широким диапазоном содержания кремния. При повышении содержания кремния в составе силуминов в их структуре увеличиваются размер и количество выделений эвтектического и первичного кремния. Поэтому при производстве слитков и фасонных отливок на заготовительных и литейных заводах цветной металлургии необходимой операцией является модифицирование расплава. Причем технология обработки расплава зависит от химического состава силумина и способа его производства [1, 2]. Для диспергирования эвтектики (Al+Si) и измельчения первичных кристаллов β -Si в структуре силуминов разработано большое количество модификаторов различного состава и действия [3-19].

При изготовлении деталей из заэвтектических силуминов методом литья в одноразовые песчано-глинистые (земляные) формы в структуре отливок присутствуют значительно более грубые кристаллы первичного кремния (КПК) и выделения эвтектики (Al+Si), что объясняется более малой скоростью кристаллизации жидкого металла по сравнению с полунепрерывным и кокильным методами литья. Для заэвтектических силуминов одним из наиболее эффективных модификаторов являются комплексные составы на основе фосфор-, водород- и кислородсодержащих реагентов – фосфидов, оксидов и других соединений некоторых металлов [19-22]. Применение данных комплексных модификаторов рекомендуется для способов литья, которые характеризуются высокими скоростями кристаллизации. Прежде всего, это полунепрерывное литье слитков и кокильное литье. Так, в первом случае при изготовлении полунепрерывных слитков скорости

охлаждения в интервале кристаллизации составляют 0,5 – 50 °С/с, а во втором случае – около 125 °С/мин. [23]. При малых скоростях охлаждения (порядка 10 °С/мин. и меньше), которыми характеризуется способ изготовления деталей путем литья в одноразовые песчаные формы, эффективность применения данного типа модификаторов снижается. Кроме того, после использования для модифицирования силуминов данных составов в отливках наблюдается появление пористости.

Поэтому целью работы являлась оптимизация способа модифицирования заэвтектического силумина с 20 % Si составом на основе фосфор- и кислородосодержащих реагентов применительно для отливки в песчаные формы.

Материал и методика экспериментального исследования

В качестве объекта исследования был выбран двойной заэвтектический силумин с содержанием кремния 20 % (вес.). Для приготовления сплавов использовали алюминий А6 и технически чистый кремний Кр1. Сплавы готовили в лабораторной шахтной печи сопротивления в окрашенном металлическом тигле. Модифицирующую смесь вводили в расплав с помощью «колокольчика» при температурах 820 и 900°С. Время обработки расплава составляло 20 минут. Заливку расплава проводили в заранее изготовленные и просушенные «земляные» формы после снятия шлака с зеркала расплава.

Для удаления избыточного содержания водорода использовали снижение температуры модифицирования и рафинирование расплава известным составом «Дегазёр» [20] и хлористым марганцем. Для модифицирования был выбран состав, содержащий 0,4 % CuP, 0,5 % Fe₃O₄ и 0,5 % Fe₂O₃ и отличающийся высоким уровнем измельчения КПК и отсутствием в составе борной кислоты, добавки которой приводят к дополнительному наводороживанию расплава [3, 19]. Отливали деталь типа «рамка» с разной толщиной элементов от 20 до 60 мм. Микроструктуру изучали на образцах, вырезанных из различных частей отливки с использованием оптического микроскопа ЛабоМет-1И при увеличении ×100. Для определения механических характеристик отливок использовали цилиндрические образцы, изготовленные по ГОСТ 1497-84, диаметром 6 мм. Образцы вырезали из различных элементов детали, а результаты испытаний усредняли по всей отливке. Контроль пористости отливок проводили визуально, а диаметр пор определяли при увеличении ×10. Для установления балла газовой пористости образцов пользовались шкалой, приведенной в ГОСТ 1583-93 [24].

Результаты и обсуждение

Результаты металлографического анализа и определения механических характеристик отливок из заэвтектического силумина после различных вариантов совместной обработки расплава с использованием процессов модифицирования и рафинирования приведены в таблице и на рисунке.

Микроскопические исследования отливок из сплава Al - 20 % Si, залитых в сухие песчаные формы, приготовленных без обработки расплава и с использованием модифицирующих и рафинирующе-модифицирующих составов различными способами показал, что модификатор (0,4 % CuP, 0,5 % Fe₃O₄ и 0,5 % Fe₂O₃), не содержащий рафинирующих компонентов, эффективно уменьшает размеры КПК (в среднем в 5÷8 раз) по сравнению со структурой сплава без обработки (см. табл. и рис.). Однако воздействие

обработки на эвтектическую составляющую (Al+Si) в структуре сплава значительно слабее. Так, по форме и размерам выделений эвтектического кремния, которые практически не изменились после обработки расплава силумина, тип эвтектики можно отнести к грубопластинчатой. Кроме того, по сечению отливки появляется пористость, степень которой путем сравнения пор с эталонными шкалами, можно отнести ко 2 и 3 баллу.

Таблица

Влияние обработки расплава на механические характеристики и балл пористости отливок в песчаные формы из сплава Al - 20 % Si

Способ обработки расплава и состав смесей, % от веса расплава	Температура обработки, °С	Механические характеристики		Средний размер КПК, мкм	Балл пористости
		σ_b , МПа	δ , %		
–	–	94	0,4	350-400	–
Модифицирование смесью: 0,4 CuP, 0,5 Fe ₃ O ₄ , 0,5 Fe ₂ O ₃	900	111	0,8	55-60	3
То же	820	122	0,3	60-65	2
Модифицирование смесью: 0,4 CuP, 0,5 Fe ₃ O ₄ , 0,5 Fe ₂ O ₃ и рафинирование 0,2 состава «Дегазер»	900	129	0,6	72-78	1
Модифицирование смесью: 0,4 CuP, 0,5 Fe ₃ O ₄ , 0,5 Fe ₂ O ₃ и рафинирование 0,2 MnCl ₂	900	134	0,5	72-76	1
Рафинирование 0,2 MnCl ₂ и модифицирование смесью: 0,4 CuP, 0,5 Fe ₃ O ₄ , 0,5 Fe ₂ O ₃	900	139	0,4	72-80	–
Обработка смесью: 0,4 CuP, 0,5 Fe ₃ O ₄ , 0,5 Fe ₂ O ₃ , 0,2 MnCl ₂	900	141	0,6	70-75	–

Из приведенных результатов следует, что рафинирование расплава силумина после его модифицирования несколько увеличивает размеры КПК (в среднем на 20-25 %), что может явиться причиной снижения механических характеристик модифицированных отливок. Однако, в данном случае, этот эффект перекрывается положительным вкладом от уменьшения числа и размеров газовых пор после используемой рафинирующей обработки.

Снижение температуры обработки и использование хлористых солей после модифицирования не дало полного устранения избыточного содержания водорода и возможности получения плотных отливок. Поэтому для изготовления изделий из заэвтектических силуминов способом литья в песчаные формы можно рекомендовать либо предварительное рафинирование хлоридом марганца (MnCl₂) в количестве 0,2 % от веса расплава, либо совместное введение хлористого марганца с реагентами модификатора. В

этом случае временное сопротивление разрыву возрастает в среднем на 50 % по сравнению со сплавом без обработки и на 15÷27 % по сравнению с модифицированным сплавом. При этом относительное удлинение отливок не превышает 1 %.

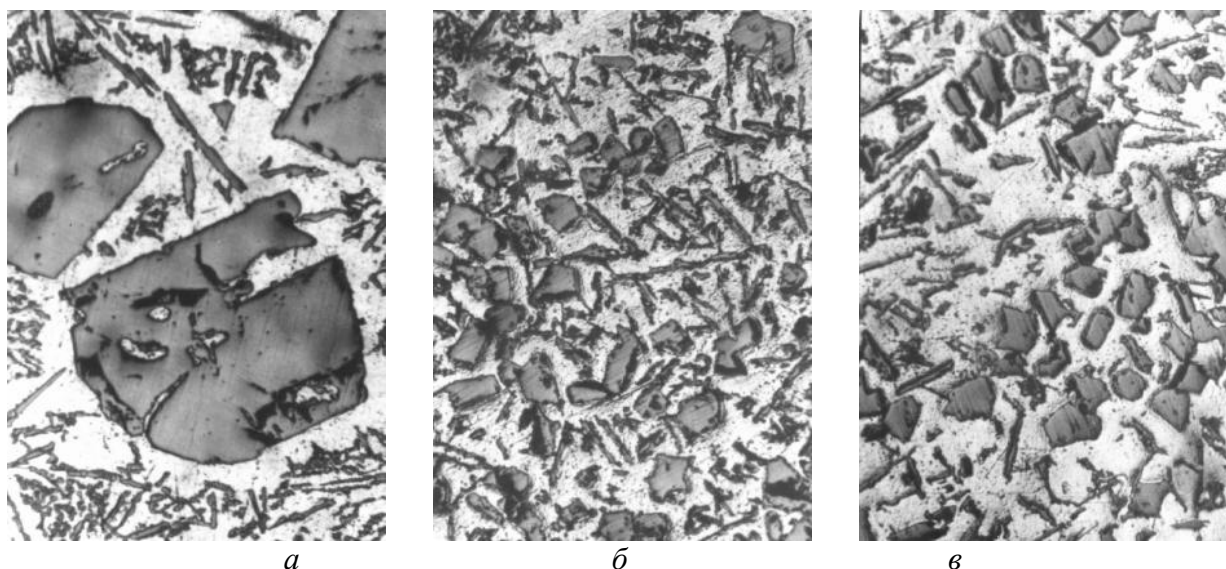


Рис. Микроструктура отливок из сплава Al - 20 % Si, отлитых в песчаную форму, в зависимости от обработки расплава:

a – без обработки; *б* – модифицирование составом CuP, Fe₃O₄, и Fe₂O₃;
в – модифицирующе-рафинирующая обработка составом CuP, Fe₃O₄, Fe₂O₃, и MnCl₂.

Выводы

1. Предложен способ комплексной обработки расплава заэвтектических силуминов, отливаемых в песчаные формы, заключающийся в совместном введении рафинирующего (MnCl₂) и модифицирующих компонентов (фосфористой меди и порошкообразных оксидов железа), позволяющий получить наряду с высоким уровнем измельчения кристаллов β-кремния (в 5-8 раз), плотные отливки.

2. Временное сопротивление разрыву отливок из сплава Al - 20 % Si после такой обработки возрастает на 15÷27 % по сравнению со свойствами модифицированного силумина.

Список литературы

1. Прудников А.Н. Формирование структуры слитков из заэвтектического силумина при обработке расплава и легировании // *Металлургия машиностроения*. – 2009. – № 3. – С. 28–31.
2. Прудников А.Н. Роль условий кристаллизации в формировании структуры и свойств слитков и поковок из заэвтектических силуминов // *Материаловедение*. – 2014. – № 1. – С. 10–13.

3. Прудников А.Н. Структурно-технологические основы разработки прецизионных силуминов с регламентированным содержанием водорода: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук : 05.16.09. – Новосибирск, 2013. – 40 с.
4. Хохлев В.М. Производство литейных алюминиево-кремниевых сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 68 с.
5. Ganiger B.M., Chandrashekharaiyah T.M., Prasad T.B. The effect of modification of primary silicon on the microstructure, mechanical and sliding wear behavior of commercial LM-29 cast alloy // American Journal of Materials Science. – 2015. – Vol. 5, № 3. – P. 1–6.
6. A new technique to modify hypereutectic Al-24 % Si alloys by a Si-P master alloy / Y. Wu, S. Wang, H. Li et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – Vol. 477, iss. 1–2. – P. 139–144.
7. Афанасьев В.К. Прудников А.Н. Воздействие наводороживания расплава в электромагнитном поле на линейное расширение литейных силуминов // Литейное производство. – 2011. – № 2. – С. 26–27.
8. Tsaia Y.-C., Leeab S.-L., Lin C.-K. Effect of trace Ce addition on the microstructures and mechanical properties of A356 (AL-7SI-0.35 Mg) aluminum alloys // Journal of the Chinese Institute of Engineers. – 2011. – Vol. 34, № 5. – P. 609–616.
9. Huifang H., Huaji L., Hansong X. The effect of La-Ce on the growth of the Si phase in the Al-24Si // Special Casting and Nonferrous Alloys. – 2010. – Vol. 30, № 6. – P. 575–578.
10. Effect of intensive shearing on the morphology of primary silicon and properties of hypereutectic Al - Si alloy / N. Barekar, N. Hari Babu, B.K. Dhindaw et al. // Materials Science and Technology – 2010. – Vol. 26, iss. 8. – P. 975–980.
11. Suarez-Pena B., Asensio-Lozano J. Microstructure and mechanical property developments in Al-12Si gravity die castings after Ti and/or Sr additions // Materials Characterization. – 2006. – Vol. 57. – P. 218–226.
12. Study on dual modification of Al-17 % Si alloys by structural heredity / J. Zhang, H. Chen, H. Yu et al. // Metals. – 2015. – № 5. – P. 1112–1126.
13. Heshmatpour B. Modification of silicon in eutectic and hypereutectic Al-Si alloys // Essential Readings in Light Metals. – 2016. – Vol. 3, № 3. – P. 425–432.
14. Rathod N.R., Manghani J.V. Effect of modifier and grain refiner on cast Al-7Si aluminum alloy // Journal of Emerging Trends in Engineering and Development. – 2012. – Vol. 5, № 2. – P. 574–581.
15. Structural modification of sand cast eutectic Al-Si alloys with sulfur / sodium and its effect on mechanical properties / W. Chikezie, B.A. Onyial, S.I. Okorie et al. // World Journal of Engineering and Technology. – 2013. – № 1. – P. 9–16.
16. Shamsuzzoha M., Nasrac L., Berry J. Nano-refinement of eutectic and primary silicon fibers in Al-Si alloys for high strength structural applications // AFS Transactions. – 2012. – Vol. 120. – P. 179–186.
17. Ряховский А.П., Петров И.А., Моисеев В.С. Повышение эффективности модифицирующей обработки силуминов // Технология легких сплавов. – 2012. – № 2. – С. 94–96.
18. Influence of combined grain refinement and modification on the microstructure and mechanical properties of Al-12Si, Al-12Si-4.5Cu alloys / C.G. Shivaprasad, S. Narendranath, V. Desai, S. Swami, M.S. Ganesh Prasad // Materials Science. – 2014. – Vol. 5. – P. 1368–1375.
19. Прудников А.Н. Исследование комплексного модифицирования заэвтектических силуминов с содержанием кремния 20...30 % фосфидами и оксидами некоторых металлов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 1995. – № 2. – С. 38–41.
20. Прудников А.Н., Черенковская Е.А. Влияние комплексной обработки расплава фосфористой медью и оксидами некоторых металлов // Наследственность в литых сплавах. – Куйбышев: КПИ, 1987. – С. 99–100.

21. Прудников А.Н. Поршневые деформируемые заэвтектические силумины // Технология металлов. – 2014.– № 2.– С. 8–11.
22. Афанасьев В.К. Прудников А.Н. Модифицирование бинарного заэвтектического силумина // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1999. – № 10. – С. 33–35.
23. Непрерывное литье алюминиевых сплавов: справочник / В.И. Напалков, Г.В. Черепок, С.В. Махов и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – С. 512.
24. ГОСТ 1583-93. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия / Донецкий государственный институт цветных металлов. – Введ. 1997-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 24 с.

HARDENING OF EARTH CASTINGS FROM BINARY HYPEREUTECTIC SILUMINS

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 possibility of improving the structure and mechanical properties of binary hypereutectic silumins cast in sand-clay (earthen) forms was studied using the Al-20 % Si alloy as an example. The modifying composition based on phosphorus- and oxygen-containing substances (phosphorous copper, iron oxides) was optimized and the influence of melt processing parameters was determined. It has been established that a decrease in the temperature of the processing of the silumin melt from 900 to 820 ° C makes it possible to reduce the porosity score of castings from 3 to 2. Moreover, the hardening of the castings is not more than 10 %. It is shown that the introduction of a refining reagent into the modifier somewhat reduces the effectiveness of its effect on primary β -Si crystals. Thus, the use of manganese chloride in the modifier increases the size of primary silicon crystals by an average of 25 % in comparison with the modified alloy. However, the elimination of gas porosity in castings from hypereutectic silumin allows to increase their temporary tensile strength by 15–27 % compared with the properties of modified silumin.

Keywords

hypereutectic silumin, casting, structure, primary crystal silicon, eutectic, hardening.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Оформление русскоязычной части статьи, подаваемой в научно-технический и производственный журнал «Актуальные проблемы в машиностроении», должно соответствовать по стилю и содержанию определенным минимальным требованиям еще до того, как она будет принята на рассмотрение для публикации. Статьи, не соответствующие этим минимальным требованиям, получают мотивированный отказ редактора – их даже не отправляют на рассмотрение в редакционный совет. Вопросы новизны и оригинальности исследования решаются авторами статьи.

Отметим одно необходимое условие, сформировавшееся за время работы в журнале, – нельзя подавать на рассмотрение работу, которая предварительно не прошла оценки качества самим автором (и научным руководителем в случае недостаточного опыта автора в подготовке научных статей). Кроме того, текст должен быть внимательно прочитан всеми авторами (а не одним автором, как это зачастую бывает), так как все авторы несут коллективную ответственность за содержание работы.

1. Общие комментарии

Пишите доходчивым и простым языком – абстрактные формулировки и излишне длинные фразы трудны как для чтения, так и для понимания.

Статья не должна быть слишком длинной, даже если журнал не указывает максимального объема статьи. Пишите лаконично и грамотно, соблюдая правила написания по русскому языку.

Избегайте:

- неряшливости, например, многочисленных опечаток, небрежного стиля, маленьких иллюстраций, уравнений с ошибками и др.;
- длинного текста (абзаца), содержащего избыточные высказывания.

Научная статья должна иметь определенную структуру, которая описана ниже.

2. Заглавие и сведения об авторах

Используйте лаконичное описательное название, содержащее основные ключевые слова темы статьи. Перед заглавием обязательно указывается УДК.

После заглавия по порядку следуют И.О. ФАМИЛИЯ авторов, их ученая степень, ученое звание, в скобках указываются сокращенное название организации, город. Ниже – данные для переписки: Фамилия И.О. основного автора, почтовый адрес и полное название организации, e-mail.

3. Аннотация (реферат)

Аннотация содержит ключевые слова и представляет собой сжатый обзор содержания работы, указывает на основные проблемы, к которым обращается автор, на подход к этим проблемам и на достижения работы (не менее 10 строк).

4. Ключевые слова

Ключевые слова должны отображать и покрывать содержание работы. Ключевые слова служат профилем вашей работы для баз данных.

5. Введение

Раздел «Введение» должен быть использован для того, чтобы определить место вашей работы (подхода, данных или анализа). Подразумевается, что существует нерешенная или новая научная проблема, которая рассматривается в вашей работе. В связи с этим в данном разделе следует представить краткий, но достаточно информированный литературный обзор (до 2 стр.) по состоянию данной отрасли науки. Не следует пренебрегать книгами и статьями, которые были написаны, например, раньше, чем пять лет назад. В конце раздела «Введение» формулируются цели работы и описывается стратегия для их достижения.

6. Описание экспериментальной части и теоретической/вычислительной работы

6.1. Материал, испытываемые образцы и порядок проведения испытаний

Приводится обоснование выбора данного материала (или материалов) и методов описания материала (материалов) в данной работе.

При необходимости приводятся рисунки образцов с единицами измерения (единицы измерения только в системе СИ). При испытании стандартных образцов достаточно ссылки на стандарт. Для большой программы испытаний целесообразно использовать таблицу матричного типа. Если образцы взяты из слитков, заготовок или компонентов, то описывается их ориентация и нахождение в исходном материале, используются стандартные обозначения по ГОСТу.

При проведении испытаний приводится следующая информация.

1. Тип и условия испытаний, например, температура испытаний, скорость нагружения, внешняя среда.

2. Описываются переменные параметры, измеряемые величины и методы их измерения с точностью, степенью погрешности, разрешением и т.д.; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

6.2. Результаты экспериментов

Результаты предпочтительно представлять в форме графиков и описывать их словесно. Не следует писать о том, что ясно видно по графику.

6.3. По теоретической/вычислительной работе

Вышеперечисленные рекомендации актуальны также и для теоретической, и вычислительной работы. В статьях, основанных на вычислительной работе, необходимо указать тип конечного элемента, граничные условия и входные параметры. Численный результат представляется с учетом ограничений (точности) в применяемых вычислительных методах.

В статьях, основанных на аналитической работе, при изложении длинного ряда формул необходимо давать поясняющий текст, чтобы была понятна суть содержания работы. Правильность вычислений необходимо подтверждать промежуточными вычислениями. Так же как и в случае с экспериментальной работой, простого описания числовых или аналитических преобразований без рассмотрения теоретической (физической) первопричины обычно недостаточно, для того чтобы сделать публикацию такой статьи оправданной. Простой отчет о числовых результатах в форме таблиц или в виде текста, как и бесконечные данные по экспериментальной работе, без попытки определить или выдвинуть гипотезу о том, почему были получены такие результаты, без попытки выявить причинно-следственные связи, не украшают работу.

Сравнение ваших числовых результатов с числовыми результатами, полученными кем-то другим, может быть информативным. Но оно ничего не ДОКАЗЫВАЕТ. Контроль при помощи сравнения с общеизвестными решениями и проверка при помощи сравнения с экспериментальными данными являются обязательными.

7. Обсуждение

Необходимо использовать этот раздел для того, чтобы в полном объеме объяснить значимость вашего подхода, данных или анализа и результатов. Настоящий раздел упорядочивает и интерпретирует результаты. Цель раздела – показать, какие знания были получены в результате вашей работы, а также перспективу полученных результатов, сравнив их с существующим положением в данной области, описанным в разделе «Введение». Большое количество графиков и цветных иллюстраций не дает научного результата, это не презентация в *PowerPoint*. Обязанностью автора является упорядочение данных и систематическое представление результатов. Так, простой отчет о результатах испытаний без попытки исследовать внутренние механизмы не имеет большой ценности.

8. Выводы

Этот раздел обычно начинается с нескольких фраз, подводящих итог проделанной работе, а затем в виде списка представляются основные выводы. Следует быть лаконичным.

9. Список литературы

Прежде чем составить список литературы, необходимо ознакомиться с правилами оформления ссылок в журнале «Актуальные проблемы в машиностроении» на сайте научного издания <https://journals.nstu.ru/machine-building/rules>.

В списке литературы обязательно включайте иностранные источники (желательно не менее 50 %, исключение – публикации по региональной тематике); число цитируемой литературы чаще всего от 15 до 30 ссылок. Списки литературы (*References*) – это демонстрация вашей эрудиции, информированности о текущих исследованиях в данной области, поэтому цитируемые публикации должны быть как можно более новыми (но и увеличивать их чрезмерно, без причины тоже не следует). Ссылки на свои работы приветствуются, но проявляйте умеренность.

**Редакционный совет и редакция журнала
«Актуальные проблемы в машиностроении»**

ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

(структура, содержание и объем авторского резюме (аннотации) к научным статьям в журнале; фрагменты из работы **О. В. Кирилловой «Редакционная подготовка научных журналов для включения в зарубежные индексы цитирования: методические рекомендации. – Москва, 2012»**, кандидата технических наук, заведующей отделением ВИНТИ РАН, члена Консультативного совета по формированию контента (Content Selection and Advisory Board – CSAB) SciVerse Scopus, Elsevier)

Авторское резюме должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте авторского резюме. Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в авторском резюме, не приводятся.

В тексте авторского резюме следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, и избегать сложных грамматических конструкций. В тексте авторского резюме следует применять значимые слова из текста статьи. Текст авторского резюме должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначащих формулировок. Текст должен быть связным, разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого. Сокращения и условные обозначения применяют в исключительных случаях или дают их расшифровку и определения при первом употреблении в авторском резюме. В авторском резюме не делаются ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Объем текста авторского резюме определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), но не менее 100–250 слов (для русскоязычных публикаций – предпочтительнее больший объем).

Пример авторского резюме на русском языке

Значительная часть инновационных планов по внедрению изменений, содержащих в своей основе нововведения, либо не доходит до практической реализации, либо в действительности приносит гораздо меньше пользы, чем планировалось. Одна из причин этих тенденций кроется в отсутствии у руководителя реальных инструментов по планированию, оценке и контролю над инновациями. В статье предлагается механизм стратегического планирования компании, основанный на анализе как внутренних возможностей организации, так и внешних конкурентных сил, поиске путей использования внешних возможностей с учетом специфики компании. Стратегическое планирование опирается на свод правил и процедур, содержащих серию методов, использование которых позволяет руководителям компаний обеспечить быстрое реагирование на изменение внешней конъюнктуры. К таким методам относятся: стратегическое сегментирование; решение проблем в режиме реального времени; диагностика стратегической готовности к работе в условиях будущего; разработка общего плана управления; планирование предпринимательской позиции фирмы; стратегическое преобразование организации. Процесс стратегического планирования представлен в виде замкнутого цикла, состоящего из 9 последовательных этапов, каждый из которых представляет собой логическую последовательность мероприятий, обеспечивающих динамику развития системы. Результатом разработанной автором методики стратегического планирования является предложение перехода к «интерактивному стратегическому менеджменту», который в своей концептуальной основе ориентируется на творческий потенциал всего коллектива и изыскание путей его построения на базе оперативного преодоления ускоряющихся изменений, возрастающей организационной сложности и непредсказуемой изменчивости внешнего окружения.

Это же авторское резюме на английском языке

A considerable part of innovative plans concerning implementation of developments with underlying novelties either do not reach the implementing stage, or in fact yield less benefit than anticipated. One of the reasons of such failures is the fact that the manager lacks real tools for planning, evaluating and controlling innovations. The article brings forward the mechanism for a strategic planning of a company, based on the analysis of both inner company's resources, and outer competitive strength, as well as on searching ways of using external opportunities with account taken of the company's specific character. Strategic planning is based on a code of regulations and procedures containing a series of methods, the use of which makes it possible for company's manager to ensure prompt measures of reaction to outer business environment changes. Such methods include: strategic segmentation; solving problems in real-time mode; diagnostics of strategic

readiness to operate in the context of the future; working out a general plan of management; planning of the business position of the firm; strategic transformation of the company. Strategic planning process is presented as a closed cycle consisting of 9 successive stages, each of them represents a logical sequence of measures ensuring the dynamics of system development. The developed by the author strategic planning methods result in the recommendation to proceed to "interactive strategic management" which is conceptually based on the constructive potential of the collective body, on searching ways of its building on the basis of effective overcoming accelerating changes, increasing organizational complexity, and unpredictable changeability of the environment.

Пример структурированного авторского резюме из иностранного журнала в Scopus

Purpose: Because of the large and continuous energetic requirements of brain function, neurometabolic dysfunction is a key pathophysiologic aspect of the epileptic brain. Additionally, neurometabolic dysfunction has many self-propagating features that are typical of epileptogenic processes, that is, where each occurrence makes the likelihood of further mitochondrial and energetic injury more probable. Thus abnormal neurometabolism may be not only a chronic accompaniment of the epileptic brain, but also a direct contributor to epileptogenesis.

Methods: We examine the evidence for neurometabolic dysfunction in epilepsy, integrating human studies of metabolic imaging, electrophysiology, microdialysis, as well as intracranial EEG and neuropathology.

Results: As an approach of noninvasive functional imaging, quantitative resonance spectroscopic imaging (MRSI) measured abnormalities of mitochondrial and energetic dysfunction (via ^1H or ^31P spectroscopy) are related to several pathophysiologic indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative ^{13}C -glucose turnover studies show a profound decrease in neurotransmitter (glutamate-glutamine) cycling relative to oxidation in the sclerotic hippocampus. Increased extracellular glutamate (which has long been associated with increased seizure likelihood) is significantly linked with declining energetics as measured by ^31PMR , as well as with increased EEG measures of Teager energy, further arguing for a direct role of glutamate with hyperexcitability.

Discussion: Given the important contribution that metabolic performance makes toward excitability in brain, it is not surprising that numerous aspects of mitochondrial and energetic state link significantly with electrophysiologic and microdialysis measures in human epilepsy. This may be of particular relevance with the self-propagating nature of mitochondrial injury, but may also help define the conditions for which interventions may be developed. © 2008 International League Against Epilepsy.

Фрагменты из рекомендаций авторам журналов издательства Emerald

Авторское резюме (реферат, abstract) является кратким резюме большей по объему работы, имеющей научный характер, которое публикуется в отрыве от основного текста и, следовательно, само по себе должно быть понятным без ссылки на саму публикацию. Оно должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Авторское резюме выполняет функцию справочного инструмента (для библиотеки, реферативной службы), позволяющего читателю понять, следует ли ему читать или не читать полный текст.

Авторское резюме включает следующее.

1. Цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью.

2. Кратко излагая основные факты работы, необходимо помнить следующие моменты:

- следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;

- не включать несущественные детали;

- вы пишете для компетентной аудитории, поэтому можете использовать техническую (специальную) терминологию вашей дисциплины, четко излагая свое мнение и имея также в виду, что вы пишете для международной аудитории;

- текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т. д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.), либо разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать один из другого;

- необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т. е. "The study tested", но не "It was tested in this study" (частая ошибка российских аннотаций);

- стиль письма должен быть компактным (плотным), поэтому предложения, вероятнее всего, будут длиннее, чем обычно.

Примеры, как не надо писать реферат, приведены на сайте издательства (<http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/abstracts.htm?part=3&>).

На сайте издательства также приведены примеры хороших рефератов для различных типов статей (обзоры, научные статьи, концептуальные статьи, практические статьи):

<http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/abstracts.htm?part=2&PHPSESSID=hdac5rtkb73ae013ofk4g8nrv1>.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Научно-технический и производственный журнал «Актуальные проблемы в машиностроении» (*Print ISSN: 2313-1020; Online ISSN: 2542-1093*) публикует статьи, содержащие новые и оригинальные результаты исследований. Журнал представлен на сайте НГТУ: <http://journals.nstu.ru/machine-building> и <http://machine-building.conf.nstu.ru/>. Электронная версия издания доступна на платформе eLIBRARY. Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. Публикация статей бесплатная.

Для того, чтобы подать статью, автор и все соавторы должны быть зарегистрированы на сайте журнала (при регистрации профиля автора должны быть заполнены все поля). Автор (один из соавторов) в своем кабинете выбирает в меню пункт «Подать статью» и вводит все необходимые данные. Своих соавторов при этом он выбирает из списка зарегистрированных пользователей.

Для регистрации перейдите по ссылке: <http://journals.nstu.ru/machine-building/registration>

Обращаем Ваше внимание! Если Вы зарегистрированы на сайте научно-технического и производственного журнала «Обработка металлов (технология · оборудование · инструменты)», то для подачи своей работы на сайте журнала «Актуальные проблемы в машиностроении» необходимо использовать тот же логин и пароль.

ПОДГОТОВКА РУКОПИСИ

Рукопись статьи готовится в соответствии с правилами оформления журнала (см. ниже) «Актуальные проблемы в машиностроении» в редакторе MS Word и прикрепляется в формате *.doc, *.docx.

Сканированные Лицензионный договор с подписями авторов, Экспертное заключение о возможности открытого опубликования статьи и Заключение внутривузовской комиссии по экспортному контролю о возможности использования научных материалов при международном сотрудничестве (если предусмотрено ВУЗом) (цветной режим сканирования, разрешение не менее 300 dpi) необходимо также прикрепить на сайте журнала в разделе «Подать статью» в формате *.pdf, *.jpg, *.jpeg. Поскольку, в оболочке при подаче статьи существует только одна опция «Скан экспертного заключения», необходимо «Экспертное заключение о возможности открытого опубликования статьи» и «Заключение внутривузовской комиссии по экспортному контролю о возможности использования научных материалов при международном сотрудничестве» объединить в один документ (многостраничный) и загрузить сформированный файл.

По окончании всех работ обязательно нажать кнопку «Отправить в редакцию».

Обращаем внимание, что авторы должны дополнительно отправить заявку на участие, в которой указать фамилию, имя и отчество (Ф.И.О. полностью), должность, ученую степень, звание, тематика доклада (Иновационные технологии в машиностроении; Технологическое оборудование, оснастка и инструменты; Материаловедение в машиностроении; Экономика и организация инновационных процессов в машиностроении), название организации, адрес, телефон, факс, e-mail. Заявку можно отправить на e-mail: metal_working@mail.ru, либо написать «Сообщение» в своем авторском профиле.

Бронированием мест в гостиницах участники занимаются самостоятельно. На сайте конференции, в разделе «Контакты» (<http://machine-building.conf.nstu.ru/archive/>), представлены адреса возможных гостиниц для размещения участников конференции в г. Новосибирске.

Одновременно со статьей высылаются оригиналы всех перечисленных документов на почтовый адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 137 ВЦ, зам. гл. редактора Скибе В.Ю.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РУКОПИСЕЙ

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

Текст набирается в русифицированном редакторе *Microsoft Word*; формат А4 (210×297 мм); ориентация – книжная, все поля 2 см; без переносов; шрифт Times New Roman, размер шрифта основного текста – 14 пт, через 1 интервал, абзацный отступ – 1,25 см, страницы не нумеруются. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть включены в текст работы.

Единицы физических величин. При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц (СИ).

Таблицы нумеруются, если их число более одной. Заголовок необходим, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

Математические формулы. Сложные и многострочные формулы должны быть целиком набраны в редакторе формул *Microsoft Equation 3.0*. Используется только сквозная нумерация.

Рисунки. Рекомендуемые размеры рисунков: 60 × 150, 60 × 70 мм с разрешением не менее 300 dpi.

Библиографический список, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка», составляется по ходу упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Ссылки в тексте на литературу даются в квадратных скобках, например [1], [2, 3], [4–7], [4, стр. 23–28].

Англоязычный блок должен включать следующую информацию: *Заглавие работы; Фамилию И.О. (всех авторов); Аффiliation всех авторов; Аннотация (Abstract) 100-150 слов; Ключевые слова (Keywords).*

Научная публикация должна иметь следующую структуру:

1. **Заглавие** (должно быть как можно короче и отражать содержание текста).
2. **Аннотация:**
 - *на русском языке* на основе ГОСТ 7.9-95 – сжатый обзор содержания работы (по ГОСТ не менее 10 строк, 850 знаков), указывает на ключевые проблемы, на подход к этим проблемам и на достижения работы; следует применять значимые слова из текста статьи;
 - *на английском языке* - по объему больше аннотации на русском языке и включает 100 - 250 слов, рекомендуется следовать хронологии статьи, использовать англоязычную специальную терминологию, не включать несущественные детали и использовать активный, а не пассивный залог, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке).
3. **Ключевые слова** (должны отображать содержание работы). На английском языке - использовать термины из контролируемых словарей.
4. **Введение** (краткий обзор по состоянию проблемы с цитатами или ссылками на актуальную литературу; в конце раздела необходимо сформулировать цель или задачу нового исследования и то как вы это сделали).
5. **Теория** (для теоретических работ) или **методика** экспериментального исследования (для экспериментальных работ). Следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).
6. **Результаты и обсуждение.**
7. **Выводы** (по результатам работы, описанной в данной статье; следует быть лаконичным).
8. **Список литературы:** не менее 15 – 25 наименований источников (оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка»). Составляется по ходу упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Ссылки в тексте на литературу даются в квадратных скобках, например [1], [2, 3], [4–7], [4, стр. 23–28]. Внимание авторы, в работе не должно быть более 30 % собственных статей, не менее 50 % - литература за последние 10 лет, обязательно включайте иностранные источники (желательно не менее 50 %).
9. **Англоязычный блок статьи** подготавливается на следующей странице, сразу же после русскоязычного списка литературы. Правила оформления данного раздела работы представлены ниже.
10. **Сведения для РИНЦ.**

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ АНГЛОЯЗЫЧНОГО БЛОКА СТАТЬИ В ЖУРНАЛЕ «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ»

Англоязычная часть статьи должна включать в себя:

Заголовок (Title), переведенный с русского языка. В переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен и др. объектов, имеющих собственные названия; также не используется непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это также касается авторских аннотаций и ключевых слов;

Аффiliation (Affiliation).

Для каждого автора указывается: *Фамилия* и первые буквы *Имени* и *Отчества*, *степень*, *звание*, *должность*, *адрес электронной почты (e-mail)*, адресные данные [*официальное название организации на английском языке, которую он представляет, полный почтовый адрес организации (включая название улицы, город, почтовый индекс, страна)*]. Для указания степени, звания и должности можно воспользоваться справочными материалами, представленными на сайте журнала: http://journals.nstu.ru/files/2_4/affiliation.doc;

Аннотация (Abstract) - по объему больше аннотации на русском языке и включает **100 - 250 слов**, рекомендуется следовать хронологии статьи, использовать англоязычную специальную терминологию, не включать несущественные детали и использовать активный, а не пассивный залог, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке);

Ключевые слова (Keywords);

Информация об источниках финансирования исследования (Funding) (гранты, если необходимо).

Внимание! Авторам запрещается предоставлять переводы заголовков статей, аннотаций, ключевых слов и информации об источниках финансирования, подготовленные с помощью электронных переводных систем (работы с ошибками и некорректным переводом будут отклонены).

ОФОРМЛЕНИЕ АНГЛОЯЗЫЧНОГО БЛОКА СТАТЬИ В ЖУРНАЛЕ «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (ТЕХНОЛОГИЯ • ОБОРУДОВАНИЕ • ИНСТРУМЕНТЫ)»

Уважаемые Авторы, в связи с включением журнала «*Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)*» в международную базу данных библиографического описания и научного цитирования *Web of*

Science изменены правила оформления представляемых рукописей. Главная цель изменений состоит в том, чтобы сделать основные положения и выводы публикуемых в журнале статей доступными для широкой зарубежной аудитории, не владеющей русским языком. Особое значение теперь приобретают англоязычная аннотация к статье (*Abstract*) и список использованной автором литературы (*References*), поскольку именно они, а не текст самой статьи, находят отражение в системах *Scopus* и *Web of Science*. По своему содержанию и информативности *Abstract* и *References* должны привлечь внимание зарубежных читателей к теме статьи. Соответственно, в интересах автора тщательно подойти к подготовке этих блоков статьи и обеспечить их максимально высокое качество.

Англоязычная часть статьи подготавливается на следующей странице, сразу же после *русскоязычного списка литературы* и включается в себя:

- **Заголовок (*Title*)**, переведенный с русского языка. В переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен и др. объектов, имеющих собственные названия; также не используется непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это также касается авторских аннотаций и ключевых слов;

- **Аффилиация (*Affiliation*)**.

Для каждого автора указывается: *Фамилия* и первые буквы *Имени* и *Отчества*, *степень*, *звание*, *должность*, *адрес электронной почты (e-mail)*, адресные данные [*официальное название организации* на английском языке, которую он представляет, *полный почтовый адрес организации (включая название улицы, город, почтовый индекс, страна)*]. Для указания *степени*, *звания* и *должности* необходимо воспользоваться следующими справочными материалами;

- **Аннотация (*Abstract*)** - по объему больше аннотации на русском языке и включает **не менее 250 слов**, рекомендуется следовать хронологии статьи, использовать англоязычную специальную терминологию, не включать несущественные детали и использовать активный, а не пассивный залог, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке);

- **Ключевые слова (*Keywords*)**;

- **Список литературы (*References*)**. Ссылки на источники в англоязычном списке должны совпадать со ссылками, представленными в русскоязычном списке использованной литературы.

Список **всей** использованной в статье литературы дается на **латинице** (источники на англ., фр., нем. и др. языках – в оригинале, русскоязычные источники необходимо транслитерировать и переводить (правила оформления см. ниже)). Для автоматической транслитерации в латиницу рекомендуется обращаться на сайт <http://translit.ru> (стандарт транслитерации – **BSI**; настройка перед транслитерацией).

- **Информация об источниках финансирования исследования (*Funding*)** (гранты, если необходимо).

Внимание! Авторам запрещается предоставлять переводы заголовков статей, аннотаций, ключевых слов и информации об источниках финансирования, подготовленные с помощью электронных переводных систем (работы с ошибками и некорректным переводом будут отклонены)

Правила подготовки списка литературы в англоязычном блоке статьи*

Списки литературы в российских журналах включают большое разнообразие русскоязычных источников: журналы, материалы конференций, сборники, монографии, патенты, диссертации, отчеты, законы, постановления и пр. Поэтому постоянно возникают вопросы, как готовить для *References* описания этих публикаций.

Для подготовки описания этих видов документов необходимо учитывать тот факт, что эти публикации отсутствуют в системе и не предназначены для установления соответствий между публикациями и ссылками на них. Однако они также должны быть обязательно представлены в романском алфавите. Поэтому их описания можно делать достаточно короткими. Исключение составляют переводные книги, в основном, монографии.

Если готовить ссылки в *References* с пониманием цели их представления в системе, тогда существует ряд правил, выполняя которые можно получить максимальное число связанных с публикациями ссылок в журнале. К таким правилам можно отнести:

- 1) представлять в *References*, вместо русскоязычного варианта описания журнала, описание его переводной версии, которая, скорее всего, будет или уже представлена в *Scopus*;

- 2) так как известно, что описания включаемых в зарубежные индексы цитирования и другие базы данных публикаций даются по их англоязычному блоку, то в самом идеальном случае в *References* можно включать переводное название статьи в том виде, как оно указано в журнале (и потом - в базе данных). В таком случае транслитерация заглавия статьи не требуется, но указывается в скобках после ее описания язык публикации (**in Russian**);

* По материалам работ *О. В. Кирилловой*: 1. Редакционная подготовка научных журналов для включения в зарубежные индексы цитирования: методические рекомендации. М., 2012, 68 с.; 2. Редакционная подготовка научных журналов по международным стандартам. Рекомендации эксперта БД *Scopus*. М., 2013. Ч. 1. 90 с.

3) представлять в *References*, вместо переводного издания книги (монографии), описание оригинальной ее версии, так как индексы цитирования все больше включают книг в свои ресурсы, в т.ч. *Scopus*. Переводная версия может быть также описана, как дополнительные сведения (в скобках), см. пример ниже;

4) представление в *References* только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо, так как делает такое описание совершенно не читаемым (еще как-то понятным для русскоязычного читателя, но не понятным по содержанию больше никому). Поэтому, если нужно сократить описание, то лучше приводить его переводное описание с указанием в скобках (**in Russian**). Это в большей степени относится к анонимным (не авторским) произведениям: законодательным, нормативным документам, а также к патентам, диссертациям, отчетам и другим не типичным для индексов цитирования документам;

5) при описании изданий без авторов (сборников, коллективных монографий) допускается вместо авторов писать одного, максимум двух редакторов издания;

6) для неопубликованных документов можно делать самое короткое название с указанием в скобках (**unpublished**), если оно имеет авторство (для учета ссылок автора), либо просто “**Unpublished Source**” или “**Unpublished Report**” и т.д., если авторство в документе отсутствует;

7) так как русскоязычные источники трудно идентифицируются зарубежными специалистами, рекомендуется в описаниях оригинальное название источника выделять курсивом, как в большинстве зарубежных стандартов;

8) если описываемая публикация имеет doi, его обязательно надо указывать в библиографии в *References*, так как этот идентификатор является наиболее точным источником информации о статье и по нему производится связка “ссылка - публикация”;

9) нежелательно в ссылках делать произвольные сокращения названий источников. Это часто приводит к потере связи, так как название может быть не идентифицировано.

10) все основные выходные издательские сведения (в описаниях журнала: обозначение тома, номера, страниц; в описаниях книг: место издания - город, обозначение издательства (кроме собственного непереводного имени издательства, оно транслитерируется)) должны быть представлены на английском языке.

11) в описаниях русскоязычных учебников, учебных пособий не надо указывать тип изданий. Эта информация в ссылках в данном случае является избыточной.

12) в выходных данных публикаций в ссылках (статей, книг) необходимо указывать количество страниц публикации: диапазон страниц в издании указывается “pp.” перед страницами; количество страниц в полном издании (книге) - указывается как “p.” после указания количества страниц;

13) перевод заглавия статьи или источника берётся в квадратные скобки; иногда используются круглые скобки, однако, если квадратные скобки используются редко для других целей в описаниях изданий, то круглые скобки могут иметь другое предназначение, поэтому их использование может вызвать путаницу в описаниях;

14) одна публикация описывается в списке литературы один раз, независимо от того, сколько раз в тексте публикации был упомянут источник;

15) если книга в списке литературы (в любом варианте - основном или в *References*) описывается полностью, тогда в библиографии должен быть указан полный объем издания, независимо от того, какие страницы издания были процитированы в тексте; исключения составляют случаи, когда используются отдельные главы из книги; в этом варианте в списке литературы дается описание главы, с указанием страниц “от-до”.

16) использовать системы автоматического перевода кириллицы в романский алфавит; не делать транслитерацию вручную. Это позволит избежать ошибок транслитерации.

Для транслитерации русских слов целесообразно использование сайта: <http://translit.net/>

Нужно войти в программу **Translit.net**, включить русский язык, выбрать вариант стандарта транслитерации **BSI (British Standard Institute)**, вставить в нужное поле текст ссылки на русском языке и нажать «**в транслит**».

Последние два пункта «правил» относятся к процессу составления библиографии в целом. Ниже приведены примеры ссылок на различные виды публикаций.

Описание статьи из журналов:

Atapin V.G., Skeebeba V.Yu. Chislennoe modelirovanie beskarkasnykh arochnykh pokrytii [Numerical simulation of frameless arched covers]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2012, no. 4(57), pp. 23–27.

Kiselev E.S., Unyanin A.N., Kurzanova Z.S., Kuznetsova M.A. Sovremennye smazочно-okhlazhdayushchie zhidkosti [Modern coolants]. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*, 1996, no. 7, pp. 30-34.

Описание статьи из электронного журнала:

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B.P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *Journal of Computer- Mediated Communication*, 1999, vol. 5, no. 2. Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (Accessed 28 April 2011).

Если статья имеет DOI – обязательно указать его!

Описание статьи с DOI:

Abul'khanov S.R., Goryainov D.S., Skuratov D.L., Shvetsov A.N. Formation of the surface layer in diamond smoothing. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, iss. 2, pp. 147-149. doi: 10.3103/S1068798X15020033

Ding H.T., Shin Y.C. Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, iss. 1, pp. 106-114. doi:10.1016/j.ijmachtools.2009.09.001

Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов)

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. [Experimental study of the strength of joints "steelcomposite"]. *Trudy MGTU «Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem»* [Proceedings of the Bauman MSTU "Mathematical Modeling of Complex Technical Systems"], 2006, no. 593, pp. 125–130. (In Russian)

Описание материалов конференций:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalina I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursoberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi"* [Proceedings 6th International Symposium "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"]. Moscow, 2007, pp. 267–272. (In Russian).

Нежелательно оставлять только переводное название конференции, так как оно при попытке кем-либо найти эти материалы, идентифицируется с большим трудом.

Sen'kin A.V. [Issues of vibration diagnostics of elastic spacecraft]. *Problemy teorii i praktiki v inzhenernykh issledovaniyakh. Trudy 33 nauchnoi konferentsii RUDN* [Problems of the Theory and Practice of Engineering Research. Proc. Russ. Univ. People's Friendship 33rd Sci. Conf.]. Moscow, 1997, pp. 223-225. (In Russian)

Описание книги (монографии, сборники):

Nenashev M.F. *Poslednee pravitel'stvo SSSR* [Last government of the USSR]. Moscow, Krom Publ., 1993. 221 p.

Ot katastrofy k vozrozhdeniyu: prichiny i posledstviya razrusheniya SSSR [From disaster to rebirth: the causes and consequences of the destruction of the Soviet Union]. Moscow, HSE Publ., 1999. 381 p.

Lindorf L.S., Mamikonians L.G., eds. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 352 p.

Kanevskaya R.D. *Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdenii uglevodorodov* [Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbon deposit development]. Izhevsk, 2002. 140 p.

Izvekov V.I., Serikhin N.A., Abramov A.I. *Proektirovanie turbogeneratorov* [Design of turbo-generators]. Moscow, MEI Publ., 2005, 440 p.

Latyshev V.N. *Tribologiya rezaniya. Kn. 1: Friksionnye protsessy pri rezanie metallov* [Tribology of Cutting, Vol. 1: Frictional Processes in Metal Cutting], Ivanovo, Ivanovskii Gos. Univ. Publ., 2009. 245 p.

Belousov, A.I., Bobrik, P.I., Rakhman_Zade, A.Z. *Teplovye yavleniya i obrabatyvaemost' rezaniem aviatsionnykh materialov. Trudy MATI* [Thermal Phenomena and the Ease of Cutting of Aviation Materials: Proceedings of the Moscow Aviation Engineering Institute]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966, no. 64.

Последняя ссылка является не полной. Из нее непонятно, описывается ли книга в целом (монография), выпущенная в серии трудов института, или это статья (в описании без заглавия статьи). Недостает в этом случае указания страниц. Если монография, тогда указывается, сколько всего страниц (235 p.), если статья - диапазон страниц или одна страница (pp. 220-222). Однако в любом случае эта ссылка будет найдена при поиске публикаций авторов.

Описание переводной книги:

Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. *Kolebaniya v inzhenernom dele*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.).

Brooking A., Jones P., Cox F. *Expert systems. Principles and case studies*. Chapman and Hall, 1984. 231 p. (Russ. ed.: Bruking A., Dzhons P., Koks F. *Ekspertnye sistemy. Printsipy raboty i primery*. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1987. 224 p.).

Если можно выявить оригинал, по которому был сделан перевод книги, тогда полезно описать его как основное название, вместо переводного. Такой вариант описания позволяет найти публикации авторов в действительном представлении их фамилий, а отличии от переводной версии (по все правилам, при переводе описания в латиницу фамилии авторов транслитерируются, что значительно искажает его настоящее написания - пример выше это хорошо демонстрирует).

Когда не удастся выявить сведения об оригинальной версии книги, либо переводная версия является, например, сборником из нескольких зарубежных изданий, в основном описании остается переводное издание.

Описание неопубликованного документа:

Latypov A.R., Khasanov M.M., Baikov V.A. *Geology and Production (NGT GiD). The Certificate on official registration of the computer program*. No. 2004611198, 2004. (In Russian, unpublished).

Pressure generator GD-2M. Technical description and user manual. Zagorsk, Res. Inst. of Appl. Chem. Publ., 1975. 15 p. (In Russian, unpublished).

Описание Интернет-ресурса:

Kondrat'ev V.B. *Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost'* [The global pharmaceutical industry]. Available at: http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmatsevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html. (accessed 23.06.2013)

APA Style (2011). Available at: <http://www.apastyle.org/apa-style-help.aspx> (accessed 05.02.2011).

Описание диссертации или автореферата диссертации:

Seменов V.I. *Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyi tor*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

Grigor'ev Iu.A. *Razrabotka nauchnykh osnov proektirovaniia arkhitektury raspredelennykh sistem obrabotki dannykh*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development of scientific bases of architectural design of distributed data processing systems. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1996. 243 p.

Описание ГОСТа:

GOST 8.586.5-2005. Metodika vypolneniia izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkosti i gazov spomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroystv [State Standard 8.586.5 - 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

или

State Standard 8.586.5-2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p. (In Russian)

Описание патента:

Palkin M.V., et al. *Sposob orientirovaniia po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoi golovkoi samonavedeniia* [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF, no. 2280590, 2006.

В описании не все авторы, как дано в основном списке литературы. Если работать с *References* добросовестно, тогда можно найти патент и дополнить авторов.

Описание авторского свидетельства (Inventor's Certificate) – аналогично.

Описание анонимных документов:

Russian Pharmaceutical Market. Results of 2010. The Analytical Review. DSM Group, 2011. 74 p. (In Russian)

Current status of the Russian pharmaceutical industry and international experience. Materials for the working group of the Commission for Modernization and Technological Development of Russia's Economy. Available at: <http://www.strategy.ru>. (In Russian)

Code of Business Conduct of OJSC "LUKOIL". Available at: http://www.lukoil.ru/materials/doc/documents/lukoil_corp_code.pdf. (In Russian)

RF Federal Law "On Protection of Consumers' Rights" of February 07, 1992 N 2300-1 (as amended by Federal Law of January 09, 1996 N 2 FZ, December 17, 1999 N 212 FZ). (In Russian)

Подписано в печать 28.02.2020. Выход в свет 09.03.2020. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Тираж 20 экз. Уч.-изд. л. 37,2. Печ. л. 20. Изд. № 45. Заказ № 443.

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

ОБРАБОТКА

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

О МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» – рецензируемый научно-технический и производственный журнал, издающийся с 1999 года с периодичностью 4 раза в год.

В журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения, материаловедения и современной металлургии. Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. **Публикация статей бесплатная.**

Журнал предназначен для профессорско-преподавательского состава и научных работников высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников производственных предприятий и проектных организаций.

Присутствуют разделы: «Технология», «Оборудование», «Инструменты», «Материаловедение», «Научно-техническая информация» и др.



В 2017 году журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» вошел в индекс цитирования *Emerging Sources Citation Index (ESCI)* базы *Web of Science*. Журналы, представленные в индексе цитирования *ESCI*, отвечают большинству базовых критериев *Core Collection* и расцениваются компанией *Clarivate Analytics* как наиболее влиятельные и востребованные издания, имеющие большую вероятность высокого научного интереса.



Полный текст журнала «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» можно найти в базах данных компании EBSCO Publishing на платформе EBSCOhost. EBSCO Publishing является ведущим мировым агрегатором научных и популярных изданий, а также электронных и аудиокниг.



Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

Правила представления статей для публикации и другая информация о журнале размещены на сайте научного издания:



http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, корп. 5, к. 137 ВЦ



+7 (383) 346-17-75



metal_working@mail.ru
metal_working@corp.nstu.ru

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-23961 от 05 апреля 2006 г.

Print ISSN: 1994-6309 Online ISSN: 2541-819X

Индекс журнала в каталоге агентства «Роспечать» – 70590



НОВОСИБИРСК

