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

Том 8, Номер 3–4 2021

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

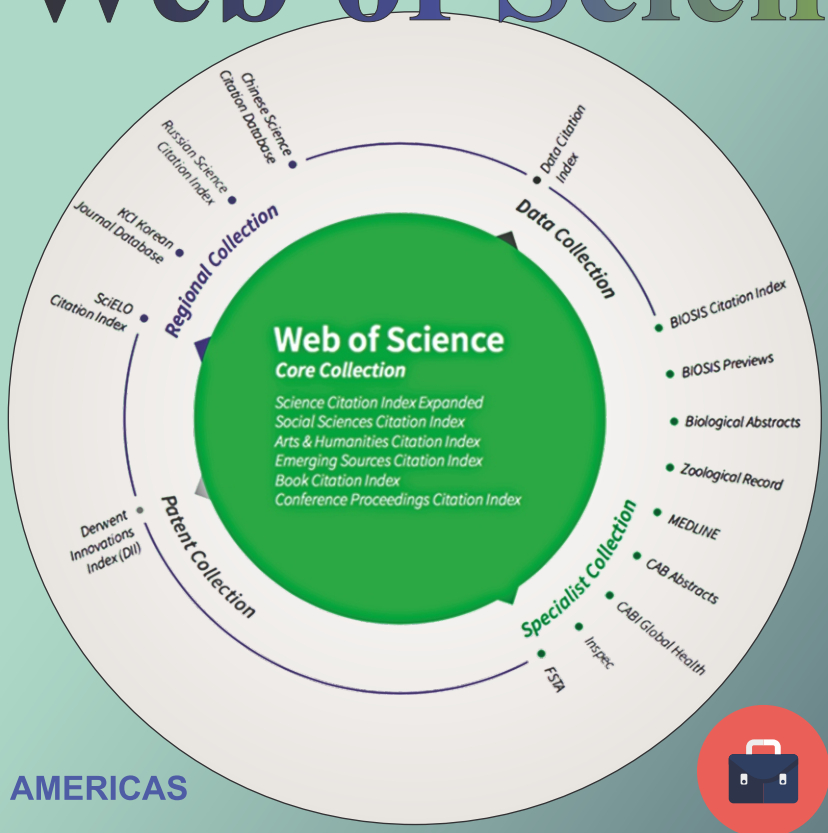
ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING

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 8 № 3-4 2021 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, **Иванцивский 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, **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 – 2 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 **16+**

ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING

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

Volume 8 Number 3-4 2021 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 «VNIIINSTRUMENT», *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*;
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 – 2 numbers 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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ

III ВСЕРОССИЙСКАЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

г. Чебоксары, 01…03 июня 2021 г.

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- **Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова**, г. Чебоксары, Россия

СООРГАНИЗАТОРЫ

- **Новосибирский государственный технический университет**, **научно-технический и производственный журнал «Актуальные проблемы в машиностроении»**, г. Новосибирск, Россия
- **Севастопольский государственный университет,** г. Севастополь, Россия
- **Волгоградский государственный технический университет**, г. Волгоград, Россия

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Александров А.Ю., ректор ЧГУ им. И.Н. Ульянова (г. Чебоксары), **председатель;** ***Лобанов Д.В.***, д.т.н., доцент, ЧГУ им. И.Н. Ульянова (г. Чебоксары), **сопредседатель;** ***Янюшкин А.С.***, д.т.н., профессор, ЧГУ им. И.Н. Ульянова (г. Чебоксары), **сопредседатель.**
Члены программного комитета: ***Братан С.М.*** – д.т.н., профессор, СевГУ, г. Севастополь; ***Носенко В.А.*** - д.т.н., профессор, ВолгГТУ, г. Волгоград; ***Скиба В.Ю.*** – к.т.н., доцент, НГТУ, главный редактор научно-технического и производственного журнала «Актуальные проблемы в машиностроении», г. Новосибирск; ***Гартфельдер В.А.*** - к.т.н., профессор, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары.

ПАРТНЕРЫ

Концерн Тракторные заводы	ЭЛАРА
ФОНД ВЕНЧУРНЫХ ИНВЕСТИЦИЙ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СФЕРЕ ЧУВАШСКОЙ РЕСПУБЛИКИ	Музей истории трактора

ПОЧЕТНЫЙ КОМИТЕТ

Абсадыков Б.Н. **-** д.т.н., профессор, КБТУ, г. Алматы; ***Аликулов Д.Е.*** **-** д.т.н., профессор, ТГТУ, г. Ташкент; ***Алибеков С.Я.*** **-** д.т.н., профессор, ПГТУ, г. Йошкар-Ола; ***Артамонов Е.В.*** **-** д.т.н., профессор, ТИУ, г. Тюмень; ***Батаев А.А.*** **-** д.т.н., профессор, НГТУ, г. Новосибирск; ***Батаев В.А.*** **-** д.т.н., профессор, НГТУ, г. Новосибирск; ***Болдырев А.И.*** **-** д.т.н., профессор, ВГТУ, г. Воронеж; ***Вальтер Хельге*** - генеральный директор компании «Walther schweisstechnik», г. Вена, Австрия; ***Васильев С.А.*** - д.т.н., доцент, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары; ***Горелов В.А.*** **-** д.т.н., профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва; ***Григорьев В.С.*** – ст. преподаватель, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары; ***Гусев В.В.*** **-** д.т.н., профессор, ДонНТУ, г. Донецк; ***Денисенко А.Ф.*** **-** д.т.н., профессор, СамГТУ, г. Самара; ***Ереско С.П.*** **-** д.т.н., профессор, СФУ, г. Красноярск; ***Иванцивский В.В.*** **-** д.т.н., профессор, НГТУ, г. Новосибирск; ***Илларионов И.Е.*** **-** д.т.н., профессор, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары; ***Киричек А.В.*** **-** д.т.н., профессор, БГТУ, г. Брянск; ***Киселев Е.С.*** **-** д.т.н., профессор, УГТУ, г. Ульяновск; ***Козлов А.М.*** **-** д.т.н., профессор, ЛГТУ, г. Липецк; ***Лебедев В.А.*** **-** д.т.н., профессор, ДГТУ, г. Ростов-на-Дону; ***Леонов С.Л.*** **-** д.т.н., профессор, АлтГТУ, г. Барнаул; ***Макаров В.Ф.*** **-** д.т.н., профессор, ВГТУ, г. Воронеж; ***Марков А.М.*** **-** д.т.н., профессор, АлтГТУ, г. Барнаул; ***Михайлов А.Н.*** **-** д.т.н., профессор, ДонНТУ, г. Донецк; ***Носов Н.В.*** **-** д.т.н., профессор, СамГТУ, г. Самара; ***Попов А.Ю.*** **-** д.т.н., профессор, ОмГТУ, г. Омск; ***Реченко Д.С.*** **-** д.т.н., доцент, ОмГТУ, г. Омск; ***Смоленцев В.П.*** **-** д.т.н., профессор, ВГТУ, г. Воронеж; ***Сорилов М.Ю.*** **-** д.т.н., профессор, КнАГУ, г. Комсомольск-на-Амуре; ***Смирнов В.М.*** - к.т.н., доцент, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары; ***Табаков В.П.*** **-** д.т.н., профессор, УГТУ, г. Ульяновск; ***Тамаркин М.А.*** **-** д.т.н., профессор, ДГТУ, г. Ростов-на-Дону; ***Федонин О.Н.*** **-** д.т.н., профессор, БГТУ, г. Брянск; ***Чен Лоусон*** – генеральный директор компании «Shanghai Hiwave Advanced Materials Technology Co., Ltd.», г. Шанхай, Китай ***Шалунов Е.П.*** - к.т.н., профессор, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары; ***Шеров К.Т.*** **-** д.т.н., профессор, КарГТУ, г. Караганда.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Лобанов Д.В. - д.т.н., доцент, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, зам. гл. редактора научно-технического и производственного журнала «Актуальные проблемы в машиностроении», г. Чебоксары; ***Борисов М.А.*** - к.т.н., доцент, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары; ***Секлетина Л.С.*** - ст. преподаватель, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары; ***Рафанова О.***С. – зав. межкаф. учеб. лаб. МСФ ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары; ***Купцов М.В.*** – **ответственный секретарь конференции**, ст. преподаватель, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары; ***Владимирова Ю.О.*** - **секретарь конференции,** ассистент, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары.

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- *Процессы механической и физико-технической обработки материалов*;
- *Технология машиностроения и материаловедение*;
- *Композиционные материалы, создание и обработка*;
- *Транспортные, технологические машины и оборудование*
- *Автоматизация и управление процессами*.

428015, Российская Федерация, Приволжский федеральный округ,
г. Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова
Машиностроительный факультет, ул. С. Михайлова, д. 3
e-mail: konfmsf21chgu@yandex.ru

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN MECHANICAL ENGINEERING

III Russian National with International Participation Scientific and Technical Conference

Cheboksary, 01…03 June 2021

CONFERENCE ORGANIZERS

- **I.N. Ulianov Chuvash State University**, Cheboksary, Russian Federation

CO-ORGANIZERS

- **Novosibirsk State Technical University**, Scientific, Technical and Manufacture journal «Actual Problems in Machine Building», Novosibirsk, Russian Federation
- **Sevastopol State University,** Sevastopol, Russian Federation;
- **Volgograd State Technical University,** Volgograd, Russian Federation

PROGRAMME COMMITTEE

Aleksandrov A.Yu., Rector of I.N. Ulianov Chuvash State University (Cheboksary, Russia), Chairman; ***Lobanov D.V.***, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, ChSU (Cheboksary, Russia), co-chair; ***Yanyushkin A.S.***, D.Sc. (Engineering), Professor, ChSU (Cheboksary, Russia), co-chair

Committee members: ***Bratan S.M.***, D.Sc. (Engineering), Professor, SevSU, (Sevastopol, Russia), ***Nosenko V.A.***, D.Sc. (Engineering), Professor, VSTU (Volgograd, Russia), ***Skeeba V.Yu.***, Editor-in-chief of the Scientific, Technical and Manufacture journal "Actual problems in mechanical engineering", Ph.D. (Engineering), Associate Professor, NSTU (Novosibirsk, Russia), ***Gartfelder V.A.***, Ph.D., Associate Professor, ChSU (Cheboksary, Russia).

PARTNERS

Концерн Тракторные заводы	ЭЛАРА
ФОНД ВЕНЧУРНЫХ ИНВЕСТИЦИЙ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СФЕРЕ ЧУВАШСКОЙ РЕСПУБЛИКИ	Музей истории трактора

HONORARY COMMITTEE

Absadykov B.N. D.Sc. (Engineering), Professor, KBTU (Almaty, Republic of Kazakhstan), **Alikulov D.E.** D.Sc. (Engineering), Professor, TSTU (Uzbekistan Tashkent), **Alibekov S.Y.**, D.Sc. (Engineering), Professor, VSUT, Volgatech (Yoshkar-Ola, Russia), **Artamonov E.V.**, D.Sc. (Engineering), Professor, TIU (Tyumen, Russia), **Bataev A.A.**, D.Sc. (Engineering), Professor, NSTU (Novosibirsk, Russia), **Bataev V.A.**, D.Sc. (Engineering), Professor, NSTU (Novosibirsk, Russia), **Boldyrev A.I.**, D.Sc. (Engineering), Professor, VSTU, (Voronezh, Russia), **Ing. Helge Walther** – CEO (Chief Executive Officer) of Walther Schweisstechnik, (Vienna, Austria), **Vasilyev S.A.**, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, ChSU, (Cheboksary, Russia), **Gorelov V.A.**, D.Sc. (Engineering), Professor, BMSTU, (Moscow, Russia), ***Grigoriev V.S.***, Senior Lecturer, ChSU (Cheboksary, Russia), **Gusev V.V.**, D.Sc. (Engineering), Professor, DonNTU, (Donetsk), **Denisenko A.F.**, D.Sc. (Engineering), Professor, Samara Polytech, (Samara, Russia), **Eresco S.P.**, D.Sc. (Engineering), Professor, SFU, (Krasnoyarsk, Russia), **Ivancivsky V.V.**, D.Sc. (Engineering), Professor, NSTU (Novosibirsk, Russia), **Illarionov I.E.**, D.Sc. (Engineering), Professor, ChSU (Cheboksary, Russia), **Kirichek A.V.**, D.Sc. (Engineering), Professor, BSTU (Bryansk, Russia), **Kiselev E.S.**, D.Sc. (Engineering), Professor, UlSTU (Ulyanovsk, Russia), **Kozlov A.M.**, D.Sc. (Engineering), Professor, LSTU (Lipetsk, Russia), **Lebedev V.A.**, D.Sc. (Engineering), Professor, DonSTU (Rostov-on-Don, Russia), **Leonov S.L.**, D.Sc. (Engineering), Professor, AltSTU (Barnaul, Russia), **Makarov V.F.**, D.Sc. (Engineering), Professor, VSTU (Voronezh, Russia), **Markov A.M.**, D.Sc. (Engineering), Professor, AltSTU (Barnaul, Russia), **Mikhailov A.N.**, D.Sc. (Engineering), Professor, DonNTU, (Donetsk), **Nosov N.V.**, D.Sc. (Engineering), Professor, Samara Polytech, (Samara, Russia), **Popov A.Yu.**, D.Sc. (Engineering), Professor, OmSTU, (Omsk, Russia), **Rechenko D.S.**, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, OmSTU, (Omsk, Russia), **Smolentsev V.P.**, D.Sc. (Engineering), Professor, VSTU, (Voronezh, Russia); **Sorilov M.Yu.**, D.Sc. (Engineering), Professor, KnASTU (Komsomolsk-on-Amur, Russia), **Smirnov V.M.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, ChSU (Cheboksary, Russia), **Tabakov V.P.**, D.Sc. (Engineering), Professor, UlSTU (Ulyanovsk, Russia), **Tamarkin M.A.**, D.Sc. (Engineering), Professor, DonSTU (Rostov-on-Don, Russia), **Fedonin O.N.**, D.Sc. (Engineering), Professor, BSTU (Bryansk, Russia), Dr. **Lawson Chen** - CEO (Chief Executive Officer) of Shanghai Hiwave Advanced Materials Technology Co., Ltd., (Shanghai, China), ***Shalunov E.P.***, Ph.D. (Engineering), Professor, ChSU (Cheboksary, Russia), **Sherov K.T.**, D.Sc. (Engineering), Professor, KSTU (Karaganda, Republic of Kazakhstan)

ORGANIZING COMMITTEE

Lobanov D.V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Deputy Ch. editor of the Scientific, Technical and Manufacture journal "Actual Problems in Mechanical Engineering", ChSU (Cheboksary, Russia); ***Borisov M.A.***, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, ChSU (Cheboksary, Russia); ***Sekletina L.S.***, Senior Lecturer, ChSU (Cheboksary, Russia); ***Kuptsov M.V.***, Assistant, ChSU (Cheboksary, Russia); ***Rafanova O.S.***, Head of Laboratory MBF ChSU (Cheboksary, Russia); ***Vladimirova Yu.O.***, Assistant, ChSU (Cheboksary, Russia).

SUBJECT OF THE CONFERENCE

- The Processes of Mechanical and Physico-Technical Processing of Materials;
- Engineering Technology and Materials Science;
- Composite Materials, Creation and Processing;
- Transport, Technological Machines and Equipment
- Automation and Process Management.

СОДЕРЖАНИЕ

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Сердюкова Д.А., Пономарев Б.Б. О многофакторном моделировании обработки поверхностей свободной формы 9

Скоморохова А.И., Глебов А.О. Обзор методов изготовления изделий оптимальной топологии с внутренней пористой структурой 14

Борисов М.А., Николаев В.В. Влияние режимов резания на шероховатость поверхности при электрохимическом шлифовании коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т 19

Казимиров Д.Ю., Прокопьева А.В., Астахов А.Д., Медведев О.А., Лушпей А.Д. Упрочнение поверхности нитинола для повышения качества шлифования 25

Лобанов Д.В., Рафанова О.С., Владимирова Н.А. Оценка экономичности лезвийной обработки композиционных материалов 30

Исаченко А.С., Столяренко Д.И. Предварительная оценка машинного времени изготовления заготовительно-штамповочной оснастки на станках с ЧПУ 36

Щегольков А.В. Исследование процесса формирования электрохромных пленок WO_3 на поверхности ITO-электрода методом хроноамперометрии 41

Скиба В.Ю., Иванцивский В.В., Зверев Е.А., Титова К.А. Реализация высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты в условиях гибридной обработки 47

Татанов П.В., Янюшкин А.Р., Шнайдер Д.А., Янюшкин А.С. Опыт электроэрозионного фрезерования на АО “Чебоксарский электроаппаратный завод” 57

Захаров О.В., Трошин А.А. Анализ корреляции функциональных параметров текстуры поверхности 63

Попов А.Ю., Реченко Д.С., Савин А.В., Прокофьев В.А. Потеря точности при электроэрозионной обработке и способы предотвращения 68

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ОСНАСТКА И ИНСТРУМЕНТЫ

Костин П.Н., Пашков А.А. К вопросу необходимости создания цифровых двойников деталей типа каркас и обшивка 75

Козлов А.М., Кузнецов С.Ф., Козлов А.А. Применение активного демпфера для снижения колебаний при фрезеровании 81

Лобанов Д.В., Данилов П.Г., Владимирова Н.А., Григорьев А.Н. Разработка экспериментального стенда для исследования процесса обработки неметалических композиционных материалов 87

Скиба В.Ю., Зверев Е.А., Иванцивский В.В., Титова К.А. Разработка гибридного оборудования 99

Захаров О.В., Трошин А.А. Оптимизация профиля дискового инструмента для обработки винтовых поверхностей 109

Земцова Н.В., Щегольков А.В. Электронагреватели на основе эластомеров, модифицированных углеродными наноструктурами, для 3*D* принтеров 115

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Прияткин Д.В., Артемьев А.А., Лысак В.И., Карташова А.А. Оценка износостойкости сплава системы Fe – C – Cr – Ni – Mn – Mo – Ti – Nb в условиях газоабразивного износа 121

Шалунов Е.П., Смирнов В.М., Янюшкин А.С., Владимирова Ю.О., Данилов П.Г. Применение реакционного механического легирования для получения и производства жаропрочных объемных наноструктурных материалов на основе металлических порошков 127

Смирнов В.М., Шалунов Е.П., Лобанов Д.В. Структура и свойства дисперсно-упрочненных композиционных материалов системы Cu-Ti-C-O 135

Щегольков А.В., Хробак А.В. Теплопроводящие клеевые композиты на основе полиуретанов модифицированных металлическими частицами и углеродными нанотрубками 142

Рекомендации по написанию научной статьи 147

Подготовка аннотации 149

Правила для авторов 151

CONTENTS

Innovative Technologies in Mechanical Engineering

Serdyukova D.A., Ponomarev B.B. On multi-factor modeling of free-form surface processing 9

Skomorokhova A.I., Glebov A.O. Review of methods for manufacturing products of optimal topology with an internal porous structure 14

Borisov M.A., Nikolaev V.V. Influence of cutting conditions on surface roughness during electrochemical grinding of corrosion-resistant steel 12X18H10T 19

Kazimirov D.Yu., Prokop`eva A.V., Astahov A.D., Medvedev O.A., Lushpey A.D. Surface hardening of nitinol for increased grinding quality 25

Lobanov D.V., Rafanova O.S., Vladimirova N.A. Estimation of the economy of composite materials blade processing 30

Isachenko A. S., Stolyarenko D. I. Preliminary estimate of the machining time in presswork tooling production on CNC machines 36

Shchegolkov A.V. Investigation of the formation of electrochromic WO_3 films on the surface of an ITO-electrodes by the method of chronoamperometry 41

Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Zverev E.A., Titova K.A. Implementation of high-energy heating by high-frequency currents in hybrid processing conditions 47

Tatanov P.V., Yanyushkin A. R., Shneider D.A., Yanyushkin A.S. Experience of electric erosion milling at JSC “Cheboksary electrical apparatus plant” 57

Zakharov O.V., Troshin A.A. Analysis of correlation of functional parameters of surface texture 63

Popov A.Yu., Rechenko D.S., Savin A.V., Prokofev V.A. Loss of accuracy during electric discharge machining and methods of its prevention 68

Technological Equipment, Machining Attachments and Instruments

Kostin P.N., Pashkov A.A. To the question of the need to develop digital duplicates for frame and casing parts 75

Kozlov A. M., Kuznetsov S.F., Kozlov A. A. Application of the active damper to reduce vibration when milling 81

Lobanov D.V., Danilov P.G, Vladimirova N.A, Grigoriev A.N. Development of a test bench for the study of the machining process of non-metallic composite materials 87

Skeeba V.Yu., Zverev E.A., Ivancivsky V.V., Titova K.A. Hybrid equipment development 99

Zakharov O.V., Troshin A.A. Disc tool profile optimization for processing helical surfaces 109

Zemtsova N.V., Shchegolkov A.V. Electric heaters based on elastomers modified with carbon nanostructures for 3D printers 115

Materials Science in Machine Building

Priyatkin D.V., Artem'ev A.A., Lysak V.I., Kartashova A.A. The assessment of wear resistance of Fe - C - Cr - Ni - Mn - Mo - Ti – Nb alloying system under on the gas abrasive wear 121

Shalunov E.P., Smirnov V.M., Yanyushkin A.S. Vladimirova Yu.O. Danilov P.G. Application of reactionary mechanical alloying for obtaining and producing of heat resistant volumetric nanostructural materials based on metal powders 127

Smirnov V.M., Shalunov E.P., Lobanov D.V. The structure and phase composition of dispersion-strengthened composite materials of the system Cu-Ti-C-O 135

Shchegolkov A.V., Hrobak A.V. Heat-conducting adhesives based on polyurethanes modified with metal particles and carbon nanotubes 142

Guidelines for Writing a Scientific Paper 147

Abstract requirements 149

Rules for authors 151

УДК 621.91.01

О МНОГОФАКТОРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СВОБОДНОЙ ФОРМЫ

Д.А. СЕРДЮКОВА, м.н.с., магистрант
Б.Б. ПОНОМАРЕВ, доктор техн. наук, профессор
(ИРНИТУ, г.Иркутск)

Сердюкова Д.А. – 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
e-mail: serdyukova.dasha2014@yandex.ru

В статье обосновывается необходимость проведения исследований в области многофакторного моделирования процесса обработки поверхностей свободной формы деталей сфероцилиндрическими фрезами на пятикоординатных станках с числовым программным управлением. Обобщается опыт использования метода конечных элементов и CAE систем при решении подобных задач, обоснована научная новизна и определена цель исследования, заключающаяся в установлении взаимосвязей параметров напряженного состояния инструмента с условиями обработки, температурными изменениями и динамикой процесса. Представлены основные этапы разработки программного комплекса моделирования удаления припуска при чистовом фрезеровании сложных поверхностей и проведения исследований, направленных на решение задач, связанных с разработкой компьютерной модели процесса формообразования детали и назначения оптимальных режимов резания на этапе проектирования технологического процесса, учитывающего технические возможности оборудования и инструмента.

Ключевые слова: формообразующая обработка, фрезерование, пятикоординатные станки, силы резания, режимы резания, *LS-DYNA*.

Введение

Характерной особенностью современного производства стало оснащение его разнообразным высокопроизводительным технологическим оборудованием. К такому оборудованию относятся пятикоординатные станки с ЧПУ, обеспечивающие высокую скорость съема материала и эффективность при формообразовании поверхностей сложной формы, как правило, получаемых с помощью концевых сфероцилиндрических фрез. Именно, благодаря своей способности обрабатывать изделия свободной формы пятикоординатные станки ЧПУ находят все большее применение на предприятиях машиностроения. Пять осей свободы станка обеспечивают возможность режущей кромке инструмента перемещаться в системе координат заготовки по нелинейной траектории, повышая эффективность обработки и способствуя уменьшению остаточных гребешков [1, 2].

Эффективность различных способов формообразующей обработки, зависит не только от технических возможностей высокопроизводительного оборудования, но и от инструментообеспечения и условий его использования.

Основная часть

Обработка поверхностей свободной формы имеет ряд особенностей. И прежде всего, необходимо учитывать, что кривизна поверхности между соседними точками для тел свободной формы может резко изменяться, в связи, с чем возникает необходимость в определении влияния на процесс обработки ориентации инструмента относительно нормали к поверхности и допускаемых пределов изменения углов поперечного и продольного наклона инструмента. Для исключения негативных проявлений предлагается руководствоваться следующими рекомендациями [3]:

- для уменьшения силы резания и повышения качества поверхности при обработке поверхности двузубой сфероцилиндрической фрезой, необходимо исключать контакт точки, имеющей нулевую скорость резания, с заготовкой;
- для обеспечения меньшей шероховатости - использовать встречное фрезерование;
- избегать применения малых подач, приводящих к резкому возрастанию силы резания и ухудшению качества поверхности [4, 5, 6].

Взаимосвязь между динамическими факторами чистового фрезерования и режимами резания до настоящего времени изучена недостаточно. Как правило, исследования проводились с фиксированными значениями параметров. Дальнейшие исследования должны проводиться с применением основ многофакторного моделирования и базироваться на изменяемых и управляемых факторах, обеспечивающих высокое качество обработанных поверхностей.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Интегрировать напряженное состояние инструмента в программном инженерном комплексе конечно элементного анализа *LS-DYNA* [7, 8-14] под воздействием сил резания, возникающих в процессе формообразования поверхностей деталей, с учетом геометрии зуба фрезы, механических характеристик материала заготовки и инструмента и режимов обработки;
2. Провести предварительные экспериментальные исследования, описать состояние системы инструмент-заготовка с учетом динамики и термодинамики процесса. Осуществить экспериментальную часть исследования проверки сходимости теоретических данных, полученных при моделировании процесса с физической моделью. Эту часть исследования необходимо выполнить с использованием современного высокопроизводительного пятикоординатного станка с ЧПУ *HSC* 75 *linear*, динамометрического комплекса *Kistler* типа 9129*AA* для измерения силы резания, профилометра *Taylor Hobson Form Talysurf i*200 для определения параметров шероховатости;
3. Построить геометрическую модель инструмента и взаимодействия его режущей кромки с обрабатываемой поверхностью, смоделировать динамику движения инструмента и заготовки. Построить конечно-элементную модель процесса стружкообразования и определить напряжения в зоне режущей кромки и по всему объему инструмента с учетом силовых и температурных воздействий. Алгоритм разработки и изготовления деталей сложной формы должен включать: создание модели сложной поверхности в *CAD* системе, генерацию команд для перемещения режущего инструмента станка в *CAM* системе и составление траектории инструмента обработки сложной поверхности;
4. Разработать методику построения моделей и применения *CAE* систем и подготовить для разработчиков управляющих программ комплекс программных средств с элементами оптимизационных решений.

Как ранее отмечено, для формообразования сложных поверхностей наиболее часто в производстве применяются сфероцилиндрические фрезы. Моделирование динамики процесса обработки с учетом температурных воздействий на инструмент проводится на примере двузубой концевой фрезы *MP*-2*MBR*5 со сферическим торцом (см. рис.1). Такой выбор сделан на основе ранее выполненных исследований [15] и обусловлен рядом следующих достоинств: инструмент обладает высокой стойкостью, что подтверждено экспериментально, позволяет минимизировать остаточный гребешок и исключить появление зарезов на заготовке, а также обеспечивает высокое качество обработки. Недостатком при его применении является переменная скорость резания по режущей кромке зуба, причем максимальная скорость резания достигается на наибольшем диаметре инструмента, а на вершине инструмента она равна нулю, что приводит к скалыванию режущей кромки и ухудшению шероховатости образуемой поверхности.

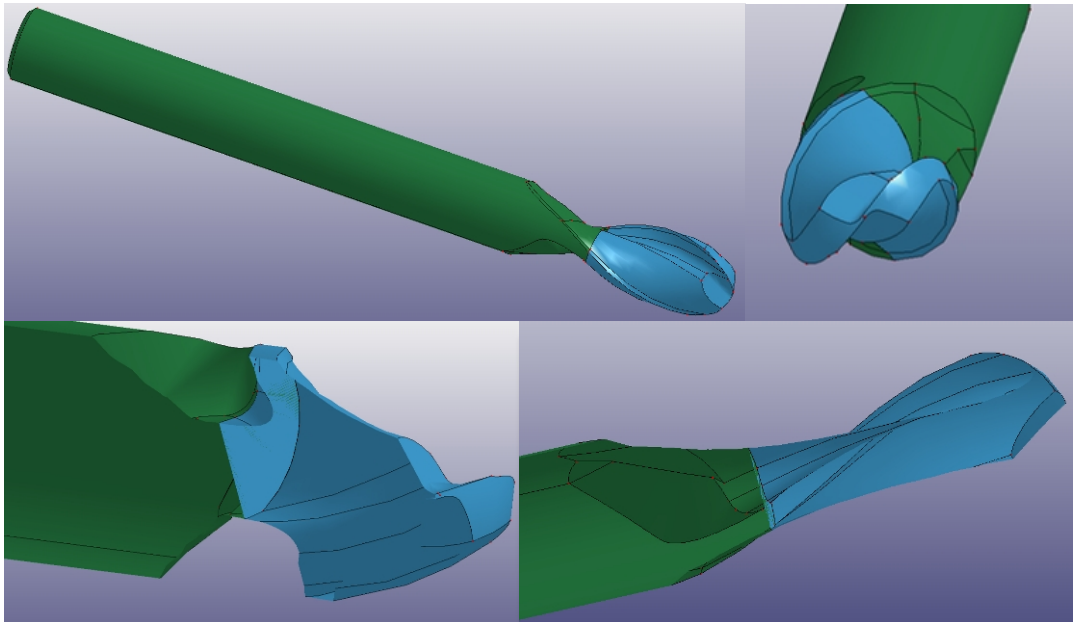


Рис. 1. Фреза MP-2MBR5 в программе *LS-DYNA*

Для минимизации негативных проявлений в производстве предлагается использовать предварительное математическое моделирование процесса обработки, направленное на получение расчетным путем с применением возможностей конечно элементного анализа оптимальных режимов резания, при высокой эффективности процесса изготовления и за счет минимизации или полного исключения ручной суперфинишной обработки.

Для решения оптимизационной задачи требуются надежные методы количественной оценки сил резания необходимых для прогнозирования напряжений, возникающих на режущей кромке и в теле инструмента с учетом температурных воздействий, а также программное обеспечение определения траектории движения инструмента, связанные с формой обрабатываемой поверхности, и его ориентацией относительно заготовки.

Вывод

Разрабатываемый метод оптимизации процесса чистового фрезерования поверхностей деталей предполагает проведение анализа различных характеристик обработки сложной поверхности, таких как, подача на зуб, глубина резания, температура в зоне образования стружки, что позволит назначать оптимальные режимы обработки, максимально

использовать возможности станка, избежать неблагоприятных условий работы и продлить срок службы инструмента [15]. Работа позволит удовлетворить запросы производства на повышение эффективности пятикоординатной обработки поверхностей свободной формы. Итогом работы станет создание системы оптимизации стратегий обработки с учетом динамики и термодинамики процесса при формообразовании поверхностей свободной формы.

Список литературы

1. *Makhanov S.S., Weerachai A.* Advanced numerical methods to optimize cutting operations of five-axis milling machines. – Berlin: Springer, 2007. – 206 p. – ISBN 978-3-540-71121-6.

2. *Кугультинов С.Д., Красильникова В.А.* Особенности обработки сложных поверхностей на станках с ЧПУ // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2015. – № 3 – С. 145– 148.

3. *Нгуен Ш.Х.* Совершенствование процесса обработки поверхностей сложной формы сферическими фрезами: дис. … канд. техн. наук: 05.02.08. – Иркутск, 2019. – 165 с.

4. *Пономарев Б.Б., Нгуен Ш.Х.* Исследование влияния ориентации инструмента на силы резания при обработке поверхностей сфероцилиндрическими фрезами // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сборник статей 12 международной научно-практической конференции, Иркутск, 27 мая – 1 июня 2019 г. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. – С. 183–188. – ISBN 978-5-8038-1391-0.

5. *Аверченков В.И., Казаков Ю.М.* Автоматизация проектирования технологических процессов: учебное пособие для вузов. – 2-е изд., стереотип. – М.: ФЛИНТА, 2011. – 229 с.

6. *Дружинский И.А.* Сложные поверхности: математическое описание и технологическое обеспечение: справочник. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 263 с.

7. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе LS-DYNA. Теория и семинары: материалы для подготовки курса лекций для повышения квалификации специалистов по моделированию процессов ОМД / [сост. М.В. Илюшкин]. – Ульяновск, 2017. – 125 с.

8. Моделирование процесса интенсивной деформации в роликах с использованием программного пакета Ansys LS-DYNA / О.И. Морозов, М.В. Илюшкин, В.П. Табаков, В.Н. Кокорин, В.В. Марковцева, Ю.Н. Гаврилина // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 12 (144). – С. 43–47.

9. *Чернявский А.О.* Метод конечных элементов. Основы практического применения: монография. – М.: Машиностроение, 2003. – 24 с.

10. *Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А.* Ansys в руках инженера: практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

11. *Чигарев А.В., Кравчук, А.С., Смалюк А.Ф.* Ansys для инженеров: справочное пособие. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.

12. *Курненков А.В., Шурыгин А.Ю.* Численное моделирование процессов резания: учебное пособие. – Н. Новгород, 2017. – Ч. 1. – 184 с.

13. LS-DYNA analysis for structural mechanics: overview of the core analysis features used by LS-DYNA to simulate highly nonlinear transient behavior in engineered structures and systems [Electronic resource] / LSTC Livermore Software Technology Corp. – Livermore, 2014. – URL: https://www.predictiveengineering.com/sites/default/files/ls-dyna-analysis-for-tructural-echanics-2014.pdf (accessed 23/04/2021).

14. *Криворучко Д.В., Залога В.О., Корбач В.Г.* Основы 3D-моделирования процессов механической обработки методом конечных элементов: учебное пособие. – Сумы: Изд-во СумДУ, 2009. – 208 с.

15. *Пономарев Б.Б., Нгуен Ш.Х.* Моделирование и анализ влияния условий обработки на силы резания при концевом фрезеровании // Современные технологии – системный анализ – моделирование. – 2018. – № 3 (59). – С. 8–16.

ON MULTI-FACTOR MODELING OF FREE-FORM SURFACE PROCESSING

Serdyukova D.A., junior researcher, Master's Degree Student,
e-mail: serdyukova.dasha2014@yandex.ru
Ponomarev B.B., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: pusw@istu.edu

Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

Abstract

The paper presents an argument for the need for research in the field of multifactor modeling of the process of the free-form parts surfaces' processing with spherocylindrical cutters on five-axis CNC machines. The experience of using the finite element method and CAE systems in solving such problems is generalized, the scientific novelty is substantiated and the purpose of the study is determined, which is to establish the relationship between the parameters of the stress state of the tool with the processing conditions, temperature changes and the dynamics of the process. The main stages of the development of a software complex for modeling the removal of an allowance for finishing milling of complex surfaces and conducting research aimed at solving problems related to the development of a computer model of the process of forming a part and assigning optimal cutting conditions at the design stage of a technological process, taking into account the technical capabilities of equipment and tools, are presented.

Keywords
Shaping, milling, five-axis machines, cutting forces, cutting conditions, LS-DYNA.

УДК 621

ОБЗОР МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ОПТИМАЛЬНОЙ ТОПОЛОГИИ С ВНУТРЕННЕЙ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ*

А.И. СКОМОРОХОВА, магистрант
А.О. ГЛЕБОВ, канд. техн. наук, доцент
(ТГТУ, г. Тамбов)

Скоморохова А.И. – 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д.106,
Тамбовский государственный технический университет,
e-mail: nasta373@mail.ru

Актуальность применения аддитивных технологий в машиностроении обусловлена потребностью в новых подходах к проектированию и изготовлению различных конструкций с высокими показателями функциональности. Проанализированы основные преимущества данного вида производства, главным среди которых является возможность изготовления деталей оптимальной топологии. Перспективным направлением улучшения эксплуатационных характеристик разрабатываемых конструкций является создание внутренней пористой структуры, что не только снижает вес деталей, но и позволяет влиять на их физико-механические характеристики. Описаны некоторые технологии, наиболее широко используемые при печати пластиковых и металлических изделий. Рассмотрены методы формирования слоя деталей при аддитивном производстве и области применения каждого из этих методов. Приведен пример успешного практического использования изделия с внутренней пористой структурой.

Ключевые слова: аддитивные технологии, топологическая оптимизация, пористая структура

Введение

Одним из перспективных направлений производства изделий с заданными эксплуатационными характеристиками является создание внутренней пористой структуры с различным процентом заполнения [1]. Детали из пористого материала в отличие от монолитных изделий, при равных эксплуатационных характеристиках будут обладать меньшей массой, хорошими демпирующими свойствами и позволят снизить затраты на материал [2]. Интересно и то, что на основе пористого материала можно создавать широкий ассортимент композитов с антифрикционными, электротехническими, жаропрочными и другими свойствами, получаемыми в результате заполнения свободного пространства определенными компонентами [3].

Организация внутренней пористой структуры в сочетании с методами топологической оптимизации открывают новые перспективы в задачах проектирования легких и функциональных изделий [4 - 8], интерес к которым обусловлен активным развитием аддитивных технологий. Изготовление подобных изделий традиционными методами обработки зачастую не представляется возможным. Кроме того, к преимуществам аддитивных технологий относятся: уменьшение парка технологического оборудования; возможность выполнять большое количество индивидуальных заказов; экономия времени на переналадке оборудования под новое изделие; использование труда рабочих низкой квалификации; уменьшение количества отходов; значительное сокращение производственного цикла и др [9]. Аддитивное производство позволяет также влиять на

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук МК-1088.2021.4).

качественные показатели изготавливаемой продукции путем изменения параметров печати, что обуславливает актуальность исследований в данной области с практической точки зрения.

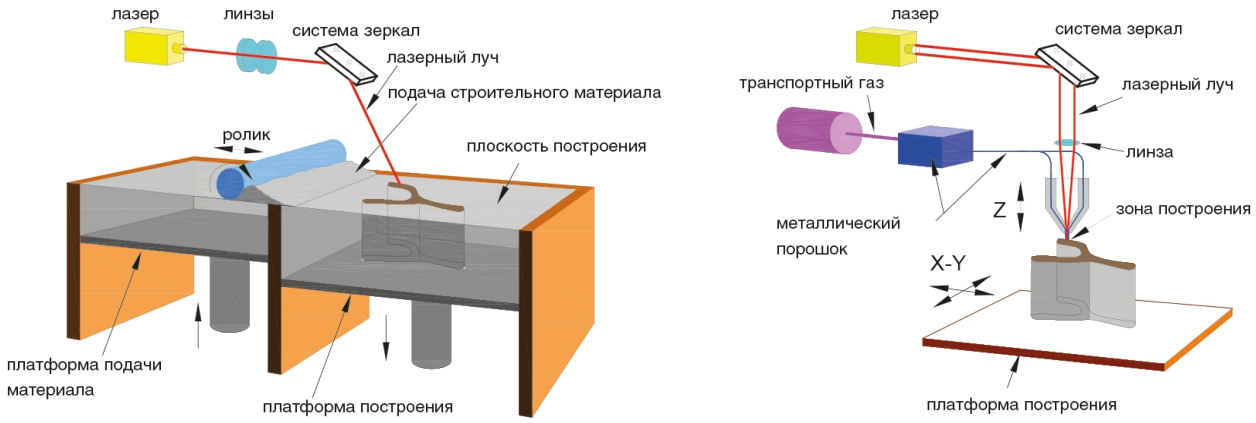
Цель работы заключается в проведении аналитического обзора возможностей изготовления изделий оптимальной топологии с внутренней пористой структурой.

Теория

Изготовление пластиковых изделий с помощью 3*D*-принтеров, реализующих технологию послойного наложения расплавленной полимерной нити (*FDM – Fused Deposition Modeling*), находит наиболее широкое применение в условиях единичного производства, а также в задачах прототипирования ввиду доступности оборудования и низкой стоимости расходных материалов [10]. Однако технология *FDM* не может составить конкуренцию традиционному методу литья под давлением по таким показателям как качество поверхности, время и точность изготовления.

Указанные выше недостатки аддитивных технологий во многом решены для металлических изделий с помощью применения многоосевых станков, совмещающих «выращивание» детали с последующей механической обработкой. В качестве металлических материалов для аддитивного производства широко используются порошки на основе железа (инструментальные стали: 18*Ni*300, *H*13; нержавеющая сталь: 316*L*), никеля и кобальта (*Inconel, CoCrMO, NiCrMo*), алюминия (*AlSi*9*Cu*3, *AlSi*10*Mg*) и титана (*Ti*6-4, *CpTigr*1) [11].

Существует два метода формирования слоя при печати, схемы которых показаны на рис. 1 [12]. *Bed Deposition* (селективный синтез) подразумевает первоначальное формирование слоя определенной толщины с последующей выборочной обработкой частиц порошка. Данный метод позволяет получать детали высокой сложности с различными внутренними структурами и представляет особый интерес в отраслях автомобилестроения, авиастроения, стоматологии, здравоохранения, а также при производстве различной технологической оснастки с расширенным функционалом.



а) б)

Рис. 1. Схемы формирования слоя: а) *Bed Deposition*; б) *Direct Deposition*

Direct Deposition (прямое осаждение материала) заключается в подаче материала непосредственно в место формирования детали под действием одновременно подводимой энергии. Помимо непосредственного изготовления деталей, данный способ печати часто применяется в ремонтных целях. Этот метод позволяет создавать более крупные конструкции, а также существенно экономить материал, так как в отличие от выборочной обработки, здесь нет отходов в виде нерасплавленного порошка. Технологию прямого подвода энергии и материала

можно внедрять в обрабатывающие центры, что дополнительно расширяет производственные возможности.

Для изготовления металлических изделий с пористой структурой наиболее часто применяют аддитивные технологии *SLM* (*Selective Laser Melting*) и *EBM* (*Electron Beam Melting*), которые позволяют воспроизводить высокоточные детали, зачастую не требующие постобработки. На рис. 2 изображена вертлужная чашка с пористой трабекулярной структурой, имитирующей костную ткань, созданная по технологии *EBM*, для замены тазобедренного сустава. По результатам исследования, проведенного в работе [13], было установлено, что представленная чашечка продемонстрировала хорошие краткосрочные и среднесрочные клинические результаты у наблюдаемых пациентов.

Значительные достижения в области 3*D*-печати металлом расширили возможности производства костных имплантатов с различными пористыми структурами. В работе [14] приводится подробный обзор применяющихся в медицине структур заполнения, по результатам которого сделан вывод о том, что наиболее часто для имплантатов применяется решетчатая структура с размерами пор от 400 до 500 мкм и процентом пористости от 60 до 70%. При этом отмечается, что остальные типы структуры на данный момент мало изучены, ввиду чего невозможно сделать однозначного заключения о том, что такой вариант является наилучшим.

Рис.2. Вертлужная чашка с внутренней пористой структурой.

Не менее интересной областью, в которой нашли применение изделия оптимальной топологии с внутренней пористой структурой, является производство деталей велосипедов [15], где снижение веса при сохранении стабильности, маневренности и удобства использования имеет большое значение.

Подобные исследования свидетельствуют о высокой практической значимости изучения вопросов изготовления изделий с применением аддитивных технологий и их массового внедрения в производство.

Выводы

Исходя из проведенного анализа литературы, можно сделать вывод, что применение аддитивных технологий в совокупности с топологической оптимизацией позволит найти новые решения в области проектирования и изготовления конструкций различного назначения. При этом решается проблема наиболее эффективного использования материала в рамках конкретной задачи с учетом требований, предъявляемых к изделию. Создание пористой структуры позволяет дополнительно улучшить эксплуатационные характеристики деталей при значительном снижении массы, а также дает возможность расширить функциональные возможности изделий.

Список литературы

1. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing / J. Liu, A.T. Gaynor, S. Chen, Z. Kang, K. Suresh, A. Takezawa, L.Li, J. Kato, J. Tang, C.C.L. Wang, L. Cheng, X. Liang, A.C. To // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2018. – Vol. 57 (6). – P. 1–27. – DOI: 10.1007/s00158-018-1994-3.

2. *Slater A.G., Cooper A.I.* Porous materials. Function-led design of new porous materials // Science. – 2015. – Vol. 348, iss. 6238. – P. aaa8075. – DOI: 10.1126 / science.aaa8075.

3. *Voort van der V.P., Leus K., Canck de E.* Introduction to Porous Materials. – Wiley, 2019. – 448 p. – ISBN 978-1-119-42660-8.

4. *Alekhin P.A., Glebov A.O., Karpov S.V.* Perspectives for organization of internal porous structure of loaded elements of optimal topology // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709, iss. 2. – P. 022028. – DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022028.

5. Additive Manufacturing-Oriented Design of Graded Lattice Structures Through Explicit Topology Optimization / C. Liu, Z. Du, W. Zhang, Y. Zhu, X. Guo // Journal of Applied Mechanics. – 2017. – Vol. 84. – P. 081008. – DOI: 10.1115/1.4036941.

6. Infill Optimization for Additive Manufacturing–Approaching Bone-like Porous Structures / J. Wu, N. Aage, R. Westermann, O. Sigmund // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2018. – Vol. 24. – P. 1127–1140. – DOI: 10.1109/TVCG.2017.2655523.

7. Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting / C. Yan, L. Hao, A. Hussein, P. Young, D. Raymont // Materials and Design. – 2014. – Vol. 55. – P. 533–541. – DOI: 10.1016/j.matdes.2013.10.027.

8. Lattice structure lightweight triangulation for additive manufacturing / L. Chougrani, J.P. Pernot, P. Véron, S. Abed // Computer-Aided Design. – 2017. – Vol. 90. – P. 95–104. – DOI: 10.1016/j.cad.2017.05.016.

9. *Чемодуров А.Н.* Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8/2. – С. 210–217.

10. Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers / B.T. Wittbrodt, J. Laureto, D. Oppliger, J.L. Irwin, J. M. Pearce, A.G. Glover, G. Anzalone // Mechatronics. – 2013. – Vol. 23, iss. 6. – P. 713–726. – DOI: 10.1016/j.mechatronics.2013.06.002.

11. Materials for additive manufacturing / D. Bourell, J.P. Kruth, M. Leu, G. Levy, D. Rosen, A.M. Beese, A. Clare // CIRP Annals. – 2017. – Vol. 66, iss. 2. – P. 659–681. – DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.009.

12. *Джуган А.А., Овчинникова А.В., Ольшанецкий В.Е.* Аддитивные технологии и возможности их применения в современных условиях (обзор) // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2014. – № 2. – С. 96–101.

13. A new 3D printing porous trabecular titanium metal acetabular cup for primary total hip arthroplasty: a minimum 2-year follow-up of 92 consecutive patients / X. Geng, F. Li, K. Zhang, Y. Li, X. Wang, Z. Liu, H. Tian // Journal of Orthopaedic Surgery and Research. – 2020. – Vol. 15, iss. 1. – P. 383. – DOI: 10.1186/s13018-020-01913-1.

14. *Deering J., Grandfield K.* Current interpretations on the in vivo response of bone to additively manufactured metallic porous scaffolds: a review // Biomaterials and Biosystems. – 2021. – Vol. 2. – P. 100013. – DOI: 10.1016/j.bbiosy.2021.100013.

15. *Zeleny P., Cadek M.* Topology optimization of a bicycle part // MM Science Journal. – 2015. – Vol. 3. – P. 696–700. – DOI: 10.17973/MMSJ.2015_10_201538.

REVIEW OF METHODS FOR MANUFACTURING PRODUCTS OF OPTIMAL TOPOLOGY WITH AN INTERNAL POROUS STRUCTURE

Skomorokhova A.I., Undergraduate, e-mail: nasta373@mail.ru
Glebov A.O., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: glebov.alex@inbox.ru

Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation

Abstract

The relevance of the use of additive technologies in mechanical engineering is due to the need for new approaches to the design and manufacture of various structures with high levels of functionality. The main advantages of this type of production are analyzed, the main one of which is the ability to manufacture parts with optimal topology. A promising direction for improving the operational characteristics of the structures being developed is the creation of an internal porous structure, which not only reduces the weight of the parts, but also makes it possible to influence its physical and mechanical characteristics. Some of the technologies most widely used in printing plastic and metal products are described. Methods of forming a layer of parts in additive manufacturing and the areas of application of each of these methods are considered. An example of successful practical use of a product with an internal porous structure is given.

Keywords
additive technologies, topological optimization, porous structure

Funding:
The work was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists - candidates of sciences MK-1088.2021.4)

УДК 621.1

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМ ШЛИФОВАНИИ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т

М.А. БОРИСОВ, канд. техн. наук, доцент
В.В. НИКОЛАЕВ, магистрант
(ЧГУ им. И.Н.Ульянова, г. Чебоксары)

Борисов М.А. – 428015, Чувашская Республика, г. Чебоксары, пр-т Московский, д. 15, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
e-mail: borisovmgou@mail.ru

В настоящее время особое место среди выпускаемой продукции занимают детали, изготавливаемые из коррозионностойких материалов, например из стали марки 12Х18Н10Т. Они применяются в машиностроении, авиастроении, пищевой и других отраслях промышленности. К ним предъявляются высокие требования по качеству поверхностного слоя. К показателям качества относится, в том числе, шероховатость обработанной поверхности. Требуемая величина шероховатости поверхности достигается на финишных операциях. Коррозионностойкие стали имеют высокие физико-механические свойства и относятся к разряду труднообрабатываемых материалов. Одним из эффективных способов обработки труднообрабатываемых материалов является метод электрохимического шлифования алмазным инструментом на металлической связке. Он имеет ряд преимуществ перед традиционными методами финишной обработки. Целью работы является определение влияния режимов резания на шероховатость поверхности при электрохимическом шлифовании коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т. В ходе проведения работы была составлена матрица планирования экспериментов и проведены опыты по выявлению влияния режимов резания на шероховатость обработанной поверхности. Установлены величины режимов резания, при которых шероховатость обработанной поверхности минимальна.

Ключевые слова: Электрохимическое шлифование, комбинированная обработка, алмазный инструмент, качество поверхности, шероховатость, коррозионностойкая сталь

Введение

В настоящее время особое место среди выпускаемой продукции занимают детали, изготавливаемые из коррозионностойких (нержавеющих) материалов, например из стали марки 12Х18Н10Т. Они применяются в машиностроении, авиастроении, пищевой и других отраслях промышленности. К ним предъявляются высокие требования по качеству поверхностного слоя. К показателям качества относится, в том числе, шероховатость обработанной поверхности. Требуемая величина шероховатости поверхности достигается на финишных операциях [1 -10].

Коррозионностойкие стали имеют высокие физико-механические свойства и относятся к разряду труднообрабатываемых материалов. В связи с этим возникают проблемы с их обработкой и достижением требуемой шероховатости поверхностного слоя.

Одним из эффективных способов обработки труднообрабатываемых материалов является метод электрохимического шлифования алмазным инструментом на металлической

связке. Он имеет ряд преимуществ перед традиционными методами финишной обработки [11 - 28].

Исследование метода электрохимического шлифования коррозионностойких сталей алмазными головками на металлической связке в части повышения качества обработанной поверхности деталей является актуальной задачей.

Целью работы является определение влияния режимов резания на шероховатость поверхности при электрохимическом шлифовании коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т.

Методика экспериментального исследования

В качестве объекта исследований выбран процесс финишной обработки металлических деталей, изготовленных из коррозионностойкой стали путем электрохимического шлифования цилиндрическим алмазным инструментом на металлической связке. Методика проведения исследований предусматривает определение влияния глубины резания, подачи и скорости резания на шероховатость обработанной поверхности при электрохимическом шлифовании коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т. Критерием выбора оптимальных режимов резания является минимальная шероховатость обработанной поверхности.

Исследования проводились на специальном стенде [29, 30] путем электрохимического шлифования цилиндрических заготовок диаметром 10 мм, изготовленных из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т алмазными цилиндрическими головками на металлической связке диаметром 3 мм. Применялись алмазные головки зернистостью 80-125 мкм. Для устранения влияния износа инструмента в каждом опыте была использована новая алмазная головка. Время обработки составляло от 2 до 3 сек. Температура электролита имела значение $T = 50^0$ С, плотность тока $J = 0{,}3$ А/мм^2.

Результаты и их обсуждение

Исследования проводились с использованием метода планирования эксперимента. Интервалы варьирования: глубина резания ($t_{min.} = 0{,}04$ мм и $t_{max.} = 0{,}06$ мм), минутная подача ($S_{мин.\ min.} = 230$ мм/мин и $S_{мин.\ max.} = 250$ мм/мин) и скорость резания ($V_{min.} = 280$ м/мин и $V_{max.} = 363$ м/мин). После определения основных факторов была составлена матрица планирования и проведено восемь опытов. Матрица планирования и результаты опытов приведены в таблице.

Таблица

Матрица планирования и результаты опытов

№	Параметры			Факторы				Взаимодействия				Результаты опыта			Среднее результатов
	t	S	v	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y_1	Y_2	Y_3	$\bar{Y}_i$
1	0,04	230	280	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	0,612	0,437	0,386	0,478
2	0,06	230	280	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	0,410	0,484	0,693	0,529
3	0,04	250	280	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	0,254	0,321	0,360	0,311
4	0,06	250	280	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	0,328	0,231	0,462	0,340
5	0,04	230	363	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,428	0,429	0,468	0,441
6	0,06	230	363	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	0,309	0,374	0,668	0,450
7	0,04	250	363	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	0,165	0,259	0,375	0,266
8	0,06	250	363	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,293	0,389	0,212	0,298

Выводы

Изменение режимов резания приводит к существенному изменению шероховатости поверхности при электрохимическом шлифовании алмазным инструментом на металлической связке коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т. При выбранных интервалах варьирования значений режимов резания шероховатость обработанной поверхности находится в диапазоне от 0,266 мкм. до 0,529 мкм. Минимальную шероховатость поверхности R_a = 0,266 мкм. обеспечивают следующие режимы резания: глубина резания t = 0,04 мм, минутная подача $S_{мин.}$ = 250 мм/мин., скорость резания V = 363 м/мин.

Список литературы

1. *Никифоров А.С., Рафанова О.С., Мулюхин Н.В.* Проблемы трещинообразования при финишной обработке высокопрочных материалов // Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых ученых, Севастополь, 20–23 мая 2019 г. – Севастополь, 2019. – С. 77–82.

2. Повышение эффективности обработки высокопрочных композиционных материалов / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, Н.П. Петров, Д.А. Рычков // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2013. – Т. 1. – С. 146–149.

3. *Гартфельдер В.А., Григорьев В.С., Секлетина Л.С.* Контроль качества непрерывного потока продукции // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: материалы 1 международной научно-практической конференции, Чебоксары, 22–24 окт. 2015 г. – Чебоксары, 2015. – С. 265–270.

4. *Гартфельдер В.А., Секлетина Л.С.* Технический аудит металлорежущего оборудования // Вестник Чувашского университета. – 2004. – № 2. – С. 103–108.

5. Патент 2489236 Российская Федерация, МПК B 23 H 5/06 (2006.01). Способ электроабразивной обработки токопроводящим кругом / В.А. Мишин, М.А. Борисов, Д.В. Александров. – № 2011122895/02, заявл. 06.06.2011; опубл. 20.12.2012, Бюл. № 22.

6. *Борисов М.А., Мишин В.А.* Управление процессом электрохимического шлифования при отсутствии автономной цепи правки инструмента: монография. – Чебоксары: Политех, 2019. – 134 с. – ISBN 978-5-907132-49-8.

7. Повышение эффективности алмазного инструмента на металлической связке при шлифовании высокопрочных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, В.Ю. Скиба, В.А. Гартфельдер, Л.С. Секлетина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 3 (76). – С. 17–27. – DOI: 10.17212/1994-6309-2017-3-17-27.

8. Плоское шлифование торцов колец крупногабаритных подшипников с требуемым качеством поверхности / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов, А.В. Саразов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 67–78.

9. 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. Skeeba // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 736. – P. 81–85. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.81.

10. *Иванцивский В.В., Рахимянов Х.М.* Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин при интеграции поверхностной термической и финишной механической обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 6. – С. 43–46.

11. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step «diamond smoothing» / V.Y. Skeeba, V.V. Ivancivsky, D.V. Lobanov, A.K. Zhigulev, P.Y. Skeeba // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 125, iss. 1. – P. 012031. – DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.

12. *Скиба В.Ю., Иванцивский 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.

13. Патент 172551 Российская Федерация, МПК B 23 H 5/08 (2006.01). Устройство для электроабразивной обработки токопроводящим кругом / М.А. Борисов, В.А. Мишин, Д.А. Дементьев. – № 2016116265, заявл. 25.04.2016; опубл. 12.07.2017, Бюл. № 20.

14. *Popov V.Yu., Arkhipov P.V., Rychkov D.A.* Adhesive wear mechanism under combined electric diamond grinding // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – P. 01002. – DOI: 10.1051/matecconf/201712901002.

15. *Bratan S., Roshchupkin S., Revenko D.* Probabilistic approach for modeling electroerosion removal of grinding wheel bond // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 1426–1431. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.656.

16. *Борисов М.А., Мишин В.А., Дементьев Д.А.* Разработка программируемого устройства для управления параметрами тока при электрохимической обработке // Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение: сборник материалов 3 Всероссийской научно-практической конференции, Чебоксары, 20–21 апр. 2017 г. – Чебоксары, 2017. – С. 188–192. – ISBN 978-5-7677-2448-2.

17. *Nosenko V.A., Nosenko S.V.* Deep grinding of titanium alloy with continuous wheel correction // Russian Engineering Research. – 2010. – Vol. 30, iss. 11. – P. 1124–1128. – DOI: 10.3103/S1068798X10110110.

18. Physical-chemical processes of diamond grinding / D.V. Lobanov, P.V. Arhipov, A.S. Yanyushkin, V.Y. Skeeba // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87, iss. 8. – P. 082029. – DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082029.

19. *Борисов М.А., Мишин В.А.* Аспекты применения электрохимического шлифования зубопротезных металлических изделий // Новые технологии науки, техники, педагогики высшей школы: сборник материалов международной научно-практической конференции. – М., 2017. – С. 157–159.

20. *Kozlov A.M., Kozlov A.A.* Shaping the surface topology of cylindrical components by means of an abrasive tool // Russian Engineering Research. – 2009. – Vol. 29, iss. 7. – P. 743–746. – DOI: 10.3103/S1068798X09070223.

21. *Смирнов В.М., Тимофеев Д.А., Шалунов Е.П.* Дисперно-упрочненная связка на основе порошковой меди для алмазного инструмента // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: материалы 2 международной научно-практической конференции, Чебоксары, 11–14 окт. 2016 г. – Чебоксары, 2016. – С. 317–320.

22. *Bratan S., Roshchupkin S., Novikov P.* Modeling the grinding wheel working surface state // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 1419–1425. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.655.

23. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step «diamond smoothing» / V.Y. Skeeba, V.V. Ivancivsky, A.K. Zhigulev, P.Y. Skeeba, D.V. Lobanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 125, iss. 1. – P. 012031. – DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.

24. *Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu., Prokop'eva A.V.* Optimizing the grinding of high-speed steel by wheels of cubic boron nitride // Russian Engineering Research. – 2007. – Vol. 27, iss. 12. – P. 916–919. – DOI: 10.3103/S1068798X07120180.

25. *Popov V., Rychkov D., Arkhipov P.* Defects in diamonds as the basic adhesion grinding // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – P. 01003. – DOI: 10.1051/matecconf/201712901003.

26. *Борисов М.А., Мишин С.А., Сидельников А.М.* Разработка конструкции устройства для автоматического управления потоком жидкости, подаваемого к нескольким потребителям // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: материалы 3 международной научно-практической конференции, Чебоксары, 4–6 дек. 2017 г. – Чебоксары, 2017. – С. 201–206.

27. Патент 106019 Российская Федерация, МПК G 09 B 25/02 (2006.01). Установка для моделирования систем автоматического управления температурой / М.А. Борисов, В.А. Мишин, Н.И. Скворцов, И.В. Тойдерякова. – № 2011105802/12, заявл. 16.02.2011; опубл. 27.06.2011, Бюл. № 18.

28. *Борисов М.А., Мишин В.А.* Влияние продолжительности импульсов тока на интенсивность электрохимического шлифования // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2019. – Т. 6, № 1-4. – С. 48–52.

29. Исследование процесса автоматического управления сменой полярности тока в условиях гибридной технологии электрохимической обработки коррозионностойких сталей / М.А. Борисов, Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, В.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. –Т. 22, № 1. – С. 6–15. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-6-15.

30. *Борисов М.А., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С.* Гибридная технология электрохимической обработки сложнопрофильных изделий // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 25–34. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-25-34.

INFLUENCE OF CUTTING CONDITIONS ON SURFACE ROUGHNESS DURING ELECTROCHEMICAL GRINDING OF CORROSION-RESISTANT STEEL 12X18H10T

Borisov M.A., Ph.D (Engineering), Associate Professor, e-mail: borisovmgou@mail.ru
Nikolaev V.V., Graduate students, e-mail: slavik.nikolaev.1997@mail.ru

I. N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

Abstract

At present, a special place among the manufactured products is occupied by parts made of corrosion-resistant materials, for example, corrosion-resistant steel of the following content: 0.12% C, 18% Cr, 10% Ni, 1% Ti. Such materials are used in mechanical engineering, aircraft construction, food and other industries. It has high requirements for the quality of the surface layer. The quality indicators include, among other things, the roughness of the treated surface. The required surface roughness is achieved during finishing operations. Corrosion-resistant steels have high physical and mechanical properties and are classified as difficult to machine materials. In this regard, there are problems with its processing and the achievement of the required roughness of the surface layer. One of the effective methods for processing difficult-to-machine materials is the method of electrochemical grinding with a diamond tool on a metal bond. It has several advantages over traditional finishing methods. The aim of the work is to determine the effect of cutting modes on the surface roughness during electrochemical grinding of corrosion-resistant steel. In the course of the work, a matrix for planning experiments is drawn up and experiments are carried out to identify the effect of cutting modes on the roughness of the processed surface. The values of cutting conditions at which the roughness of the machined surface is minimal are established.

Keywords

Electrochemical grinding, combination machining, diamond tools, surface quality, roughness, corrosion-resistant steel

УДК 621.789+621.923

УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НИТИНОЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ШЛИФОВАНИЯ

Д.Ю. КАЗИМИРОВ, канд. техн. наук, доцент
А.В ПРОКОПЬЕВА, ст. преподаватель
А.Д. АСТАХОВ, студент
О.А. МЕДВЕДЕВ, студент
А. Д. ЛУШПЕЙ, студент
(ИРНИТУ, г. Иркутск)

Казимиров Д.Ю. – 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Иркутский национальный исследовательский технический университет
e-mail: kazimirdenn@gmail.com

Указаны причины плохой обрабатываемости нитинола резанием и предложено решение проблемы путем воздействия плазмой и шлифования обрабатываемой поверхности. Представлены некоторые результаты исследования абразивной обработки нитинола, предварительно подвергнутого плазменному упрочнению на установке. Показано изменение микротвердости поверхности после стадий упрочнение - шлифование. Оценена степень упрочнения, характеризующая остаточный аустенит. Определен необходимый припуск под обработку для удаления аморфного слоя плоским шлифованием. Показано улучшение плоскостности сравнением топографии исходных и обработанных поверхностей. Термоупрочнение повышает точность формы поверхности после шлифования за счет перехода поверхностного слоя из мартенситной фазы в аустенит, который лучше подвергается абразивной обработке.

Ключевые слова: шлифование, упрочнение, плазма, нитинол

Введение

NiTi-сплавы с эффектом памяти, которые относят к «умным материалам», получили уникальные свойства, которые применимы в таких сферах как медицина, нефте- и газодобыча, судо- и автомобилестроение, автоматика и робототехника, а так же авиация и космонавтика [1-5]. В настоящее время никелид титана занял место наиболее востребованного материала среди таких сплавов, особенно в авиастроении. *NiTi*-сплавы считаются труднообрабатываемыми материалами, особенно затрудняет реализацию технологического процесса деталей из никелида титана это лезвийная обработка [6-7]. При заведомо невысокой теплопроводности происходит концентрация теплоты в зоне резания, что приводит к увеличению температуры на границе раздела режущая кромка-заготовка с последующим снижением стойкости лезвийного инструмента. В связи с трудностями лезвийной обработки детали из *NiTi* формообразуют с применением электроэрозионная обработка. Но электроэрозионный процесс подходит не для всех случаев формообразования, и не устраивает для доводки существующих поверхностей. Поэтому обоснованно предлагается увеличивать долю абразивной обработке, поскольку шлифование никелида титана представляет меньше проблем [8-10]. Нитинол довольно чувствителен к термическому воздействию, может быстро менять текущее фазовое состояние, формируемое и содержанием никеля и титана, а так же последовательностью термообработки и условием

деформирования заготовки. Температура в сочетании с напряжениями в зоне резания может повлиять на микроструктуру и фазовый состав *NiTi* [11]. Во-первых, может измениться поверхностная микротвердость связанная с некоторыми механическими свойствами нитинола. Во-вторых, могут быть затронуты специальные свойства, такие как память формы и псевдоупругость. Эти виды изменений могут негативно повлиять на функциональные свойства *NiTi*, в частности эффекта памяти, которые являются основными критериями выбора никелида титана для деталей в озвученных ранее отраслях. Нитинол может находиться в двух структурных состояниях: низко-температурном - «мартенсит», и высокотемпературном - «аустенит». Мартенсит сплава резко отличается от мартенсита сталей, в которых он имеет высокую твердость и хрупкость. Напротив, мартенсит этого материала характеризуется высокой пластичностью и хорошо деформируется, а аустенит в сплаве *NiTi* более жесткий и прочный. Обрабатываемость шлифованием никелида титана зависит от их фазового состава. При обработке абразивом фазы нитинола *B*19` на первый план выходит свойство аномально высокой износостойкости, вязкости и пластичности, что и снижает качество обрабатываемой поверхности. По этой причине абразивная обработка мартенсита затруднена, особенно это касается точности формы шлифованной поверхности [12]. С увеличением содержания твердой и хрупкой *B*2 фазы в структуре нитинола микрорезание облегчается и качество поверхности обрабатываемой детали повышается.

Цель работы – повысить обрабатываемость нитинола в состоянии пластичного мартенсита локальным термическим воздействием, для этого установить величину микротвердости обработанного слоя и оценить шлифуемость по точности формы обработанной поверхности. Повышение обрабатываемости материалов можно реализовывать в процессе механической обработки [13], добавлением улучшающей термической обработки. Существует группа методов упрочнения поверхностей деталей концентрированными потоками энергии, среди них плазменное [14] и лазерное термоупрочнение. Образующиеся структуры при скоростном нагреве и охлаждении обладают твердостью выше, чем мартенсит нитинола, а соответственно ожидаемо лучшей шлифуемостью.

Методика проведения экспериментов

бразцы получены из круглого проката сплава ТН-1, производство ООО «МАТЭК-СПФ» г. Москва, разрезанные на проволочно-вырезном электроэрозионном станке с шероховатостью торца не более *Ra*1.6 мкм на цилиндры с размерами $D \times H$ = 40×35 мм. Они имели температуру обратного мартенситного перехода: Ак=+78, т.е. при 20 ^{0}С это фаза мартенсита, Обработку плазмой вели на плазморезе *Herocut HC* 3500*AF* в ручную при минимальном токе, оплавлением по торцу на проход, формируя дорожку размером меньше, чем половина диаметра, после которого происходило затвердевание, приводящие к аморфизации поверхностного слоя. Расстояние от горелки было неизменным, без реза края образца. Дополнительно обработка плазмой была в среде защитного газа. Количество обработанных образцов 2. Образцы с упрочненной поверхностью закреплялись в тисах, так что бы плоский торец цилиндрического образца был параллельным после выверки столу шлифовального станка 3Г71М. С целью снижения тепловой нагрузки при шлифовании применялись высокопористые круги, имеющие большее пространство между зернами по сравнению с обычной структурой. Известно, что круги SiC на керамических связках нашли широкое применение на операциях шлифования различных титановых сплавов. *Круг Norton* 37С46I12 *VP*, форма и размер 01 250х20х76, из черный *SiC*, зернистостью *F*40, высокой пористости. Обработка велась многопроходным шлифованием в сухую. Режим обработки: скорость круга $V_К$ 35 м/с., продольная подача заготовки $V_З$ 6 м/мин, поперечная подача $S_П$ 4 мм/двойной ход стола, глубина резания *t* 0,02 мм, припуск *z* 0,1 мм. Измерение велось на

микротвердомере ПМТ-3, только микротвердости на поверхности по Виккерсу при нагрузке 100 и 200 г., время выдержки под нагрузкой 10 с. Замеры *HV* проведены в различных точках (в зоне упрочнения малой, а также высокой скоростью и между ними – т. 1, 2 и 3 на рисунке 1 соответственно), значения указаны в Н/мм^2 по ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Кроме того контролировалась параметры шероховатости по ГОСТ 25142-82 на профилографе – профилометре модели 252 завода «Калибр».

Результаты и обсуждение

В таблице представлены результаты изменения микротвердости, показывающие увеличение в поверхностном слое доли аустенита, обладающего, большей твердостью, чем мартенсит нитинола.

Таблица

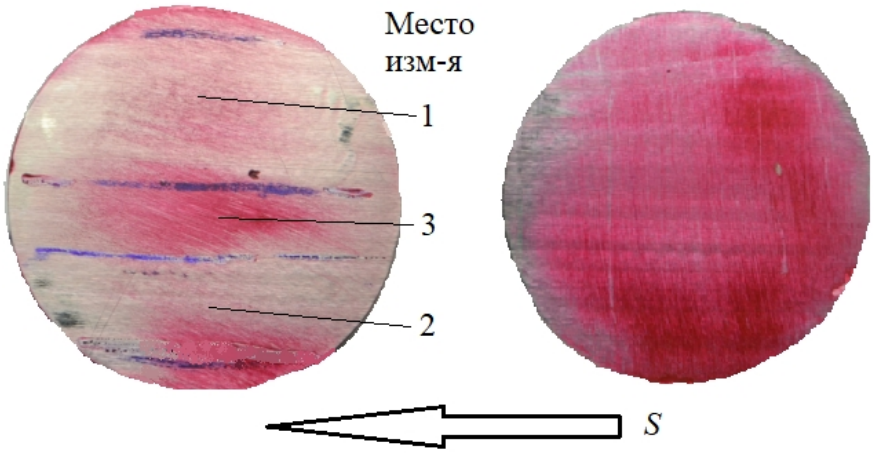
Средняя микротвердость поверхности *NiTi* для различных условий

Состояние поверхности	Микротвердость *HV*, Н/мм^2			
	Место измерения			
	1	2	3	защитная среда
Исходная	309,3			
Шлифование после упрочнение плазмой	508,7	442,5	401	412
Степень упрочнения Δ*HV*, %	64	43	29,7	33,3

Возникновение этого превращения в поверхностном слое вызвано тепловым взаимодействием на заготовку. По результатам измерений можно отметить, что средняя микротвердость после упрочнения сплава и шлифования припуска 100 мкм получается от 401*HV* для зоны между дорожками упрочнения до 508,7*HV* в зоне шлифования дорожки упрочнения сильной плазмой, а степень упрочнения соответственно от 29,7% до 64%. Отметим, что припуска 0,1 мм не хватило для удаления дефектов после обработки плазмой, поэтому его необходимо увеличивать. Так дефекты не обнаружены микроскоп после снятия припуска в 220 мкм, а микротвердость не значимо отлична от исходной 310*HV*.

Шлифование упрочненного слоя нитинола, в котором превалирует повышенная доля аустенита позволяет получать лучшую плоскостность за счет меньшего пластического оттеснения металла абразивным кругом. Точность формы определяли методом «на краску». Как видно на рисунке 1 а) краска-маркер «Красный краплак», отмечающая впадину на плоскости, отсутствует именно там, где перед шлифованием плазмой получали дорожки аморфного слоя. Между дорожками упрочнения, где микротвердость ниже, наблюдается оттеснение металла силовым фактором при шлифовании, глубина впадины 10-12 мкм. Для сравнения приведена фотография образца шлифованного без упрочнения (рисунок 1, б). Это пример поверхности, на которой видна зона пластически деформированной поверхности и край, где из-за действия теплоты мартенсит трансформирован в жесткий, хорошо шлифуемый, аустенит.

Влияние упрочнения на шероховатость, полученную абразивом, не отмечена, средняя шероховатость поверхности составляет *Ra* 0,32.



а б

Рис.1. Топографическая картина поверхности нитинола после шлифования: а – упрочненной плазмой; б – неупрочненной. *S* – направление подачи при упрочнении и шлифовании

Выводы

Упрочнение плазмой повышает обрабатываемость шлифованием нитинола, особенно после сильной плазмы, но при этом получаются дефекты значительной глубины до 0,3 мм. Степень упрочнения может достигать 60% и более. Плоскостность после стадии «упрочнение – шлифование» выше.

Список литературы

1. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities / J.M. Jani, M. Leary, A. Subic, M.A. Gibson // Materials and Design. – 2014. – Vol. 56. – P. 1078–1113. – DOI: 10.1016/j.matdes.2013.11.084.

2. *Глущенков В.А., Алехина В.К.* Многозвенные силоприводы из материала с памятью формы и их характеристики // Известия Самарского научного центра РАН. – 2017. – Т. 19, № 1 (3). – С. 483–488.

3. Morphing aircraft based on smart materials and structures / J. Sun, Q. Guan, Y. Liu, J. Leng // Journal of intelligent material systems and structures. – 2016. – Vol. 27, iss. 17. – P. 2289–2312. – DOI: 10.1177/1045389X16629569.

4. *Дюпин А.П., Пушин В.Г.* Использование эффекта памяти формы в механизме раскрытия аэродинамической поверхности управляемой ракеты // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 2 (26). – С. 47–55.

5. *Weirich A., Kuhlenkötter B.* Applicability of shape memory alloys in aircraft interiors // Actuators. – 2019. – Vol. 8, iss. 3. – P. 61. – DOI: 10.3390/act8030061.

6. Механическая обработка сплавов на основе Ti-Ni / А.В. Киричек, У. Хасьянов, А.Ю. Албагачиев, Д.У. Хасьянова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 1 (297). – С. 72–82.

7. *Kaya E., Kaya İ.* A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post process perspective // The International journal of advanced manufacturing technology. – 2019. – Vol. 100, iss. 5–8. – P. 2045–2087. – DOI: 10.1007/s00170-018-2818-8.

8. *Hood R., Aspinwall D.K., Voice W.* Creep feed grinding of gamma titanium aluminide and burn resistant titanium alloys using SiC abrasive // International journal of machine tools and manufacture. – 2007. – Vol. 47, iss. 9. – P. 1486–1492. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.10.008.

9. *Попов М.А.* Шлифование никель-титановых сплавов // СТИН. – 1981. – № 3. – С. 20–21.

10. *Потекаев А.И., Хохлов В.А., Галсанов С.В.* Природа и механизмы абразивного изнашивания материалов с памятью формы на примере никелида титана // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 2. – С. 107–111.

11. *Soler Y.I., Kazimirov D.Yu.* Influence of abrasive wheels characteristics on phases change of nitinol in different structural conditions // ARPN Journal of engineering and applied sciences. – 2020. – Vol. 15, iss. 11. – P. 1218–1233.

12. *Солер Я.И., Казимиров Д.Ю., Метляев И.А.* Повышение эффективности шлифования деталей из материалов с эффектом памяти формы // Вестник современных технологий. – 2019. – № 1 (13). – С. 12–17.

13. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом / Н.А. Резников, М.А. Шатерни, В.С. Кунин, Л.А. Резников; под общ. ред. Н.А. Резникова. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.

14. *Балановский А.Е.* Плазменное поверхностное упрочнение металлов. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. – 180 с.

SURFACE HARDENING OF NITINOL FOR INCREASED GRINDING QUALITY

Kazimirov D.Yu., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kazimirdenn@gmail.com
Prokop`eva A.V., Senior Teacher, e-mail: albanoisa@yandex.ru
Astahov A.D., Student, e-mail: unforgiven.2014@yandex.ru
Medvedev O.A., Student, e-mail: idragon19@yandex.ru
Lushpey A.D., Student, e-mail: anton.lushpej@yandex.ru

Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

Abstract

The reasons for the poor machinability of nitinol by cutting are described and a solution to the problem by plasma exposure and grinding of the processed surface is proposed. Some results of the study of abrasive treatment of nitinol, previously subjected to plasma hardening at the installation, are presented. The change in the microhardness of the surface after the processes of hardening and grinding is shown. The degree of hardening is estimated, showing retained austenite in the surface. The required allowance for flat grinding to remove the defect layer is determined. Improvement of flatness is shown; comparison of topography of initial and processed surfaces is given. Thermohardening increases the accuracy of the surface shape after grinding due to the transition of the surface layer from the martensitic phase to austenite, which is better subjected to the abrasive processing.

Keywords
grinding, hardening, plasma, nitinol

УДК 621.9.02

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧНОСТИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д.В. ЛОБАНОВ, доктор техн. наук, профессор
О.С. РАФАНОВА, аспирант
Н.А. ВЛАДИМИРОВА, магистрант
(ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г.Чебоксары)

Лобанов Д.В. – 428015, г. Чебоксары, пр-т Московский, 15,
Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова,
e-mail: mih_tm@mail.ru

В статье представлены основные показатели, характеризующие процесс лезвийной обработки композитов. Отмечены особенности полимерных композиционных материалов, специфика их обработки, с учетом используемого режущего инструмента, его геометрии, конструкции и материала. Любой производственный процесс изготовления изделий в машиностроении – это выбор наиболее выгодного варианта реализации технологического процесса с эффективными показателями, такими как производительность, надежность, гибкость и мобильность производства, экологичность и другие. Приоритетным показателем эффективности является экономичность любого технологического процесса. Целью работы является создание методики оценки экономичности режущего инструмента для обработки полимерных композиционных материалов и технологии лезвийной обработки сборным инструментом. В статье рассмотрены параметры, влияющие на оценку экономичности обработки таких материалов, и представлена методика оценки экономичности режущего инструмента для обработки полимерных композиционных материалов и технологии лезвийной обработки на примере использования сборной конструкции инструмента. Представлены пути реализации результатов на практике.

Ключевые слова: Себестоимость продукции, полимерные композиционные материалы, стойкость инструмента, работоспособность инструмента, период стойкость инструмента, лезвийная обработка сборным инструментом, фрезерование, экономичность.

Введение

Технологический процесс изготовления продукции в машиностроении характеризуется высокой сложностью, многоэтапностью, многообразием методов обработки. Выбор варианта реализации технологического процесса на стадии подготовки производства – непростая и многовариантная задача. Зачастую, на выбор оказывают эксплуатационные, качественные, экономические параметры заготовок, готовых изделий, оборудования, оснастки, инструмента, степень автоматизации и наукоемкости технологии, производительность, ресурсосбережение, гибкость и мобильность производства, надежность, экологичность. Одним из приоритетных показателей эффективности любого технологического процесса является экономичность [1].

Себестоимость продукции, при этом, является важным показателем, включающим в себя расход материальных ресурсов, использование производственных мощностей, рабочего времени, экономическую эффективность производства. Этот показатель является

обобщающим, складывающимся из расходов себестоимости отдельных элементов, которые составляют технологический процесс.

В процессе лезвийной обработки важную роль в оценке технологии играет режущий инструмент [2, 3]. Значительную часть расходов на него составляет обслуживание за весь период работы. Выделим наиболее значимый показатель для оценки режущего инструмента - его работоспособность. На него влияют инструментальный материал, геометрия режущих элементов, режимы и условия лезвийной обработки, наличие/отсутствие смазочно-охлаждающих сред. Многие авторы отмечают эффективность использования сборных конструкций инструментов, обладающих большей вариативностью использования инструментальных материалов, режущих профилей, быстросменностью, многократностью использования корпусной части [4, 5].

При обработке полимерных композиционных материалов, отличающейся от обработки металлов [6, 7, 8], требования к лезвийному инструменту значительно увеличиваются, что повышает приоритетность инструмента при экономической оценке технологии [9]. Требуется методика оценки экономичности инструмента с учетом его специфики. В связи с этим, целью работы является создание методики оценки экономичности режущего инструмента для обработки полимерных композиционных материалов и технологии лезвийной обработки таким инструментом.

Методика

Учитывая сложности процесса лезвийной обработки композитов, определяемые особенностями физико-механических свойств этих материалов, их структурой, гигроскопичностью, низкой теплопроводностью, рассмотрим параметры, влияющие на оценку экономичности обработки [10]. В качестве примера возьмем сборную конструкцию фрезы, предназначенной для лезвийной обработки полимерных композиционных материалов (ПКМ), и обозначим основные виды расходов на обработку изделий из ПКМ за ресурс одного режущего: обобщенная стоимость инструмента; расходы на смену режущих элементов; расходы на заточку/переточку режущих лезвий; основной фонд заработной платы станочника при обработке ПКМ; расходы на электроэнергию, затраченную при обработке; амортизация оборудования, применяемого при обработке, обслуживание и необходимый ремонт; расходы на композиционный материал [11, 12, 13, 14, 15].

Взяв во внимание перечисленные показатели, разработаем обобщенную методику оценки расходов на сборный режущий инструмент при срезании объема композиционного материала, приходящегося на ресурс работы инструмента.

Результаты и их обсуждение

Общие затраты на изготовление изделий из полимерных композитов одним сборным режущим инструментом (З, руб) определим по формуле:

$$З = Ф_{з.п.} + С_и + О_м + Э + А + З_{зам} + З_{восст}, \quad (1)$$

где $Ф_{з.п.}$ – основной фонд заработной платы станочника, руб.; $С_и$ – начальная стоимость инструмента, руб.; $О_м$ – расходы на удаленный обрабатываемый композиционный материал, руб.; $Э$ – стоимость электроэнергии, затраченной при снятии припуска инструментом, руб.; $А$ – амортизация оборудования, при обработке ПКМ за время ресурса

инструмента, руб; $З_{зам}$ – затраты на замену режущих элементов после их износа, руб.; $З_{восст.}$ – затраты на восстановление режущей способности инструмента, руб.

Затраты, связанные с заменой режущих элементов после их износа ($З_{зам.}$, руб.):

$$З_{зам.} = z \cdot C_{р.э.}, \quad (2)$$

где z – число режущих элементов в конструкции инструмента; $C_{р.э.}$ – стоимость одного режущего элемента, руб.

Затраты, связанные с восстановлением режущей способности инструмента ($З_{восст.}$, руб.):

$$З_{восст.} = t_{зат.} \cdot z \cdot \frac{C_{чз}}{60} \cdot i, \quad (3)$$

где $t_{зат.}$ – время на затачивание одного режущего элемента, мин; $C_{чз}$ – часовая ставка заточника, руб./ч; i – допустимое число переточек режущих элементов.

Основной фонд заработной платы станочника, обрабатывающего ПКМ ($Ф_{з.п.}$, руб.):

$$Ф_{з.п.} = P_{ри} \cdot \frac{C_{чс}}{60}, \quad (4)$$

где $P_{ри}$ – ресурс режущего инструмента, мин, $C_{чс}$ – часовая ставка станочника, руб./ч.

Ресурс лезвийного инструмента непосредственно связан с периодом стойкости инструмента [16, 17, 18, 19]. Так как основным критерием при обработке полимерных композитов является именно технологическая, а не полная стойкость инструмента, что связано с качественными параметрами обрабатываемого изделия, то именно ее мы и будем использовать для расчетов. Допустимое число переточек режущих элементов инструмента зависит от характера износа лезвия (при обработке ПКМ больший износ наблюдается по задней поверхности), от величины припуска при переточке, от свойств инструментального материала, конструкции и геометрии режущей части [20, 21, 22]. Таким образом, ресурс режущего инструмента определяется [23]:

$$P_{ри} = T_{тех} \cdot (i + 1), \quad (5)$$

где $T_{тех}$ – период технологической стойкости режущего инструмента, мин.

За время работы инструмента (снятия припуска) за весь ресурс расходуется электроэнергии ($Э$, руб.):

$$Э = P_{ри} \cdot N_{ср} \cdot C_{э}, \quad (7)$$

где $N_{ср}$ – средняя мощность резания при обработке композитов исследуемым инструментом [24, 25] (рассчитывается эмпирически при предварительной обработке изделий из ПКМ на исследуемом оборудовании), кВт; $C_{э}$ – стоимость электроэнергии, руб./ кВт · ч.

Расходы на удаленный обрабатываемый композиционный материал ($O_{м}$, руб.) можно определить по формуле:

$$O_{м} = Q \cdot \rho \cdot C_{м} \cdot 10^{-9}, \quad (8)$$

где Q – объем материала, удаленного за ресурс режущего инструмента, мм^3; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м^3; $C_{м}$ – стоимость обрабатываемого композиционного материала, руб./кг.

Подставив (2), (3), (4), (7), (8) в (1), получим:

$$P = C_{и} + C_{р.э.} \cdot z + t_{зат.} \cdot z \cdot \frac{C_{ч}}{60} \cdot i + T_{тех} \cdot (i + 1) \cdot \frac{C_{ч}}{60} + T_{тех} \cdot (i + 1) \cdot N_{ср} \cdot C_{э} + Q \cdot \rho \cdot C_{м} \cdot 10^{-9} + A \quad (10)$$

Вывод

Предложенная методика позволит:

1. Соотносить технологию обработки с общим объемом выпускаемой продукции для оценки целесообразности выбора инструмента для обработки ПКМ
2. Соотносить технологию с себестоимостью для анализа вариантов снижения затрат.
3. Использовать в качестве показателя для комплексной оценки технологии в совокупности с другими показателями

Список литературы

1. Экономика предприятия: учебное пособие / С.Ш. Лейба, А.С. Айрапетян, А.Н. Зотов, А.Н. Граблев. – М.: Научные технологии, 2018. – 242 с.
2. *Солоненко В.Г., Рыжкин А.А.* Резание металлов и режущие инструменты: учебное пособие для вузов. – 2-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2008. – 414 с.
3. Резание материалов: учебник / Е.Н. Трембач, Г.А. Мелетельев, А.Г. Схиртладзе, В.П. Борискин, А.И. Пульбере. – Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2005. – 512 с.
4. Резание материалов. Режущий инструмент. В 2 ч.: учебник для СПО / А.Г. Схиртладзе, В.А. Гречишников, Н.А. Чемборисов, С.Н. Григорьев, И.А. Савин. – М.: Юрайт, 2020. – Ч. 1. – 263 с.
5. *Рычков Д.А, Янюшкин А.С.* Технология механической обработки композиционных материалов: монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 224 с.
6. *Зыбина А.В., Савин И.А.* Вопросы применения современных технологий повышения стойкости режущего инструмента. // Современные материалы, техника и технология: сборник научных статей 10 международной научно-практической конференции. – Курск, 2020. – С. 150–152.
7. *Макаров В.Ф., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В.* Исследование проблем механической обработки современных высокопрочных композиционных материалов, используемых для производства деталей авиационной и ракетно-космической техники // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2015. – Т. 17, № 2. – С. 30–41.
8. Особенности фрезерования полимерных композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Д.В. Лобанов, Е.В. Ткаченко, Н.А. Ткаченко // Системы. Методы. Технологии. – 2013. – № 2 (18). – С. 88–90.
9. Организация инструментального хозяйства при обработке композиционных материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Н.П. Петров // СТИН. – 2010. – № 11. – С. 2–4.
10. *Мешкас А.Е., Макаров В.Ф., Ширинкин В.В.* Технологии, позволяющие повысить эффективность обработки композиционных материалов методом фрезерования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8/2. – С. 291–299.
11. *Макаров В.Ф., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В.* Оптимизация процесса обработки высокотехнологичных композиционных материалов методом фрезерования // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: материалы 7 Всероссийской научно-технической конференции. – Уфа: РИК УГАТУ, 2017. – С. 9–17.
12. Исследование процесса фрезерования стеклопластиков / Е.Ю. Лапенков, С.А. Катаева, С.В. Гайст, П.О. Черданцев, А.М. Марков // Вестник алтайской науки. – 2015. – № 3–4 (25–26). – С. 39–44.

13. Конструкции фрез для обработки стеклопластиков / С.А. Катаева, А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.В. Гайст, Е.Ю. Лапенков // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 307–312.

14. Новые конструктивные решения сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков, А.М. Кузнецов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2013. – Т. 1. – С. 153–157.

15. *Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А.* Технологические методы изготовления и выбора режущего инструмента для фрезерования композиционных материалов на полимерной основе // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 35–46.

16. Рационализация процесса фрезерования труднообрабатываемых композиционных материалов твёрдосплавным инструментом / А.М. Кузнецов, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Е.А. Слепенко, Д.А. Рычков // Механики XXI веку. – 2008. – № 7. – С. 196–200.

17. *Рычков Д.А., Янюшкин А.С.* Способ повышения эффективности производства изделий из полимерных композитов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 3 (72). – С. 23–30. – DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30.

18. *Yanyushkin A.S., Rychkov D.A.* The process of composite materials machining cutting tools profiling // Procedia Engineering. – 2017. – P. 944–949. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.576.

19. *Rychkov D.A., Yanyushkin A.S.* The methodology of calculation of cutting forces when machining composite materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142, iss 1. – P. 012088. – DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012088.

20. *Рычков Д.А.* Рационализация параметров фрезерования полимерных композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 100–105.

21. Формирование режущей кромки фрезерного инструмента для обработки слоистых композиционных материалов, армированных стеклянными волокнами / Д.А. Рычков, В.А. Скрипняк, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2 (22). – С. 42–46.

22. *Лобанов Д.В., Владимирова Н.А., Рафанова О.С.* Особенности процесса лезвийной обработки полимерных композиционных материалов и формообразования режущего инструмента // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: материалы 4 международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Пермь, 14–15 дек. 2020 г. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2021. – С. 141–144. – ISBN 978-5-398-02489-0.

23. Восстановление режущего инструмента для обточки колесных пар вагонов / А.А. Рауба, А.Ю. Попов, Б.П. Гриценко, О.А. Кашин, Ю.П. Шаркеев // Транссиб-99: материалы региональной научно-практической конференции, Новосибирск, 24–25 июня 1999 г. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 1999. – С. 384–387. – ISBN 5-93461-006-6.

24. Особенности обработки длинных ножей на специальных заточных станках / Г.И. Смагин, Н.Д. Яковлев, В.Ю. Скиба, Е.В. Карпов, Д.А. Мишанова, Е.С. Нахимова, А.Б. Цюпко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 1 (58). – С. 32–36.

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

ESTIMATION OF THE ECONOMY OF COMPOSITE MATERIALS BLADE PROCESSING

Lobanov D.V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: lobanovdv@list.ru
Rafanova O.S., Post-graduate Student, e-mail: olesya-karamaeva89@mail.ru
Vladimirova N.A., Master's Degree student, e-mail: nata1410_1997@mail.ru

I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

Abstract

The paper presents the main indicators characterizing the process of blade processing. The features of polymer composite materials, the specifics of its processing, taking into account the used cutting tool, its geometry, design and material, are noted. Any production process for the manufacture of products in mechanical engineering is the choice of the most profitable option for the implementation of the technological process with effective indicators such as productivity, reliability, flexibility and mobility of production, environmental friendliness and others. The priority indicator of efficiency is the efficiency of any technological process. The aim of the work is to create a methodology for assessing the efficiency of cutting tools for processing polymer composite materials and technology of blade processing with prefabricated tools. The paper discusses the parameters that affect the assessment of the efficiency of processing such materials, and presents a methodology for assessing the efficiency of cutting tools for processing polymer composite materials and blade processing technology on the example of using a prefabricated tool structure. The ways of implementing the results in practice are presented.

Keywords
Cost of production, polymer composite materials, tool life, tool performance, tool life period, blade processing with assembled tools, milling, profitability.

УДК 658.513.4

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МАШИННОГО ВРЕМЕНИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНО-ШТАМПОВОЧНОЙ ОСНАСТКИ НА СТАНКАХ С ЧПУ

А.С. ИСАЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент
Д.И. СТОЛЯРЕНКО, студент
(ИРНИТУ, г. Иркутск)

Исаченко А.С. – 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
e-mail: isachenko.alexey.irk@gmail.com

При изготовлении заготовительно-штамповочной оправки на станках с ЧПУ одним из аспектов технологической подготовки производства является частая необходимость в перестроении цехового расписания вследствие введения нового приоритетного изделия, машинное время для изготовления которого неизвестно. Традиционные методы оценки машинного времени или неприменимы, или не дают точного значения в связи с пренебрежением геометрической формой изделия или динамическими характеристиками станка. Авторами предложен расчетный метод оценки машинного времени на основе скорости удаления материала. Для приближения расчетного значения к реальным экспериментально были получены поправочные коэффициенты, учитывающие данные факторы. Применение данного метода позволило предварительно оценить машинное время изготовления заготовительно-штамповочной оснастки для перестроения цехового расписания за 1 минуту.

Ключевые слова: машинное время, скорость удаления материала, цеховое планирование, оценка машинного времени

Введение

Одним из важных аспектов технологической подготовки производства является цеховое планирование, определяющее оптимальный порядок запуска изделий в производство с такими критериями, как наименьшее время простоя оборудования, наименьшее количество наладок оборудования, и т.п. [1]. Главным параметром при составлении цехового расписания является основное время. Точность оценки основного времени важна для оценки себестоимости изделия и эффективности планирования, а быстрота самого процесса оценки критична для своевременности выпуска изделия [2].

Предварительная оценка основного времени механообработки основывается на следующих факторах: скорость удаления материала, управляющая программа, характеристики станка и геометрия детали [3].

Подходы, основывающиеся на скорости удаления материала станков, геометрических элементах обрабатываемой детали, и шероховатости поверхностей описаны в работах [4-8].

Одним из наиболее простых методов оценки машинного времени является оценка при помощи встроенных функций программного обеспечения для создания управляющих программ для станков с ЧПУ. Данный метод не может дать достаточно точный результат, так как он игнорирует динамические и другие характеристики оборудования. Работы [9-14] описывают подходы на основе файлов конфигурации станков для симуляции рабочих условий. Также, существуют подходы, основывающиеся на проведении эксперимента с

целью выявления коэффициента или функциональной зависимости, при помощи которых время, определенное программным обеспечением, можно привести к реальному машинному времени.

Методы, основывающиеся на искусственном интеллекте, моделирования при помощи нейронных сетей или нечетких множеств, как правило, не отличаются точностью в связи с неполной информацией [15-17].

В реальных производственных условиях возможны ситуации, когда при изменении приоритета изготовления деталей требуется срочный перерасчет цехового расписания. В таких случаях наиболее важным элементом является быстрота оценки основного времени, а не ее точность. В связи с тем, что создание управляющей программы и ее постпроцессирование может занимать значительное время, целесообразным является разработка методики оценки машинного времени, не требующей готовой управляющей программы. Для решения поставленной задачи был предложен метод, основывающийся на скорости удаления материала, модифицированный введением экспериментально полученных коэффициентов для учета особенностей геометрии детали и динамических характеристик оборудования.

Методика экспериментального исследования

Учитывая отсутствие управляющей программы и жестких требований к точности предварительной оценки машинного времени, следует применить подход, основывающийся на скорости удаления материала, геометрии детали, а также дополнить данный подход учетом характеристик металлорежущего оборудования.

Исследования и последующий эксперимент были проведены в цехе изготовления неметаллической оснастки заготовительно-штамповочного производства, где проблема необходимости быстрого изменения цехового расписания является актуальной. Изделия, изготавливаемые в данном цехе на фрезерных станках с ЧПУ, отличаются большим диапазоном размеров, единичным выпуском, и значительными вариациями геометрической формы.

Традиционно, в рассматриваемом производстве составление цехового расписания основывалось на машинном времени, определенном после создания управляющей программы в среде *Siemens Unigraphics NX* 12, однако реальное время обработки на станках сильно отличалось. Экспериментальные исследования позволили вывести коэффициент K = 1.4, который применялся к времени, рассчитанному к среде *Unigraphics NX* 12. Такой учет динамических характеристик станков позволил с достаточной точностью приблизить расчетное машинное время к реальному, но не избавил от необходимости в написании управляющей программы для оценки времени обработки.

Основными операциями в данном типе производства являются черновое фрезерование объема материала, получистовое фрезерование поверхностей, и чистовое фрезерование поверхностей, так как требования к рабочим поверхностям практически неизменны для разных типов изделий. Другие операции, такие как разметка рабочего контура и сверление отверстий, имеют незначительное машинное время, поэтому ими целесообразно пренебречь. При наличии стандартизированных на основе производственного опыта режимов резания и используемых для данных операций инструментов, при помощи генерации управляющих программ в среде *Unigraphics NX* 12 были вычислены скорости удаления материала для каждой операции и каждого станка, в расчете на 1 м^3 для чернового фрезерования и 1 м^2 для получистового и чистового фрезерования.

Далее, был составлен классификатор изготавливаемых изделий, признаком классификации которого являются конструктивные элементы, влияющие на машинное

время. Были выделены такие классы, как «лекала», «основания», «болванки для патрубков», и т.п.

Объем удаляемого материала рассчитывается путем использования встроенной функции подсчета объема твердого тела в среде *Unigraphics N*X 12, не учитывая элементы заготовки, не подвергающиеся обработке, такие как приливы для установки прихватов. Для нескольких представителей каждого класса изделий были написаны управляющие программы и вычислены значения машинного времени при помощи расчетной скорости удаления материала. Машинное время, вычисленное в среде *Unigraphics NX* 12, сравнивалось с расчетным.

Результаты и обсуждение

Результаты сравнения показаны в таблице 1.

Таблица 1

Результат сравнения машинного времени, вычисленного двумя способами

Класс изделия	Вид обработки	Наибольшее отклонение
Лекала	Черновая	277%
	Получистовая	14%
	Чистовая	4%
Основания	Черновая	-9%
	Получистовая	-4%
	Чистовая	-1%
Болванки для патрубков	Черновая	365%
	Получистовая	45%
	Чистовая	13%

Наибольшим отклонением между машинным временем, вычисленным двумя способами, характеризуется черновая обработка, и чем больше кривизна рабочей поверхности, тем больше расхождение. Несмотря на значительное относительное отклонение, абсолютное значение наибольшего расхождения не превышает 40 минут. Значения, рассчитываемые по скорости удаления 1 м^2 материала на получистовых и чистовых операциях, близки к значениям, вычисленным *Unigraphics NX* 12. На данных операциях наибольшее абсолютное значения расхождения составляет 15 минут.

Принимая во внимание выявленные зависимости машинного времени от конструкции изделия, для каждого класса изделия и вида обработки должны быть введены поправочные коэффициенты. Суммарное машинное время, рассчитанное по скоростям удаления материала и модифицированное данными коэффициентами, умножается на коэффициент К = 1.4, учитывающий динамические характеристики оборудования. Это конечное значение может быть использовано для предварительного перестроения цехового расписания, которое впоследствии может быть скорректировано после написания управляющих программ.

Путем хронометража было получено время выполнения процесса оценки машинного времени, равное 1 минуте.

Выводы

Особенности рассматриваемого производства являлись предпосылками к использованию метода оценки машинного времени на основе скорости удаления материала. Для приближения расчетного значения к реальным экспериментально были получены

поправочные коэффициенты, учитывающие влияние геометрической формы каждого класса деталей и динамические характеристики оборудования. Применение данного метода позволило предварительно оценить машинное время изготовления заготовительно-штамповочной оснастки для перестроения цехового расписания за 1 минуту.

Список литературы

1. *Умнов П.И.* Предварительный расчет машинного времени механической обработки на металлообрабатывающих станках с ЧПУ // Теория и практика современной науки: сборник статей 2 международной научно-практической конференции, Пенза, 20 авг. 2020 г. – Пенза: Наука и Просвещение, 2020. – С. 18–22. – ISBN 978-5-00159-522-9.

2. Product cost estimation: technique classification and methodology review / A. Niazi, J.S. Dai, S. Balabani, L. Seneviratne // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2006. – Vol. 128, iss. 2. – P. 563–575. – DOI: 10.1115/1.2137750.

3. A feature-based method for NC machining time estimation / C. Liu, Y. Li, W. Wang, W. Shen // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2013. – Vol. 29, iss 4. – P. 8–14. – DOI: 10.1016/j.rcim.2012.10.001.

4. *Hbaieb M., Othmani R., Bouzid W.* Time modeling in high-speed machining of mold pocket // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2010. – Vol. 53, iss. 1–4. – P. 113–120. – DOI: 10.1007/s00170-010-2844-7.

5. *Jung J.J.* Manufacturing cost estimation for machined parts based on manufacturing features // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2002. – Vol. 13, iss. 4. – P. 227–238. – DOI: 10.1023/A:1016092808320.

6. *Othmani R., Bouzid W., Hbaieb M.* Machining time in rough milling // Materials Technology. – 2008. – Vol. 23, iss. 3. – P. 169–173. – DOI: 10.1179/175355508X266953.

7. *Shehab E.M., Abdalla H.S.* Manufacturing cost modeling for concurrent product development // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2001. – Vol. 17, iss. 4. – P. 341–353. – DOI: 10.1016/S0736-5845(01)00009-6.

8. *Ou-Yang C., Lin T.S.* Developing an integrated framework for feature-based early manufacturing cost estimation // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 1997. – Vol. 13, iss. 9. – P. 618–629. – DOI: 10.1007/BF01350820.

9. Mechanistic approach to predict real machining time for milling free-form geometries applying high feed rate / R.T. Coelho, A.F. De Souza, A.R. Roger, A.M.Y. Rigatti, A.A. De Lima Ribeiro // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2010. – Vol. 46, iss. 9/12. – P. 1103–1111. – DOI: 10.1007/s00170-009-2183-8.

10. Estimation of NC machining time using NC block distribution for sculptured surface machining / E.Y. Heo, D.W. Kim, B.H. Kim, F.F. Chen // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2006. – Vol. 22, iss. 5–6. – P. 437–446. – DOI: 10.1016/j.rcim.2005.12.008.

11. *Kim B.H., Byoung K.C.* Machining efficiency comparison direction-parallel tool path with contour-parallel tool path // Computer-Aided Design. – 2002. – Vol. 34, iss. 2. – P. 89–95. – DOI: 10.1016/S0010-4485(00)00139-1.

12. *Mou W.P., Chu W.W., Tang L.M.* Research on accurate simulation of NC program's machining time // Tool Engineering. – 2009. – Vol. 43, iss. 11. – P. 50–54.

13. *Siller H., Rodriguez C.A., Ahuett H.* Cycle time prediction in high-speed milling operations for sculptured surface finishing // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 174, iss. 1/3. – P. 355–362. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.02.008.

14. Five-axis machining time estimation algorithm based on machine characteristics / B.S. So, Y.H. Jung, J.W. Park, D.W. Lee // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 187–188. – P. 37–40. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.159.

15. *Jahan-Shahi H., Shayan E., Masood S.H.* Multivalued fuzzy sets in cost/time estimation of flat plate processing // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2001. – Vol. 17, iss. 10. – P. 751–759. – DOI: 10.1007/s001700170121.

16. Evaluation method of machine hour of part based on case-based reasoning and SML / Q.H. Yang, G.N. Qi, Z.R. Huang, K.Q. Zheng // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2007. – Vol. 43, iss. 5. – P. 99–105. – DOI: 10.3901/JME.2007.05.099.

17. A study on the development of man2hour ratio based on artificial neural networks / L.X. Zhu, J.T. Zhou, J.J. Gao, S.S. Zhang // Mechanical Science and Technology. – 2004. – Vol. 23, iss. 6. – P.702–747.

PRELIMINARY ESTIMATE OF THE MACHINING TIME IN PRESSWORK TOOLING PRODUCTION ON CNC MACHINES

Isachenko A. S., Ph.D. (Engineering), Associate professor, e-mail: isachenko.alexey.irk@gmail.com

Stolyarenko D. I., Undergraduate student, e-mail: stolyarenko.danya@bk.ru

Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

Abstract

One of the aspects of manufacturing presswork tooling using CNC machines is a frequent need of workshop schedule adjustment due to fast tracking a high-priority part, which machining time is unknown. Traditional machining time estimation methods either cannot be applied or provide inadequate accuracy due to considering such parameters as the design's geometrical features and the machine's dynamic characteristics as negligible. Authors propose a preliminary method of machining time estimation based on material removal rates. To approximate the calculated values to the actual values, an experiment was conducted to deduce coefficients that take the aforementioned factors in account. Usage of this method allowed preliminarily estimating the presswork tooling machining time for workshop rescheduling in the span of a single minute.

Keywords

machining time, material removal rate, workshop scheduling, machining time estimation

УДК 66.087: 666.247.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОХРОМНЫХ ПЛЕНОК WO_3 НА ПОВЕРХНОСТИ ITO-ЭЛЕКТРОДА МЕТОДОМ ХРОНОАМПЕРОМЕТРИИ

А.В. ЩЕГОЛЬКОВ, исследователь,
исследователь-преподаватель,
(*ТГТУ, г. Тамбов*)

Щегольков А.В. – 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д.106,
Тамбовский государственный технический университет,
e-mail: alexxx5000@mail.ru

В РФ и зарубежом в последнее время, всё большее применение находит метод электрохимического осаждения металлических покрытий (плёнок) на поверхности электропроводящих изделий с целью получения функциональных, защитных и эксплуатационных свойств, таких как антикоррозионные, антибактерицидные, радиопоглощающие, светопоглощающие и т. д. В частности электрохромные пленки WO_3 для получения фотоэлектрических покрытий для оптических переключателей модулирующих световое излучение, т. е. для «smart» окон, различных датчиков, обладающих высокой адгезией.

В настоящей работе, была изучена методика получения электрохромных пленок WO_3 – катодным электроосаждением на поверхности ITO-электрода. Рассмотрены различные факторы, которые влияют на формирование пленок WO_3, такие как форма тока, концентрация раствора электролита. Методом хроноамперометрии исследован процесс формирования электрохромных пленок WO_3, полученных на поверхности ITO-электрода.

Ключевые слова: Электрохромная пленка WO_3, электрохимическое осаждение, хроноамперометрия.

Введение

Электрохимическое осаждение – процесс нанесения ионов металла на токопроводящую поверхность подложки благодаря пропусканию тока через электролит, содержащий химические элементы осаждаемого материала [1, 2]. В результате чего формируются как однородные по составу, так и многокомпонентные кристаллические, монокристаллические или наноструктурированные покрытия из различных металлов или их соединений и полупроводников с хорошими адгезионными свойства к поверхности подложки. Основными преимуществами метода электрохимического осаждения являются: не сложная технология и оборудование, экономичность (не высокие энергозатраты), низкая температура обработки изделия (в большинстве случае комнатная), нанесения покрытия любой формы. Выделяют такие ключевые параметры электрохимического осаждения как плотность тока, напряжение, температура, время осаждения, условия перемешивания и концентрацию активных компонентов в растворе электролита. При этом следует отметить, что на качество (равномерность) существенным образом влияет подготовка поверхности катодного материала, а также электропроводность раствора электролита. Вследствие катодного осаждения происходит реакция восстановления водорода, интерколирование его в состав пленок. Теоретически толщину пленки *d*, осаждаемого металла или его соединения на поверхность подложки, в случае отсутствия побочных реакций, определяют на основании

закона Фарадея по следующей зависимости:

$$d = \frac{M}{nF\rho}\int J(t)\,dt \qquad (1)$$

где: M – атомная масса; ρ – объемная плотность металла; n – количество электронов, участвующих в восстановлении; $J(t)$ – плотность электрического тока, при которой осуществляется катодное осаждение.

Повышение скорости равномерного осаждения добиваются за счёт оптимальной геометрии электродов (формы), а также концентрации раствора, вследствие чего увеличивается его электропроводность и однородность осаждаемого слоя. При этом следует учитывать рельеф (микрошероховатость) на поверхности электрода, из-за того, что на микровыступах плотности тока возрастают, а на впадинах – уменьшаются. Поэтому при осаждении степень шероховатости увеличивается. Для осаждения используют различные формы тока, наиболее распространены импульсные [2]:

— прямоугольные импульсы, чередующиеся с паузами, причем длительность паузы выше длительности импульса;

— реверсивные режимы чередования катодных и анодных импульсов, чередующиеся с паузами;

— импульсы повышенного тока на фоне постоянного тока;

— сложные программируемые режимы.

Катодное электроосаждение индивидуальных компонентов из раствора электролита обычно происходит в интервале потенциалов не выше + 0,3 В, после чего скорость осаждения уменьшается или качество пленки становится низким.

Нанопористые и нанотрубчатые структуры из WO_3, являющихся широкозонными полупроводниками, активно осваиваются для фотоэлектрических и фотокаталитических применений [3-9]. При этом свойства WO_3 мало изучены, также существует проблема равномерного нанесения электрохромных пленок WO_3 на ITO-электрод с помощью катодного электроосаждения [10-14].

Целью исследования является установления закономерности нанесения электрохромных пленок WO_3 на поверхность электрода ITO.

Задачи исследования включают в себя:

1. Катодное осаждение электрохромных пленок WO_3 на поверхности ITO-электрода.

2. Исследование закономерности формирования электрохромной пленки методом хроноамперометрии.

Материалы и методы

Нанопорошок вольфрама (W: чистота 99.55 %, размер частиц 40-70 нм, удельная площадь поверхности 6 $м^2$/г) производство ООО Плазмотерм (РФ, г. Москва). Перекись водорода (30 % H_2O_2) производитель НПФ «Невский химик». PET/ITO-электроды (In_2O_3: удельное поверхностное сопротивление ~ 25 Ом/кв) представляющие оксид индия, легированного олова, нанесённого на PET (полиэтилентерефталат-термопластик) производство Sigma Aldrich (Германия).

Раствор электролита для осаждения электрохромной пленки WO_3 на катоде, приготовлен на основе перокси-вольфрамовой кислоты (ПВК) в соответствии с методикой описанной в [15]. При этом реакция синтеза ПВК принимает вид :

$$2W + 10H_2O_2 \xrightarrow{t=40^\circ C} W_2O_{11}^{-2} + 2H^+ + 9H_2O \qquad (2)$$

На поверхность приготовленных ITO-электродов осаждались электрохромные пленки WO_3 при фиксированном потенциале -1 В до 1 ч. с использованием потенциостата PalmSens 4 (Нидерланды). В процессе осаждения пленок WO_3 раствор ПВК перемешивали для равномерного и однородного осаждения электрохромного слоя WO_3 на поверхность электрода ITO. Полученные синие пленки промывали в деионизированной воде для удаления компонентов раствора. Схема осаждения электрохромных пленок WO_3 представлена на рис. 1.

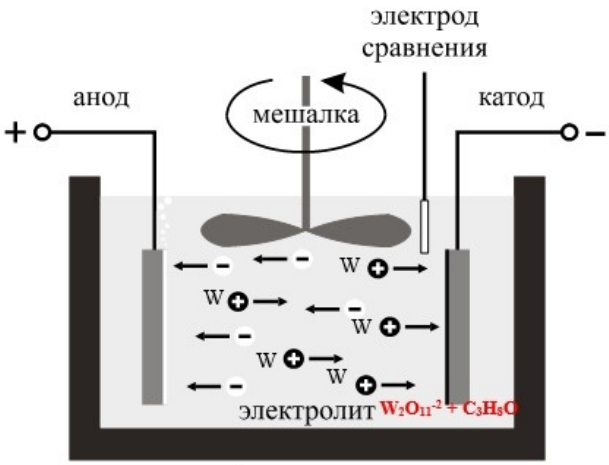
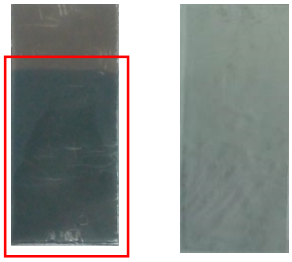


Рис. 1. Схематическое представление катодного осаждения тонкой пленки WO_3 на поверхность ITO-электрода.

При электроосаждении на постоянном потенциале, проводили регистрацию зависимости тока от времени, то есть хроноамперограмму, которая показывает, происходит ли рост поверхности или ее пассивация в процессе электроосаждения. Измерения проводили в трехэлектродной ячейке с хлорсеребряным электродом сравнения и платиновым вспомогательным электродом на потенциостата PalmSens 4.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные образцы электрохромных пленок WO_3 были изготовлены для различных режимов электроосаждения в зависимости от времени нанесения пленки, диапазон осаждения варьировался 900…3600 с, при этом время осаждения на прямую влияет на рост (толщину) плёнки WO_3 в соответствии с зависимостью (1).



а) б)

Рис. 2. Образцец электрохромной пленки WO_3 на поверхности ITO-электрода:
а) – восстановленный образец после катодного осаждения;
б) – образец окисленный на воздухе после 30 мин.

Электрохромная пленка WO_3 на ITO-электроде представляет область с тёмно-синем окрасом, которая наблюдалась сразу после осаждения, через некоторое время данная область снова окисляется на воздухе и становится невидимой (прозрачной) на поверхности ITO-электрода, как представлено на рис. 2а.

Управляющим фактором при электроосаждении является потенциал электрода, который и определяет кинетику процесса при заданном составе раствора электролита. При этом катодная реакция восстановления ионов металла W^+ с образованием W^-, возможна при отклонении электрохимического потенциала E от равновесного значения, т.е. зависимость можно представить в виде уравнения Нернста [1, 2]:

$$E < E_p = E^0 + \frac{RT}{F} \ln a_{W^{z+}} \quad (2)$$

Образцы электрохромных пленок WO_3, были получены из 100 и 200 *m*M ПВК. В процессе осаждения фиксировалась хроноамперограмма и осциллограмма U(*t*) между рабочим электродом (электрохромная пленка WO_3) и противоэлектродом.

Хроновольтамперограммы восстановления ПВК на ITO-электроде (рис. 3) имеют особые точки только при скорости развертки потенциала 2 мВ/с, что свидетельствует о восстановлении ПВК через стадию образования на электроде пленки. На катодной кривой при скорости развертки 2 мВ/с наблюдаются слабо выраженные предельные токи при потенциалах -0,2 В и -0,6 В, кроме того при потенциале -0,74 В — наблюдается скачок тока и далее еще один слабо выраженный предельный ток.

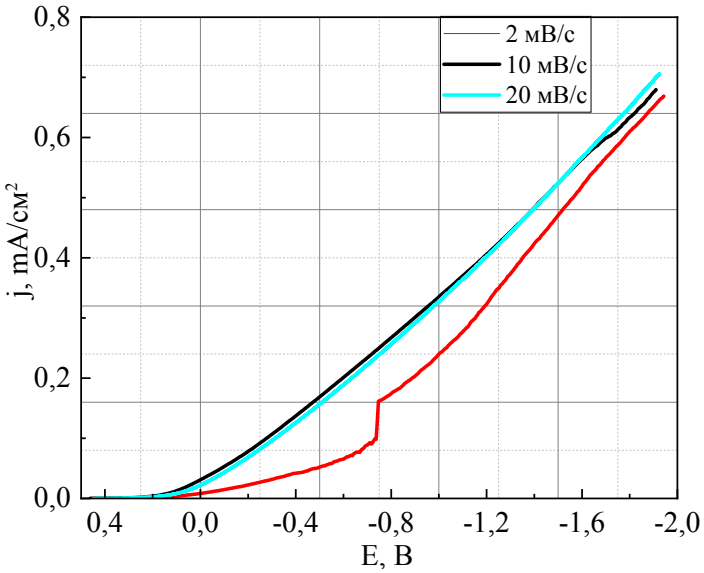


Рис. 3. Хроновольтамперограммы восстановления ПВК на PET/ITO.

Катодный процесс (рис.4) проходит, через стадию образования частично восстановленной пленки, после чего в нее начинается интеркаляция ионов водорода, что приводит к скачкообразному увеличению электропроводности. В начальный период плотность тока возрастает вследствие образования вольфраматной пленки, что сопровождается ростом поверхности электрода. После формирования пленки начинается спад тока, связанный с ее восстановлением.

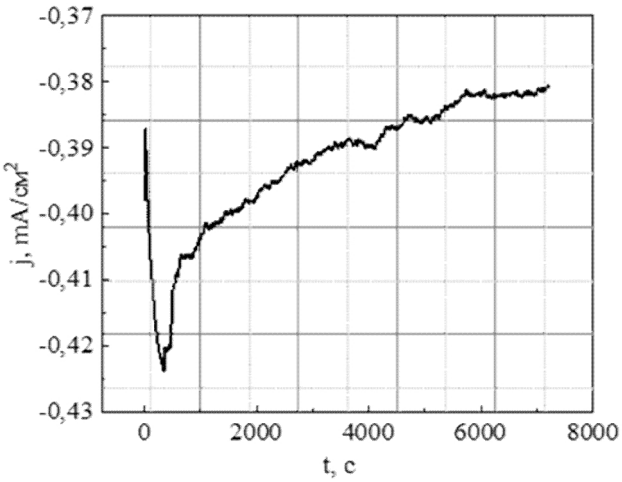


Рис. 4. Хроноамперограмма катодного восстановления ПВК при потенциале -1 В.

Выводы

Разработана методика катодного электроосаждения кристаллических наночастиц W на поверхность ITO-электрода, включающая в себя следующие стадии: синтез ПВК, подготовку электродов перед эдектроосаждением; выбор режимов (потенциал, время осаждения и концентрация раствора ПВК) катодного электроосаждения WO_3 на поверхности различных электропроводящих электродов. Исследована закономерность осаждения электрохромных пленок WO_3 на поверхности ITO-электрода, было установлено, что восстановление пероксовольфрамовых анионов протекает через стадию адсорбции на поверхности электрода, после чего образуется пленка-прекурсор, из которой происходит восстановление пероксовольфрамат-ионов до оксидов вольфрама.

Список литературы

1. The CRC handbook of solid state electrochemistry / eds.: P.J. Gellings, H.J.M. Bouwmeester. – Boca Raton: CRC Press, 1997. – 618 p. – ISBN 0-8493-8956-9.

2. *Bockris J.O'M., Reddy A.K.N., Gamboa-Aldeco M.* Modern electrochemistry. Fundamentals of Electrodics. – New York: Kluwer academic publishers, 2002. – Vol. 2A. – 817 p.

3. *Ashrit P.* Transition metal oxide thin film-based chromogenics and devices. – [S. l.]: Elsevier, 2017. – 357 p. – ISBN 978-0-08-101899-6.

4. Start-Up Creation. The Smart Eco-Efficient Built Environment / F. Pacheco-Torgal, E. Rasmussen, C.-G. Granqvist, V. Ivanov, A. Kaklauskas, S. Makonin. – [S. l.]: Elsevier, 2016. – 483 p. – ISBN 978-0-08-100546-0.

5. *Granqvist C.G.* Electrochromic tungsten oxide films: review of progress // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2000. – Vol. 60, iss. 3. – P. 201–262.

6. Development of Tungsten Trioxide Using Pulse and Continuous Electrodeposition and its Properties in Electrochromic Devices / E. Vijayakumar, Y.-H. Yun, V.H.V. Quy, Y.-H. Lee, S.-H. Kang, K.-S. Ahn, S.W. Lee // Journal of the Electrochemical Society. – 2019. – Vol. 166, iss. 4. – P. D86–D92. – DOI: 10.1149/2.0271904jes.

7. Some aspects of the WO_3 films electrodeposition for application in electrochromic devices / V. Kotok, V. Kovalenko, V. Solovov, O. Zima, M. Nikolenko // Trans-Mech-Art-Chem: 11 International Students' Scientific Conference, Radom, 17–20 Oct. 2017. – Radom, 2017. – P. 1–4.

8. High perfoming smart electrochromic device based on honeycomb nanostructured h-WO_3 thin films: Hydrothermal assisted synthesis / V.V. Kondalkar, S.S. Mali, R.R. Kharade, K.V. Khot,

P.B. Patil, R.M. Mane, S. Choudhury, P.S. Patilm, C.K. Hong, J.H. Kim, P.N. Bhosale // Dalton Transactions. – 2015. – Vol. 44, iss. 6. – P. 2788–2800. – DOI: 10.1039/c4dt02953d.

9. *Kwong W.L., Savvides N., Sorrell C.C.* Electrodeposited nanostructured WO_3 thin films for photoelectrochemical applications // Electrochimica Acta. – 2012. – Vol. 75. – P. 371–380. – DOI: 10.1016/j.electacta.2012.05.019.

10. *Zhu T., Chong M.N., Chang E.S.* Nanostructured Tungsten Trioxide Thin Films Synthesized for Photoelectrocatalytic Water Oxidation: A review / ChemSusChem. – 2014. – Vol. 7, iss. 11. – P. 2974–2997. – DOI: 10.1002/cssc.201402089.

11. Electrodeposition of nano-granular tungsten oxide thin films for smart window application / A.J. More, R.S. Patil, D.S. Dalavi, S.S. Mali, C.K. Hong, M.G. Gang, J.H. Kim, P.S. Patil // Materials Letters. – 2014. – Vol. 134. – P. 298–301. – DOI: 10.1016/j.matlet.2014.07.059.

12. *Gillaspie D.-T, Tenent R.C., Dillon A.C.* Metal-oxide films for electrochromic applications: Present technology and future directions // Journal of Materials Chemistry. – 2010. – Vol. 20, iss. 43. – P. 9585–9592. – DOI: 10.1039/c0jm00604a.

13. Basic materials physics of transparent conducting oxides / P.P. Edwards, A. Porch, M.O. Jones, D.V. Morgan, R.M. Perks // Dalton Transactions. – 2004. – Iss. 19. – P. 2995–3002. – DOI: 10.1039/b408864f.

14. Hybrid materials and polymer electrolytes for electrochromic device applications / V.K. Thakur, G. Ding, J. Ma, P.S. Lee, X. Lu // Advanced Materials. – 2012. – Vol. 24, iss. 30. – P. 4071–4096. – DOI: 10.1002/adma.201200213.

15. *Щегольков А.В., Щегольков А.В.* Электрохромные наноструктурные пленки WO_3 приготовленные электрохимическим осаждением: получение и свойства // Перспективные материалы. – 2020. – № 1. – С. 54–63. – DOI: 10.30791/1028-978X-2020-1-54-63.

INVESTIGATION OF THE FORMATION OF ELECTROCHROMIC WO_3 FILMS ON THE SURFACE OF AN ITO-ELECTRODES BY THE METHOD OF CHRONOAMPEROMETRY

Shchegolkov A.V., researcher, researcher-teacher, e-mail: alexxx5000@mail.ru

Tambov State Technical University, 106 Sovietskaya st., Tambov, Russian Federation

Abstract

Recently, in the Russian Federation and abroad, the method of electrochemical deposition of metal coatings (films) on the surface of electrically conductive products has been increasingly used in order to obtain functional, protective and operational properties, such as: anti-corrosion, antibacterial, radio-absorbing, light-absorbing, etc. in particular electrochromic films WO_3 for obtaining photoelectric coatings for optical switches modulating light radiation, i.e., for “smart” windows, various sensors with high adhesion.

In this work, the technique of obtaining electrochromic WO_3 films by cathodic electrodeposition on the surface of a PET / ITO electrode is considered, various factors that affect the formation of WO_3 films, such as the shape of the current, the concentration of the solution. The process of formation of electrochromic WO_3 films obtained on the surface of the ITO-electrode is studied by the method of chronoamperometry.

Keywords

Electrochromic WO_3 film, electrochemical deposition, chronoamperometry.

УДК 621.9.06(07): 621.785(787)

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО НАГРЕВА ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ В УСЛОВИЯХ ГИБРИДНОЙ ОБРАБОТКИ*

В.Ю. СКИБА, канд. техн. наук, доцент
В.В. ИВАНЦИВСКИЙ, доктор техн. наук, профессор
Е.А. ЗВЕРЕВ, канд. техн. наук, доцент
К.А. ТИТОВА, аспирант, ассистент
(НГТУ, г. Новосибирск)

Скиба В.Ю. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: skiba@corp.nstu.ru

В работе приводится обоснование преимущества совмещения механической и поверхностно-термической обработки, позволяющего исключить большинство недостатков, присущих монотехнологиям, а также достичь требуемых результатов с большей эффективностью, чем при раздельной обработке. Предлагается высокоэнергетический нагрев осуществлять токами высокой частоты, при этом использовать интегральную температурно-временную характеристику как основной параметр при назначении режимов поверхностного упрочнения. Выявлены зависимости указанной характеристики с другими параметрами обработки. Эмпирическим путем доказано, что при применении объемной схеме термообработки с глубиной закаленного слоя 0,5 мм показатели производительности обработки сопоставимы с показателями энергозатрат. Когда глубина закалки достигает 0,7 мм, т.е. границы горячей глубины проникновения тока в металл, затраты энергии при достижении определенной производительности снижаются.

Ключевые слова: Высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты, гибридное оборудование, поверхностная закалка, механическая обработка

Введение

Выпуск качественной и конкурентоспособной продукции – основные задачи, стоящие перед современной промышленностью, в том числе перед машиностроением [1 - 9]. Наиболее прогрессивным направлением на данном этапе развития обрабатывающей отрасли является применение методов модифицирования поверхностных слоев деталей путем воздействия на них источниками концентрированной энергии [10]. В связи с этим повышается интерес к новому типу технологического оборудования, позволяющему оказывать локальное и сверхскоростное тепловое воздействие на поверхность деталей, образуя при этом высокодисперсную метастабильную структуру с плотностью дислокаций, которая в значительной степени превосходит аналогичный показатель, получаемый посредством традиционных способов поверхностной закалки [9]. Это позволяет добиться высоких показателей прочности, твердости и вязкости обрабатываемого материала.

Высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ) - новый метод обработки металлов, появление которого обусловлено развитием технологии

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 20-48-540016

высокочастотного нагрева. Такая технология базируется на применении частот в диапазоне от 100-500 кГц, уменьшении габаритных размеров индукторов и использовании в их конструкции ферритовых магнитопроводов (рис. 1).

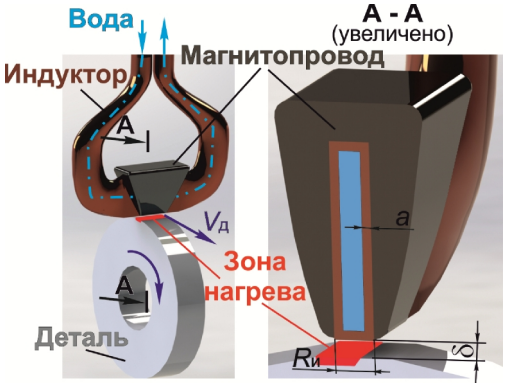


Рис. 1. Схема обработки детали при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты

Следует отметить, что закалочные установки по своей сути являются металлообрабатывающими станками, т.к. к ним предъявляются высокие требования по поддержанию постоянного зазора между обрабатываемой деталью и индуктором, который очень мал и составляет не более 0,1…0,4 мм, что является обязательным условием при осуществлении ВЭН ТВЧ.

В связи с тем, что создание нового станочного оборудования – процесс дорогостоящий и трудозатратный, предлагается провести модернизацию серийно выпускаемых металлорежущих станков посредством установки на них генераторов ТВЧ, как дополнительных концентрированных источников энергии. Принимая во внимание возможности установки на стандартное станочное оборудование, а также достижения в области микропроцессорных устройств, относящихся к тиристорным преобразователям частоты промышленного типа, в работе будут рассмотрены высокочастотные генераторы типа СВЧ.

Преимущество совмещения двух технологий – механической и поверхностно-термической обработки – заключается в устранении большинства недостатков, присущих монотехнологиям, а также в достижении новых эффектов, не характерных для использования метода раздельной обработки. Предлагаемый тип оборудования совместно с технологическими рекомендациями позволит повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции и технологической базы, т.к. является эффективным с технико-экономической точки зрения, а также ресурсо- и энергосбергающим [1 - 5, 9, 11 -20].

Необходимо отметить, что по тематике критических производств и промышленных технологий, к которым относится разработка рассматриваемого в данной работе гибридного станочного оборудования, в литературных источниках очень мало информации экспериментально-исследовательской и аналитической направленности в области проектирования и внедрения станков аналогичного типа.

Теория

Структура и глубина закаленного слоя, размер зерна аустенита, получаемые в процессе протекания структурно-фазовых превращений, находятся в непосредственной зависимости от интегральной температурно-временной характеристики нагрева, воздействующего на структуру стали, следовательно, обуславливаются течением

термического цикла [5, 9, 10]. В процессе назначения режимов закалки упрочняемого слоя с применением концентрированных источников энергии возникают проблемы, связанные с контролем температурных и скоростных параметров нагрева, что затрудняет исследование протекающих в поверхностных слоях материала процессов при поверхностной закалке. Для решения таких задач широко применяется математическое моделирование [21 - 24].

Температурно-временные условия фазовых превращений при аустенитизации стали характеризуются довольно приблизительно, если в качестве основных режимных параметров поверхностной закалки используются только максимальная температура и средняя скорость нагрева, т.к. существует необходимость учитывать ряд других показателей, таких как время нахождения материала в интервале температур фазовых превращений и среднюю скорость охлаждения материала. Исходя из этого, назначение режимов обработки должно осуществляться с тем условием, что в поверхностных слоях материала будут обеспечиваться требуемые термические циклы с заданными параметрами [9, 10, 25 - 30]. Стоит учесть, что невозможно установить четкую взаимосвязь между качественными характеристиками обрабатываемого слоя, режимами обработки и численными значениями выше указанных параметров. Об этом свидетельствуют результаты исследований, приведенные в [4, 5, 9, 10, 25 - 30]. Тем не менее, очевидным является тот факт, что для численных значений параметров термических циклов определяющим фактором является количество подаваемой в материал энергии и характер ее распределения в обрабатываемом материале.

Учитывая выше изложенное, а также основываясь на результатах работ [4, 5, 9, 10, 25 - 31], основным параметром назначения режимов поверхностной закалки предлагается применить интегральную температурно-временную характеристику S, в которой объединены все перечисленные параметры термических циклов [4, 5, 9, 10, 25 – 33].

В период времени $\tau_в = \tau_3 - \tau_1$ (рис. 2) будет протекать процесс образования аустенита. Этот процесс не связан с тем, восходящий или нисходящий характер имеет термическая кривая на данном промежутке времени. Таким образом, можем заменить два параметра – суммарное время $\tau_в$ и температуры, при которых протекает аустенитизация, – одной характеристикой S_{ABC}, которая будет представлять собой численное значение площади участка, сверху ограниченного кривой нагрева, а снизу – прямой, соответствующей температуре начала процесса аустенитизации A_{C1}. Данная характеристика описывается выражением:

$$S = \int_{\tau_1}^{\tau_3} T(\tau) d\tau - A_{C1}(\tau_3 - \tau_1). \quad (1)$$

Следующая зависимость раскрывает физический смысл этой характеристики:

$$S = Q \cdot R_T,$$

где Q – энергия, Дж, R_T – термическое сопротивление материала, ^{o}C·с/Дж.

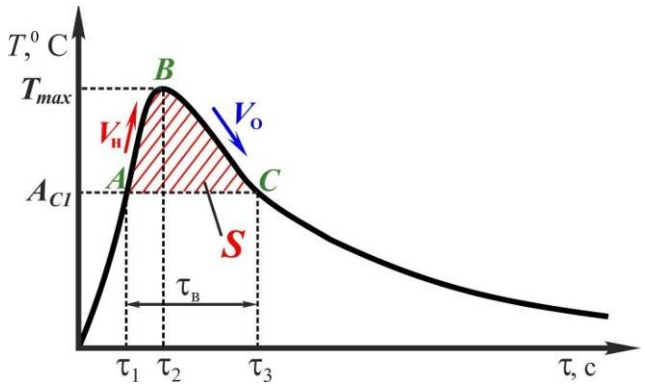


Рис. 2. Кинетическая кривая нагрева и охлаждения стали в процессе закалки

Известно, что, под термином «термическое сопротивление материала» понимают способность материала противодействовать распространению теплового движения молекул. Рассматривая случай, когда металл разогрет выше температуры A_{C1}, можем отметить, что численное значение термического сопротивления металла будет зависеть как от коэффициента теплопроводности, так и от структурно-фазовых переходов. Такие переходы протекают с поглощением теплоты, т.е. имеют эндотермический характер. Можно сказать, что данная характеристика позволяет косвенно определить количество энергии, подводимой к материалу и затрачиваемой на фазовые превращения в нем. Для ее определения при моделировании температурных полей в материале можно применить зависимость (1) [4, 5, 9, 10, 25 - 30].

Таким образом, методика назначения режимов упрочнения поверхностного слоя деталей при гибридной обработке металлов предполагает необходимость установления взаимосвязи численных значений интегральной температурно-временной характеристикой как с режимами обработки, так и с глубиной закаленного слоя [4, 5, 9, 10, 25 – 30].

Одновременное и взаимосвязанное моделирование температурных полей и структурно-фазовых превращений в материале позволяет решать задачи такого рода.

Результаты и обсуждение

Зависимость, представленная на рис. 3, показывает, что минимальные значения характеристики *S*, при котором образуется упрочненный слой, находится в пределах (4,3 > *S* > 2,5) °С·с. В реальных условиях, как правило, максимальные значения данной характеристики выше указанных значений, что подтверждают натурные и численные эксперименты [4, 5, 9, 10, 25 – 30].

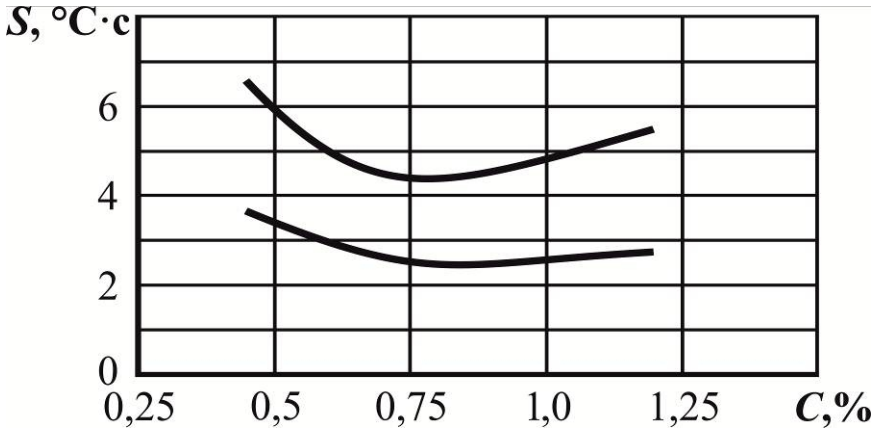


Рис. 3. Зависимость температурно-временнóй характеристики от концентрации углерода в стали

Это обусловлено тем, что значения характеристики *S* неравномерно распределяются по глубине упрочняемого материала. При чем, с уменьшением глубины упрочненного слоя значения характеристики *S* приближаются к рекомендуемым значениям, это является подтверждением того, что глубинная схема нагрева имеет большую эффективность по сравнению с поверхностной схеме нагрева.

Характеристика *S* при осуществлении глубинной схемы термообработки имеет максимальное значение 6,2 °С·с, а при поверхностной схеме термообработки максимум составляет 500 °С·с. В таком случае поверхностные слои материала при поверхностной схеме нагрева получают энергии больше, чем требуется для гомогенизации аустенита, что

способствует росту аустенитного зерна и, как следствие, получение в процессе охлаждении более крупнодисперсной структуры мартенсита. Значения максимальных температур изменяются по глубине материала с той же закономерностью, с какой изменяются характеристики *S*. При использовании указанных источников энергии эта характеристика имеет максимальные значения на глубине около 0,2 мм. Следовательно, имеет место зависимость характеристики *S*, характерной для глубины 0,2 мм, от величины закаленного слоя.

Для стали 45, 60, У8, подвергающихся поверхностному упрочнению с применением индукционного нагрева, справедлива зависимость в следующем виде:

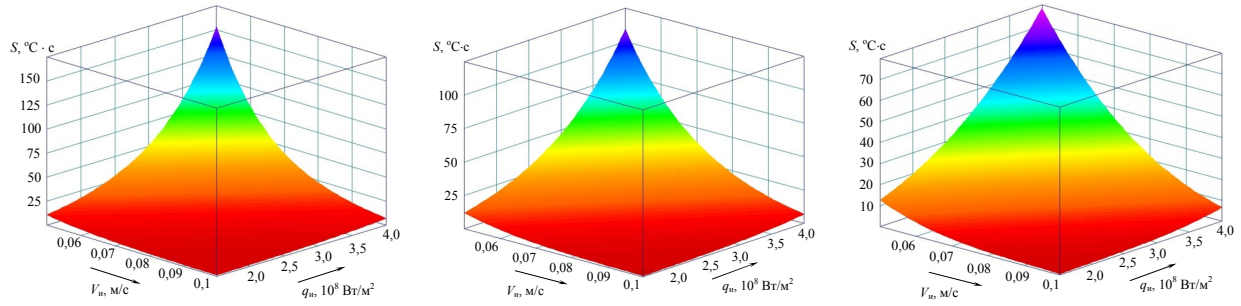
$$S(h) = 0,55 + 3,69h - 5,95h^2 + 38,62h^3, \quad (2)$$

$$S(h) = 0,77 + 3,33h - 5,36h^2 + 45,17h^3, \quad (3)$$

$$S(h) = 0,90 + 3,19h - 5,14h^2 + 50,18h^3. \quad (4)$$

После статистической обработки экспериментальных данных была выявлена функциональная зависимость интегральной температурно-временной характеристики S от технологических режимов обработки с погрешностью не более 5%. При этом скорость перемещения источника нагрева и удельная мощность – варьируемые величины. Это связано с тем, что изготовление нового индуктора – процесс трудоемкий, следовательно, с практической точки зрения для нагрева токами высокой частоты целесообразно изначально задавать размер источника, и лишь затем подбирать остальные технологические параметры [4, 5, 9, 10, 25 – 30].

Результаты исследований поверхностного упрочнения с применением индукционного нагрева на примере сталей У8, 60 и 45 представлены на рис. 4



а *б* *в*

Рис. 4. Функциональные зависимости S ($q_и$,$V_и$):
а – для стали У8; *б* - для стали 60; *в* – для стали 45

Установление зависимости характеристики *S* как от глубины упрочнения, так и от режимов обработки дает возможность более рационального подхода к назначению режимы поверхностного упрочнения стальных деталей, работающих, например, в условиях интенсивного изнашивания контактных поверхностей. Наиболее важными свойствами для таких деталей являются высокая твердость и определенная глубина упрочненного слоя. Обеспечение указанных требований к главным в этом случае техническим параметрам достигается выполнением двух основных условий: подбор соответствующей марки стали (для твердости) и назначение соответствующих технологических режимов (для глубины закалки) [4, 5, 9, 10, 25 – 30].

Ниже приведен пример применения предложенной методики назначения режимов поверхностного упрочнения деталей с применением ВЭН ТВЧ. В рассматриваемом случае будем исходить только из обеспечения глубины упрочненного слоя.

Дана цилиндрическая деталь типа диск (рис. 1), материал детали – сталь 45 и сталь У8, высота b = 20 мм, диаметр d = 32 мм, следовательно длина окружности $l \approx 100$ мм.

Осуществляется упрочнение посредством индукционного нагрева при ширине активного провода индуктора $R_и$ = 2 мм на глубину h_1 = 0,5 мм и h_2 = 0,7 мм.

На чертеже указана глубина закаленного слоя (*h*), в соответствии с которой и по зависимостям (2) и (4) определяем значения интегральной температурно-временной характеристики *S*. Данную характеристику требуется реализовать на глубине 0,2 мм. Для стали У8 она равна: при h_1 – 5,74 °С·с и h_2 – 13,46 °С·с; а для стали 45: при h_1 – 7,485 °С·с и h_2 – 17,83 °С·с. Исходя из полученных значении характеристики *S* и функциональных зависимостей (рис. 4 *а, в*) получаем функциональную зависимость технологических режимов $(V_и, q_и)$. Сечения поверхностей для стали 45 (рис. 4, *в*) и У8 (рис. 4, *а*) при соответствующих значениях характеристики *S* приведены на рис. 5. Для реализации на глубине 0,2 мм заданного значения интегральной характеристики можно использовать любое сочетание режимных параметров $(V_и, q_и)$, при условии, что они отвечают данным зависимостям, и, как следствие, обеспечить заданную глубину упрочнения при соответствующих условиях охлаждения.

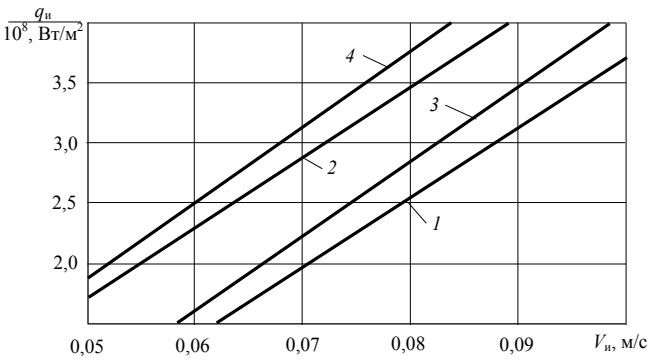


Рис. 5. Зависимость удельной мощности источника от его скорости движения при закалке ВЭН ТВЧ стали У8 и 45 на глубину: 0,5 мм – сталь У8 (*1*); сталь 45 (*3*); 0,7 мм – сталь У8 (*2*); сталь 45 (*4*)

Критериями эффективности любого процесса, в том числе и обработки ВЭН ТВЧ, являются увеличение производительности и уменьшение затрат энергии. Исходя из этого, приведем сравнение данных характеристик в рассматриваемом диапазоне режимов обработки поверхностей деталей. Технологическая производительность рассчитывалась по основному машинному времени $(\tau_о)$:

$$П_о = 1/\tau_о = V_и / l,$$

Очевидно, что она будет увеличиваться пропорционально скорости перемещения источника нагрева.

Энергозатраты (Э) на осуществление обработки проводились по формуле:

$$Э = \frac{q_и b R_и}{\frac{V_и}{l}} = \frac{q_и b R_и l}{V_и}.$$

В соответствии с результатами численного моделирования можно утверждать, что повышение производительности приводит к соответствующему росту энергозатрат на обработку. Ниже приводится сравнительный анализ минимальных и максимальных сочетаний режимов указанного диапазона:

1) сталь У8, закалка на глубину 0,5 мм: $П_{min} = 0,5 \cdot с^{-1}$, $Э_{min}$ = 0,0019 кВт · ч, $П_{max} = 1,0\ с^{-1}$, $Э_{max}$ = 0,0041 кВт · ч. Производительность повышается в два раза, повышение энергозатрат – в 2,15 раза. Прирост энергозатрат в 1,075 раза выше прироста производительности;

2) сталь 45, закалка на глубину 0,5 мм: $П_{min} = 0,5 \cdot с^{-1}$, $Э_{min}$ = 0,00216 кВт · ч, $П_{max} = 0,95\ с^{-1}$, $Э_{max}$ = 0,0044 кВт·час. Производительность повышается в 1,9 раза, энергозатраты – в 2,04 раза. Прирост энергозатрат в 1,074 раза выше прироста производительности;

3) сталь У8, закалка на глубину 0,7 мм: $П_{min} = 0,5 \cdot с^{-1}$, $Э_{min}$ = 0,0038 кВт · ч, $П_{max} = 0,85\ с^{-1}$, $Э_{max}$ = 0,0049 кВт · ч. Производительность повышается в 1,7 раза, энергозатраты – в 1,29 раза. Пприрост производительности в 1,32 раза выше прироста энергозатрат;

4) сталь 45, закалка на глубину 0,7 мм: $П_{min} = 0,5 \cdot с^{-1}$, $Э_{min}$ = 0,00416 кВт · ч, $П_{max} = 0,8\ с^{-1}$, $Э_{max}$ = 0,0052 кВт · ч. Производительность повышается в 1,6 раза, энергозатраты – в 1,25 раза. Прирост производительности в 1,28 раза выше прироста энергозатрат [4, 5, 9, 10, 25 – 30].

Заключение

На основании анализа полученных результатов можно сделать выводы:

1. При реализации чисто объемной схемы термообработки, когда глубина упрочнения составляет 0,5 мм, показатели производительности обработки сопоставимы с показателями энергозатрат.

2. При реализации объемной схемы термообработки, когда глубина упрочненного слоя составляет 0,7 мм и находится на границе *горячей* глубины проникновения тока в металл δ_K (начало промежуточной схемы нагрева), энергозатраты при достижении определенной производительности снижаются.

Это обусловлено тем, что при реализации объемной схемы градиент температуры по глубине материала и удельные мощности нагрева выше по сравнению с чисто объемной схемой. Значительная часть энергии за счет теплопроводности материала затрачивается на разогрев более глубоких слоев. Скорость движения источника возрастает, что приводит к уменьшению количества энергии, посредством теплопроводности проникающей во внутренние слои материала. Тем не менее, энергозатраты в этом случае выше, чем в случае реализации чисто объемной схемы нагрева.

Список литературы

1. *Макаров В.М.* Комплексированные технологические системы: перспективы и проблемы внедрения // Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2011. – № 6 (64). – С. 20–23.

2. *Garro O., Martin P., Veron M.* Shiva a multiarms machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1993. – Vol. 42, iss. 1. – P. 433–436. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.

3. *Макаров В.М., Лукина С.В.* Уникальная синергия гибридных станков // Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2016. – № 8. – С. 18–25.

4. *Скиба В.Ю.* Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности ранних стадий проектирования комплексированных металлообрабатывающих станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 62–83. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

5. *Скиба В.Ю., Иванцивский В.В.* Гибридное металлообрабатывающее оборудование: повышение эффективности технологического процесса обработки деталей при интеграции поверхностной закалки и абразивного шлифования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 312 с. – ISBN 978-5-7782-3690-5.

6. Manufacturing systems and technologies for the new frontier: the 41 CIRP conference on manufacturing systems, Japan, Tokyo, 26–28 May 2008 / eds.: M. Mitsuishi, K. Ueda, F. Kimura. – London: Springer, 2008. – 556 p. – DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.

7. *Борисов М.А., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С.* Гибридная технология электрохимической обработки сложнопрофильных изделий // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 25–34. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-25-34.

8. *Brecher C., Özdemir D.* Integrative production technology: theory and applications. – Cham: Springer International Publ., 2017. – 1100 p. – ISBN 978-3-319-47451-9. – DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6.

9. *Иванцивский В.В., Скиба В.Ю.* Гибридное металлообрабатывающее оборудование. Технологические аспекты интеграции операций поверхностной закалки и абразивного шлифования: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 348 с. – ISBN 978-5-7782-3988-3.

10. *Иванцивский В.В.* Управление структурным и напряженным состоянием поверхностных слоев деталей машин при их упрочнении с использованием концентрированных источников нагрева и финишного шлифования: дис. … д-ра техн. наук: 05.16.09. – Новосибирск, 2012. – 425 с.

11. Hybrid processes in manufacturing / B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink et al. // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 63, iss. 2. – P. 561–583. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.

12. *Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V.* Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 91. – P. 012051. – DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.

13. *Jeon Y., Lee C.M.* Current research trend on laser assisted machining // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2012. – Vol. 13, iss. 2. – P. 311–317. – DOI: 10.1007/s12541-012-0040-4.

14. Effects of turn-milling conditions on chip formation and surface finish / K.R. Berenji, U. Karagüzel, E. Özlü, E. Budak // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 68, iss. 1. – P. 113–116. – DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.067.

15. *Moriwaki T.* Multi-functional machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 57, iss. 2. – P. 736–749. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.

16. *Boivie K., Karlsen R., Ystgaard P.* The concept of hybrid manufacturing for high performance parts // *South African Journal of Industrial Engineering*. – 2012. – Vol. 23, iss. 2. – P. 106–115.

17. *Yamazaki T.* Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 42. – P. 81–86. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.

18. *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. – DOI:10.1016/j.ijmachtools.2009.09.001.

19. Densification, surface morphology, microstructure and mechanical properties of 316L fabricated by hybrid manufacturing / Y. Yang, Y. Gong, S. Qu et al. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 97, iss. 5/8. – P. 2687–2696. – DOI: 10.1007/s00170-018-2144-1.

20. *Nagae A.* Development Trend of Multi-tasking Machines // Proceedings of the 11th International Conference on Machine Tool Engineers, Japan, Tokyo, Nov. 3–5, 2004. – Tokyo, 2004. – P. 312–323.

21. *Григорянц А.Г., Сафонов А.Н.* Основы лазерного термоупрочнения сплавов: учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1988. – Кн. 6. – 159 с. – ISBN 5-06-001208-5.

22. *Завестовская И.Н., Игошин В.И., Шишковский И.В.* Моделирование лазерной закалки сталей с учетом тепловых, кинетических и диффузионных процессов // Физика и химия обработки материалов. – 1989. – № 5. – С. 50–56.

23. Оптимизация режимов плазменной обработки инструмента / С.С. Самотугин, О.Ю. Нестеров, А.Г. Ярмицкий, В.П. Иванов // Сварочное производство. – 1998. – № 7. – С. 12–15.

24. *Любимов В.В., Громов Е.А.* Лазерное термоупрочнение нежестких полиграфических высечных ножей из стали 65Г // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 6. – С. 14–19.

25. *Иванцивский В.В., Батаев В.А.* Упрочнение поверхностных слоев деталей машин с использованием высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты // Ползуновский вестник. – 2005. – № 2. – С. 104–113.

26. *Иванцивский В.В., Скиба В.Ю., Степанова Н.П.* Назначение режимов поверхностной закалки с использованием концентрированных источников нагрева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2005. – № 3 (28). – С. 22–24.

27. *Иванцивский В.В., Скиба В.Ю., Степанова Н.П.* Методика назначения рациональных режимов поверхностной закалки сталей с использованием концентрированных источников нагрева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 4 (33). – С. 17–19.

28. *Иванцивский В.В., Скиба В.Ю.* Повышение поверхностной микротвердости стали при интеграции поверхностно-термической и финишной механической обработок // Научный вестник НГТУ – 2006. – № 3 (24). – С. 187–192.

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

30. *Иванцивский В.В., Скиба В.Ю.* Эффективность объединения операций поверхностной закалки и шлифования на одном технологическом оборудовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 4 (49). – С. 15–21.

31. *Усов С.В., Карнеев С.В., Панасюк М.Ю.* Сочетание финишных технологических методов, обеспечивающих необходимые параметры качества поверхностного слоя и надежность деталей машин // Вестник машиностроения. – 1991. – № 10. – С. 50–53.

32. Таблицы физических величин: справочник / под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

33. Теоретический анализ фазовых и структурных превращений в сталях при лазерном термоупрочнении / Б.И. Бертяев, И.Н. Завестовская, В.И. Игошин [и др.] – М.: ФИАН, 1985. – 12 с. – (Препринт № 90 ФИАН).

IMPLEMENTATION OF HIGH-ENERGY HEATING BY HIGH-FREQUENCY CURRENTS IN HYBRID PROCESSING CONDITIONS

Skeeba V.Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skiba@corp.nstu.ru
Ivancivsky V.V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ivancivskij@corp.nstu.ru
Zverev E.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: egor_z@ngs.ru
Titova K.A., Ph.D. student, Assistant, e-mail: krispars@yandex.ru

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

Abstract

The paper provides a rationale for the advantages of combining mechanical and surface heat treatment, which makes it possible to eliminate most of the disadvantages inherent in single technologies, as well as to achieve the required results with greater efficiency than with separate processing. It is proposed to carry out high-energy heating with high-frequency currents, while using the integral temperature-time characteristic as the main parameter when assigning surface hardening modes. Dependences of this characteristic with other processing parameters are revealed. It is empirically proven that when using a volumetric heat treatment scheme with a hardened layer depth of 0.5 mm, the processing performance indicators are comparable to those of energy consumption. When the hardened layer depth reaches 0.7 mm, i.e. the boundaries of the hot depth of penetration of current into the metal, energy costs are reduced when certain productivity is achieved.

Keywords

High-energy heating by high-frequency currents, hybrid equipment, surface hardening, machining

Funding

The research was funded by RFBR and Novosibirsk region, project number 20-48-540016.

УДК 621.9.048.4

ОПЫТ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА АО «ЧЕБОКСАРСКИЙ ЭЛЕКТРОАППАРАТНЫЙ ЗАВОД»

П.В. ТАТАНОВ, аспирант
А.Р. ЯНЮШКИН, студент
Д.А. ШНАЙДЕР, инженер-технолог
А.С. ЯНЮШКИН, доктор техн. наук, профессор
(ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары)

Татанов П.В. – 428015, г. Чебоксары, пр-т Московский, 15,
Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова,
e-mail: tatanov@list.ru

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) на сегодняшний день является наиболее интенсивно развивающейся отраслью в области металлообработки. Наиболее ярко это прослеживается в инструментальной сфере. Принцип ЭЭО применяется на станках различной конфигурации. Нагрузка на оборудование эрозионной группы возрастает. Причем электроды для прошивных станков и инструменты второго порядка часто изготавливаются на проволочных станках ЭЭО. Перед производством встает проблема расшивки узких мест. С развитием компьютерных технологий и методов ЧПУ обработки появляются новые возможности обработки деталей эрозионным способом. Электроэрозионное фрезерование по индивидуальной траектории позволяет изготавливать детали из труднообрабатываемых материалов без использования традиционных электродов, изготовленных по методу копирования поверхности. Результатом становится высвобождение оборудования и инженерных ресурсов, тем самым увеличивая эффективность производства. В данной статье описывается опыт внедрение технологии электроэрозионного фрезерования на АО “Чебоксарский электроаппаратный завод” (АО ЧЭАЗ)

Ключевые слова: Мультиосевая обработка, электроэрозия, проволочная вырезка, электроды, орбитальное движение электрода, электроэрозионное фрезерование, контуринг, управляющая программа.

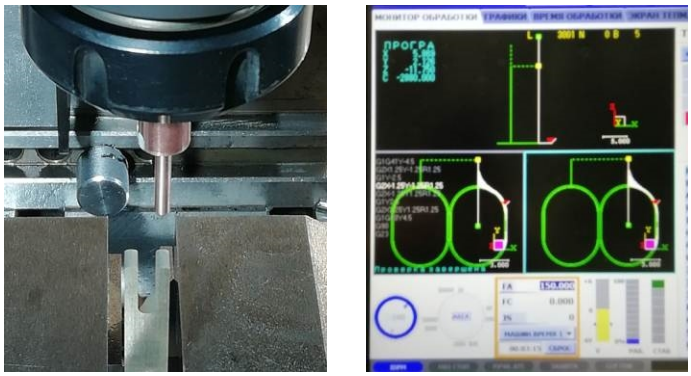
Введение

Открытие и развитие способа электроэрозионной обработки произошло благодаря исследованию проблемы разрушения электрических контактов в области электротехники. Анализируя эрозию контактов в различных средах, было выявлено, что в трансформаторном масле эрозия протекает намного быстрее, чем на воздухе. Дальнейшие исследования советских ученых легли в основу современных электроэрозионных станков и получило интенсивное развитие [1]. В последующие годы ЭЭО претерпела большие изменения и ушла в своем развитии далеко вперед, перейдя от изначально полумеханической обработки в область ЧПУ технологий. При достижении пределов скоростей обработки за счет режимов, электроэрозия стала находить новые способы обработки за счет кинематики движения. Это дало предпосылки для возникновения ***мультиосевых*** способов обработки [2-5]. Применяя движение стола (перемещая деталь по оси X и Y) и движение инструмента (ось Z и C) мы тем самым имеем возможность обрабатывать деталь в пространстве. Таким образом, возникает способ ЭЭО как элетроэрозионное фрезерование. В иностранных источниках довольно подробно описаны методы микро эрозионного фрезерования, как альтернатива обработки на

фрезерных обрабатывающих центрах [7-11]. В российских литературных источниках упоминаний на тему ЭЭО фрезерования нет. Однако, по нашему мнению, данный процесс требует более внимательного изучения.

Электроэрозионное фрезерование (Контуринг)

Электроэрозионное фрезерование (Контуринг) – является методом обработки, по своей сути, аналогичным процессу фрезерования при помощи концевых фрез. Вращающийся цилиндрический электрод формирует обрабатываемую поверхность (рис. 1) путем обхода по программируемой траектории таблица 1. Материал электрода может быть любой (медь, графит или Cu-W сплав). Хотя предпочтение можно предоставить более износостойким в эрозии материалам. При этом на черновых операциях желательно применять электроды из меди, а на чистовых процессах, дорогой Cu-W сплав.



а) б)

Рис. 1. Электроэрозионное фрезерование:
а) система электрод-заготовка; б) траектория движения электрода в работе.

Таблица 1

Образец программы *L5000* с подпрограммой *L5001*

Основная программа	Подпрограмма
L5000/L5000_Mainprogram	%
G54.1P10(W10) G17(X-Y-Level)	L5001/L5001_Subprogram
T13(No_of_electrode)	N0001G90(Absolut)
M55P20(Tankposition_P20)	N0002F15.(VorschubF15.)
G90(Absolut) G0Z5.(Startpoint_in_Z)	G91
G0X3Y7.(Startpoint_in_X_Y)	G1G41Y-4.5
M76M45(Electrode_compensation_off)	G2X1.5Y-1.5R1.5
H1=2.228(Offsets)	G1Y-2.
G10(Fixed_mode)	G2X-3.R1.5
M80M88M84(Dielectric_on/Tank_filling/Machining_on)	G1Y2.
M03(C-Rotation_o n)	G2X1.5Y1.5R1.5
E909901(E-Pack_call)	G1G40Y4.5
H1(Call_1st_offset_inX-Y)	G90
G90G01Z-9.708(Move_1st_offset_inZ)	G23
G22L5001(Call_subprogram_L5001)	%
M45(Electrode_compensation_on)	
M55P0	
M02	

Как видно из таблицы 1 код программы состоит из стандартных G-кодов, и не требует от программиста дополнительных навыков.

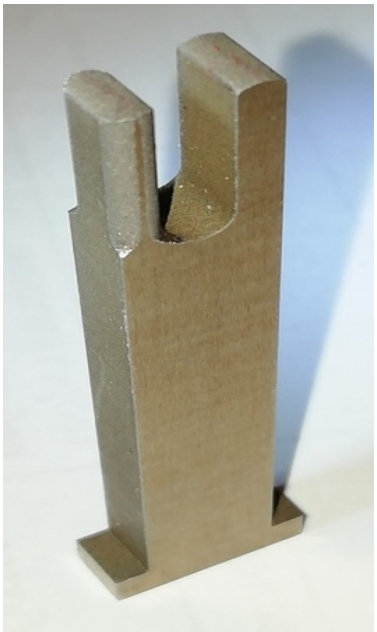


Рис. 2. Деталь после обработки

В данном случае программа обработки представляет собой совокупность 2-х программ – основной программы и подпрограммы. В программе отражены места подвода и отвода электрода, технологические режимы обработки, а также команды по вызову чернового и чистового инструмента. В подпрограмме закладывается контур движения электрода во время обработки. Программа на обработку легко пишется вручную. Но также можно использовать и CAM системы для ЧПУ фрезерных станков. При этом обработку уже можно осуществлять по 3D контуру. Конструкция фрезы может быть в виде трубы. Тогда прокачивая рабочую жидкость через электрод можно фрезеровать глубокие глухие пазы

Результат обработки детали, показан на рис. 2. Левая половина вилки – обработанная, правая - необработанная. Операция осуществлялась на станке *Mitsubishi EA*-28 (АО ЧЭАЗ г. Чебоксары). Чистота поверхности и точность получаемых размеров достигаются режимами обработки и регулированием электрического зазора по программе. В таблице 2 производится сравнение классического электроэрозионного метода с методом электроэрозионного фрезерования (контуринг).

Таблица 2

Сравнение классического электроэрозионного метода с методом электроэрозионного фрезерования (контуринг)

Метод	Классический	Контуринг
Материал: 4Х5МФ1С-медь		
Время обработки	7:00:00	7:30:00
Шероховатость	Rz10μm	Rz10μm
Точность Z	0 – 0.005mm	0 – 0.003mm
Точность X-Y	+/- 0.003mm	+/- 0.002mm
Вывод	Простой и быстрый метод	Прецизионный

Достоинства метода электроэрозионного фрезерования (Контуринг)

Достоинства метода электроэрозионного фрезерования (Контуринг):

1. Высокая точность обработки. Достигается гибкой схемой регулирования электрических зазоров и точностью позиционирования электрода;
2. Простота электрода – цилиндр или цилиндр со сферой;
3. Низкая парусность электрода исключает паразитные вибрации;
4. Равномерный износ электрода за счет вращения;
5. Высокая степень удаления отходов из зоны обработки;
6. Низкая трудоемкость по изготовлению электрода. Поэтому общая трудоемкость $T_{электрода}+T_{прожига}$ будет намного меньше, чем при классическом методе;
7. Малое коробление электрода в результате нагрева в зоне обработки;
8. За счет отсутствия нагрузки на электрод можно фрезеровать поверхности электродом диаметром до 0,3 мм без риска поломать «фрезу»;
9. Очень высокий ресурс электрода. Так как электрод имеет цилиндрическую форму, то электрод можно «обнизить» в диаметре большое количество раз. В связи с этим может, случится так, что себестоимость использования дорогого Cu-W сплава будет меньше, чем классического электрода из меди. Поэтому данный способ имеет перспективу и целесообразен при изготовлении рабочих частей штампов.
10. Высвобождение оборудования и инженерных ресурсов, тем самым увеличивая эффективность производства.
11. Уменьшение материалоемкости электрода

Способ так же применим при изготовлении резьбонакатных плоских плашек из закаленных инструментальных сталей рис. 3.

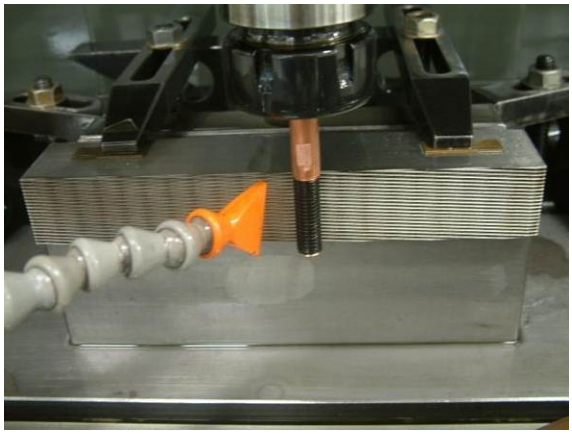


Рис. 3. Изготовление резьбонакатной плоской плашки

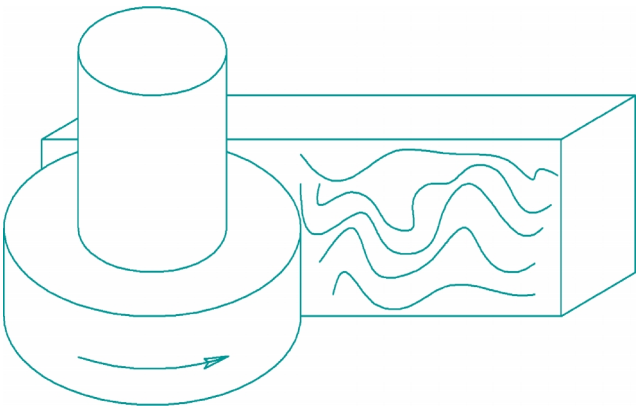


Рис. 4. Изготовление накатного ролика

Используя обратную схему рис. 4 (электрод закреплен на столе, а деталь в шпинделе) можно наносить рифление на ролике методом обкатки детали по электроду-клише с нанесенным рисунком.

Выводы

ЭЭО достигла в технологическом своем проявлении максимума по скоростям обработки. Поэтому технология ЭЭО фрезерования является качественным прорывом в

оптимизации технологических операций. Экономятся ресурсы материальные, трудовые и станочные.

За счет роста объема деталей из труднообрабатываемых материалов, изготовление специального инструмента из твердого сплава электроэрозия в настоящее время является приоритетной отраслью машиностроения [12-16]. Она легко вытесняет сложные технологии, такие как координатная и профильная шлифовка. Позволяет безболезненно убирать из технологического процесса вымирающие специальности. Активное применение мультиосевой обработки позволяет повысить производительность и улучшить качество ЭЭО. Так же появляются широкие возможности для роботизации производства.

Список литературы

1. *Левинсон Е.М. Лев В.С.* Справочное пособие по электротехнологии. Электроэрозионная обработка металлов. – Л.: Лениздат, 1972. – 328 с.

2. *Михалёв О.Н., Янюшкин А.С., Попов А.Ю.* Современный подход к автоматизации технологической подготовки производства // Автоматизация и современные технологии. – 2011. – № 4. – С. 39–43.

3. Современные системы охлаждения сопловых лопаток высоконагруженных газовых турбин / С.И. Сендюрев, А.С. Тихонов, В.Т. Хайрулин, Н.Ю. Самохвалов // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2015. – № 42. – С. 34–45.

4. *Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А* Программные продукты для автоматизации подготовки инструментального производства на предприятиях // Ползуновский альманах. – 2008. – № 4. – С. 214–216.

5. *Huang H.P., Chi G.X., Wang Z.L.* Multi-Axis EDM CNC System Based on RT-Linux // Key Engineering Materials. – 2009. – Vol. 419/420. – P. 809–812. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.419-420.809.

6. *Bleys P.* Electrical discharge milling: technology and tool wear compensation: thesis / Katholieke Universiteit Leuven. – Leuven, 2004. – 357 p.

7. *Richard J., Demellayer R.* Micro-EDM-milling Development of new machining technology for micro-machining // Procedia CIRP. – 2013. – Vol. 6. – P. 292–296. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.023.

8. *Zhang Y.P., Sun G.B., Zhang A.Z.* Study on the Surface Quality of Titanium Alloy in Ultrasonic-Assisted EDM Milling // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 184/185, iss. 2. – P. 1267–1271. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.184-185.1267.

9. *Skrabalak G., Kozak J., Zybura M.* Optimization of dry EDM milling process // Procedia CIRP. – 2013. – Vol. 6. – P. 332–337. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.027.

10. *Xu J.K., Zhang L.S., Huang F.* Research of Layered Machining Experiment by Micro-EDM // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 678. – P. 601–605. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.678.601.

11. Investigation of the Effects of Dielectric Inlet Pressure in Inner Jetted Dielectric EDM Milling / Y.Q. Wang, J.C. Bai, Y.F. Guo, H. Huang // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 189/193. – P. 125–128. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.125.

12. Новые конструктивные решения сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков, А.М. Кузнецов // Труды Братского государственного университета. Естественные и инженерные науки. – 2013. – Т. 1. – С. 153–157.

13. *Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Ковалевский С.В.* Повышение качества подготовки твердосплавного инструмента // Системы. Методы. Технологии. – 2009. – № 1 (1). – С. 95–98.

14. Исследование влияния электрических режимов на качественные и экономические показатели комбинированной электроалмазной обработки твердосплавных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, П.В. Архипов, В.Ю. Попов // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2015. – № 3 (45). – С. 22–29.

15. Качество поверхности после алмазной обработки безвольфрамовых твердых сплавов / А.С. Янюшкин, П.В. Архипов, Д.В. Лобанов и др. // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2016. – № 1 (55). – С. 20–24.

16. *Попов А.Ю., Реченко Д.С., Васильев Е.В.* Повышение эффективности использования современных инструментов со сменными твердосплавными пластинами за счет их вторичного ресурса // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16. – № 4 (49). – С. 46–51.

EXPERIENCE OF ELECTRIC EROSION MILLING AT JSC «CHEBOKSARY ELECTRICAL APPARATUS PLANT»

Tatanov P.V., Post-graduate Student, e-mail: tatanov@list.ru
Yanyushkin A. R., Student, e-mail: andreyyayushkin@mail.ru
Shneider D.A., Technologist Engineer, e-mail: dmitrij.schneider@hotmail.com
Yanyushkin A.S., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: yanyushkinas@mail.ru

I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

Abstract

Electric discharge machining (EDM) is by far the most intensively developing industry in the field of metalworking. This is most clearly seen in the instrumental sphere. The EEE principle is applied on machines of various configurations. The load on the equipment of the erosion group increases. Moreover, electrodes for piercing machines and second-order tools are often made on wire EEE machines. Production is faced with the problem of opening up bottlenecks. With the development of computer technologies and methods of CNC processing, new possibilities for the processing of parts by the erosion method appear. Custom trajectory erosion milling allows the production of parts from difficult-to-machine materials without the use of traditional surface-copying electrodes. The result is the freeing up of equipment and engineering resources, thereby increasing production efficiency. This paper describes the experience of introducing the technology of electrical discharge milling at JSC “Cheboksary Electrical Apparatus Plant” (JSC ChEAZ)

Keywords
Multiaxis machining, EDM, wire cutting, electrodes, electrode orbital motion, EDM, contouring, control program.

УДК 621.9

АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕКСТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ*

О.В. ЗАХАРОВ, доктор техн. наук, профессор
А.А. ТРОШИН, аспирант
(*СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов*)

Захаров О.В. – 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77,
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
e-mail: zov20@mail.ru

Научно обоснованное назначение параметров текстуры поверхности является одной из важных задач технологии машиностроения. В международных стандартах используется большое число параметров текстуры поверхности. Это затрудняет назначение рационального числа параметров для конкретных условий эксплуатации изделий. С целью определения минимального числа параметров исследована линейная корреляция между 8 функциональными параметрами. В качестве образцов использовалось четыре поверхности изделий из стали ШХ15 после шлифования, круглого шлифования, суперфиниширования, полирования. Установлено, что в 16 случаях из 28 имеется значимая корреляция с значением коэффициента Пирсона более 0,8. Поэтому достаточно использовать не более 5 функциональных параметров для описания текстуры поверхности изделий.

Ключевые слова: текстура поверхности, функциональные параметры, корреляция.

Введение

Текстура поверхности во многом определяет свойства поверхности: качество сопряжения, износостойкость, контактную прочность, теплопередачу, удержание смазки, адгезию, электропроводность. Поверхность изделия представляет собой сложный геометрический объект, в которым присутствуют следы механической обработки, химического и электрофизического взаимодействия инструмента и изделия.

За последние десять лет произошли существенные изменения в анализе текстуры поверхности. Во-первых, произошел переход от двумерного (профильного) анализа поверхности к трехмерному (пространственному). Во-вторых, стали использоваться новые методы анализа – фрактальный метод и сегментация. В-третьих, существенно расширились методы фильтрации при измерении. Все это стало возможным с развитием измерительных приборов и особенно компьютерных алгоритмов обработки данных [1-3]. Метрология поверхности сейчас является активно развивающимся научным направлением. Это обусловлено появлением новых материалов с особыми свойствами, например, композиционные материалы, полученными методами аддитивной технологии, с различными износостойкими покрытиями [4-9]. В известных работах уже поднимались вопросы исследования корреляции параметров структуры [10] или анализа анизотропии [11].

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Разработка цифровых устройств и программного обеспечения нового поколения с интеллектуальными элементами управления для измерения текстуры поверхности металлов и композитов в аэрокосмической отрасли»).

Установить взаимосвязь между эксплуатационными свойствами изделия и параметрами его текстуры поверхности во многих случаях является затруднительным.

Одной из серьезных проблем, по нашему мнению, является большое число параметров текстуры поверхности, которые используются в международных стандартах. Все это затрудняет назначение оптимального набора параметров для конкретных условий эксплуатации изделий. Поэтому актуальна задача минимизации числа параметров, назначаемых для описания свойств поверхности с заданным набором свойств.

Постановка задачи исследований

Основным стандартом, описывающим текстуру поверхности, является ISO 25178-2. В стандарте для текстуры поверхности используют S-фильтр, L-фильтр и индекс вложенности для общего применения методов фильтрации. Описаны основные параметры и функции текстуры поверхности, которые разделены на 5 групп: высотные, пространственные, гибридные, функциональные и другие (сегментация). Функциональные параметры представляют собой наиболее многочисленную группу, состоящую из 18 параметров и 3 функций. Несмотря на то, что параметры должны быть независимыми, многие параметры текстуры поверхности тесно связаны между собой. Оставляя его за рамками данного исследования физическое объяснение, предлагаем экспериментально определить коэффициент корреляции Пирсона для различного сочетания параметров текстуры.

В ISO 25178-2:2012 описаны 18 функциональных параметров. Для проведения анализа из них выбраны 8 следующих параметров: *Smr* – коэффициент смятия ареала поверхности ограниченного масштаба; *Spk* – сниженная высота пика; *Svq* – среднеквадратичное отклонение желоба; *Spq* – среднеквадратичное отклонение плато; *Vvv* – объем пустот желоба поверхности ограниченного масштаба; *Vvc* – объем пустот ядра поверхности ограниченного масштаба; *Vm* – объем материала; *Sxp* – максимальная высота пика.

Результаты и обсуждение

В эксперименте использованы поверхности деталей из стали ШХ15 после круглого шлифования, плоского шлифования, суперфиниширования и полирования. Перед началом эксперимента были выполнены двумерные измерения шероховатости поверхности, чтобы определить образец и длину оценки для каждой поверхности. Шероховатость поверхности по параметру Ra составила от 0.07 до 0.2 мкм. Поэтому в соответствии с базовой длиной область анализа была выбрана размера 0.25×0.25 мм. Текстура поверхности этого участка была измерена с шагом 0,001 мкм по осям с помощью зондового микроскопа. После обязательных преобразований результаты представлены в виде матрицы размером 100×100. Элементы матрицы есть отклонение текстуры от средней плоскости, полученные по методу наименьших квадратов. Значения элементов в матрице представляют собой средние значения, полученные из трех измерений поверхностей. Графические результаты представлены на рис. 1, где показаны: а – шлифование круглое, б – шлифование плоское, и – суперфиниширование, г – полирование. Арифметическое среднее абсолютного значения в области определения составило соответственно Sa = 0,26; 0,18; 0,08; 0,28 мкм. Все поверхности могут быть отнесены к анизотропным, так как значение размера структуры составило соответственно 0.08; 0.14; 0.25 и 0.31. Коэффициенты корреляция Пирсона, рассчитанные для параметров текстуры поверхности, представлены в виде матриц на рис. 2.

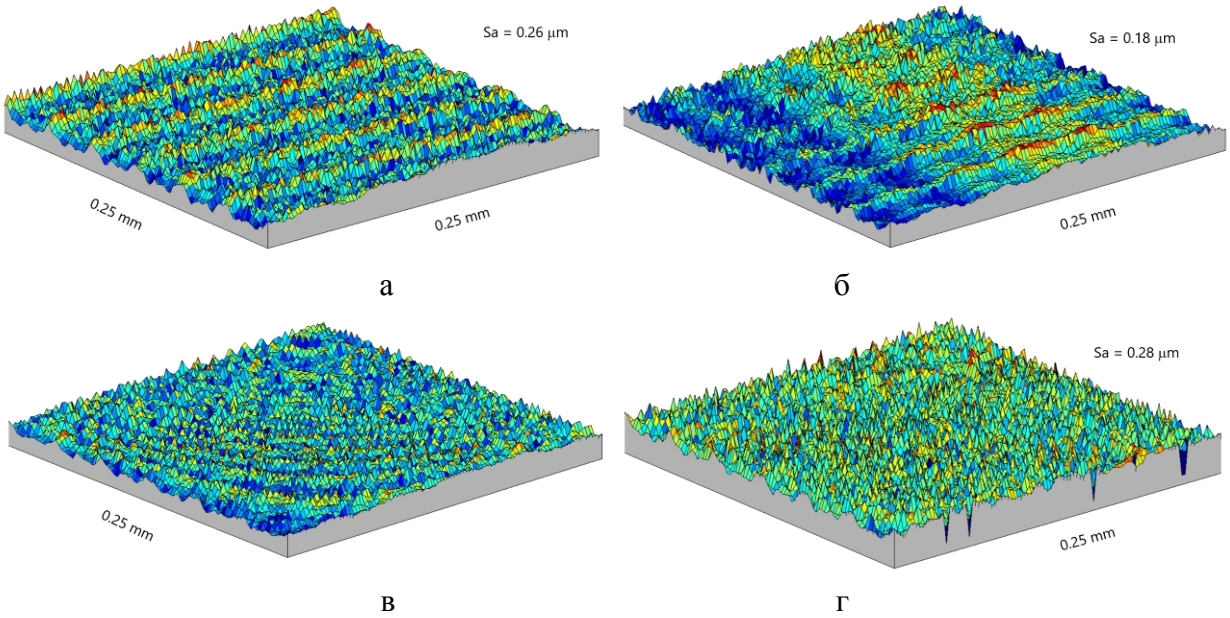


Рис. 1. Текстура поверхности

а

	Smr	Spk	Svq	Spq	Vvv	Vvc	Vm	Sxp
Smr	1	0.81	-0.65	-0.78	-0.60	-0.74	-0.92	-0.56
Spk	0.81	1	0.75	0.94	0.80	0.90	0.85	0.93
Svq	-0.65	0.75	1	0.78	0.91	0.84	0.50	0.91
Spq	-0.78	0.94	0.78	1	0.83	0.95	0.79	0.93
Vvv	-0.60	0.80	0.91	0.83	1	0.87	0.96	0.99
Vvc	-0.74	0.90	0.84	0.95	0.87	1	0.62	0.94
Vm	-0.92	0.85	0.50	0.79	0.96	0.62	1	0.51
Sxp	-0.56	0.93	0.91	0.93	0.99	0.94	0.51	1

б

	Smr	Spk	Svq	Spq	Vvv	Vvc	Vm	Sxp
Smr	1	0.84	-0.70	-0.75	-0.64	-0.70	-0.89	-0.52
Spk	0.84	1	0.67	0.91	0.88	0.92	0.81	0.94
Svq	-0.70	0.67	1	0.84	0.92	0.85	0.53	0.92
Spq	-0.75	0.91	0.84	1	0.85	0.92	0.75	0.92
Vvv	-0.64	0.88	0.92	0.85	1	0.86	0.95	0.98
Vvc	-0.70	0.92	0.85	0.92	0.86	1	0.64	0.92
Vm	-0.89	0.81	0.53	0.75	0.95	0.64	1	0.55
Sxp	-0.52	0.94	0.92	0.92	0.98	0.92	0.55	1

в

	Smr	Spk	Svq	Spq	Vvv	Vvc	Vm	Sxp
Smr	1	0.78	-0.66	-0.72	-0.64	-0.70	-0.91	-0.61
Spk	0.78	1	0.78	0.92	0.84	0.93	0.82	0.90
Svq	-0.66	0.78	1	0.79	0.95	0.80	0.55	0.92
Spq	-0.72	0.92	0.79	1	0.87	0.92	0.74	0.92
Vvv	-0.64	0.84	0.95	0.87	1	0.82	0.95	0.96
Vvc	-0.70	0.93	0.80	0.92	0.82	1	0.65	0.91
Vm	-0.91	0.82	0.55	0.74	0.95	0.65	1	0.53
Sxp	-0.61	0.90	0.92	0.92	0.96	0.91	0.53	1

г

	Smr	Spk	Svq	Spq	Vvv	Vvc	Vm	Sxp
Smr	1	0.83	-0.67	-0.82	-0.64	-0.78	-0.90	-0.59
Spk	0.83	1	0.80	0.92	0.84	0.91	0.81	0.92
Svq	-0.67	0.80	1	0.82	0.90	0.85	0.54	0.93
Spq	-0.82	0.92	0.82	1	0.79	0.93	0.74	0.92
Vvv	-0.64	0.84	0.90	0.79	1	0.83	0.92	0.98
Vvc	-0.78	0.91	0.85	0.93	0.83	1	0.64	0.92
Vm	-0.90	0.81	0.54	0.74	0.92	0.64	1	0.54
Sxp	-0.59	0.92	0.93	0.92	0.98	0.92	0.54	1

Рис. 2. Матрицы коэффициента корреляции Пирсона

Значения коэффициента Пирсона, равные или выше 0,8, указывают на значимую корреляцию. Таким образом, установлена значимая корреляция между параметрами в 16-18

случаях из общего числа 28 случаев. Для всех четырех матриц сохраняется общий характер корреляции. Это свидетельствует о наличии общих физических или геометрических свойств параметров текстуры поверхности. Поэтому можно сделать вывод, об избыточности назначения большого числа параметров текстуры поверхности.

Выводы

В ходе исследований установлена взаимная корреляция между функциональными параметрами текстуры поверхности. Для этого из 18 параметров, описанных в ISO 25178-2:2012, выли выбраны 8 параметров. В качестве образцов взяты 4 поверхности после шлифования, круглого шлифования, суперфиниширования и полирования. В итоге составлены 4 матрицы линейной корреляции между 8 параметрами. Установлена значимая корреляция между параметрами в 16 случаях из общего числа 28 случаев. Поэтому целесообразным является назначение 4-5 функциональных параметров текстуры поверхности.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Разработка цифровых устройств и программного обеспечения нового поколения с интеллектуальными элементами управления для измерения текстуры поверхности металлов и композитов в аэрокосмической отрасли»).

Список литературы

1. *Трошин А.А., Захаров О.В.* Методы фильтрации при измерении на координатно-измерительных машинах // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2020. – № 1. – С. 59–67.

2. *Печенина Е.Ю., Печенин В.А., Болотов М.А.* Модель анализа результатов сканирования геометрии сопловых аппаратов турбин / Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2020. – № 63. – С. 61–69.

3. *Трошин А.А., Захаров О.В.* Математическая модель измерения шероховатости сферическим щупом // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2020. – № 2. – С. 28–33.

4. *Фомин А.А.* Обеспечение микрогеометрии поверхностей при обработке заготовок с неоднородными свойствами // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2012. – № 12. – С. 27–29.

5. *Печенин В.А., Болотов М.А., Рузанов Н.В.* Модель координатных измерений геометрии поверхностей сложной формы // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 21, № 4. – С. 675–685.

6. Качество поверхности после алмазной обработки безвольфрамовых твердых сплавов / А.С. Янюшкин, П.В. Архипов, Д.В. Лобанов и др. // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2016. – № 1. – С. 20–24.

7. *Королев А.В., Балаев А.Ф., Яковишин А.С.* Обеспечение качества подшипников качения на основе применения технологии многоциклового нагружения // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2017. – № 7. – С. 291–293.

8. *Назаров А.П., Окунькова А.А.* Типовые образцы изделий, получаемых методом селективного лазерного спекания // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 3, № 1 (67). – С. 76–83.

9. *Проскуряков В.И., Родионов И.В.* Изменение характеристик поверхности стали 12Х18Н10Т при лазерном модифицировании в слое графитовой пасты, содержащей

наночастицы диоксида титана // Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47, № 10. – С. 50–54.

10. Surface design methodology – challenge the steel / M. Bergman, B-G. Rosén, L. Eriksson, C. Anderberg // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Vol. 483. – P. 012013. – DOI: 10.1088/1742-6596/483/1/012013.

11. Theoretical analysis of spacing parameters of anisotropic 3D surface roughness / J. Rudzitis, N. Bulaha, J. Lungevics et al. // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 2017. – Vol. 54. – P. 55–63. – DOI: 10.1515/lpts-2017-0013.

ANALYSIS OF CORRELATION OF FUNCTIONAL PARAMETERS OF SURFACE TEXTURE

Zakharov O.V., D.Sc. (Engineering), Full Professor, e-mail: zov20@mail.ru
Troshin A.A., Post-graduate Student, e-mail: andreyguardian64@gmail.com

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation

Abstract

Scientifically grounded assignment of surface texture parameters is one of the important tasks of mechanical engineering technology. International standards use a large number of surface texture parameters. This makes it difficult to assign a rational number of parameters for specific operating conditions of products. In order to determine the minimum number of parameters, the linear correlation between 8 functional parameters is investigated. Four surfaces of products made of bearing steel (1.5% Cr) after grinding, circular grinding, superfinishing, and polishing were used as samples. It is found that in 16 cases out of 28 there is a significant correlation with the Pearson coefficient of more than 0.8. Therefore, it is sufficient to use no more than 5 functional parameters to describe the surface texture of products.

Keywords
surface texture, functional parameters, correlation.

Funding
The work was done on the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on grant “Development of a New Generation Digital Devices and Software with Intelligent Controls for Measuring the Areal Surface Texture for Metal and Composite of Aerospace Products”

УДК 62-932.2

ПОТЕРЯ ТОЧНОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ И СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ

А.Ю. ПОПОВ, доктор техн. наук, профессор
Д.С. РЕЧЕНКО, доктор техн. наук, профессор
А.В. САВИН, аспирант
В.А. ПРОКОФЬЕВ, студент
(ОмГТУ, г. Омск)

Попов А.Ю. – 644050, г. Омск, пр. Мира, д. 11,
Омский государственный технический университет,
e-mail: popov_a_u@list.ru

В процессе электроэрозионной обработки цилиндрических отверстий в заготовках из твердосплавных материалов возникают отклонения от заданных размеров. Путем проведения экспериментальных исследований и теоретических расчетов было сформировано утверждение, что электрод при электроэрозионной обработке отклоняется от своей оси, в том числе, под воздействием давления со стороны жидкости, вымывающей шлаки и чем больше глубина обработки, тем больше отклонения. Использование кондуктора, в качестве направляющего устройства, способствует выравниванию требуемых параметров создаваемого отверстия. Поведение электрода внутри отверстия схоже с дроссельной заслонкой и гидростатическим подшипником, внутри электрода формируется выступ, что можно интерпретировать, как игольчатый дроссель – всё это позволяет применить формулы расчета для получения данных о давлении, силах воздействия на электрод внутри отверстия. В качестве формул использовали уравнение Бернулли, вычисления кольцевой жесткости, вычисления моментов инерции электрода, вычисления силы удержания в оси. Для экспериментов использовали высокоскоростной электроэрозионный станок для выполнения мелких отверстий Д720, сталь, латунные электроды с наружным диаметром 3,019 мм. Для анализа результатов применяли микроскоп VMM 150. Данная статья позволяет понять причины отклонений параметров и что будет способствовать их устранению.

Ключевые слова: Супердрель, электроэрозионная обработка, электрод, точность обработки отверстия, дроссельная заслонка, гидростатический подшипник, игольчатый дроссель, кондуктор.

Введение

Электроэрозионная обработка – это современный, высокопроизводительный метод изготовления отверстий во всех металлических и не металлических материалах, обладающих электропроводностью [1, 2]. Метод широко используется в современном производстве, но обладает и существенными недостатками: при изготовление глубоких отверстий (L более 10d) отверстие получается коническим и при определенной глубине процесс электроэрозии прекращается на дне отверстия и начинается на боковых сторонах электрода [3]. Цель исследования - повысить точность электроэрозионной обработки. Задачи – экспериментально получить подтверждение наличия недостатков электроэрозионной обработки, произвести расчет факторов, способных влиять на появление неточностей в процессе обработки, сформировать предложения по изменениям технологии, направленным

на избежание неточностей и экспериментально подтвердить успешность предложенных изменений.

Теория

В теоретической правильной схеме электрод в форме трубки должен работать только торцом [4], но в реальных условиях, когда начинается изгиб трубки, и начинают действовать силы, удерживающие и отжимающие электрод от оси отверстия, в работу вступает боковая сторона [5]. Стенка трубки прожигается, поток жидкости становится не контролируемым и не проходит через торец электрода, что приводит к прекращению образования отверстия [6]. Авторы поставили перед собой задачу исследовать и проанализировать, какие силы воздействуют на электрод, что приводит к его изгибу и как усовершенствовать схему обработки, с целью достижения заданной точности.

Для определения сил, удерживающих электрод в процессе обработки (рис.1) целесообразно рассматривать его в отверстии как гидростатический подшипник и определить параметры этого подшипника.

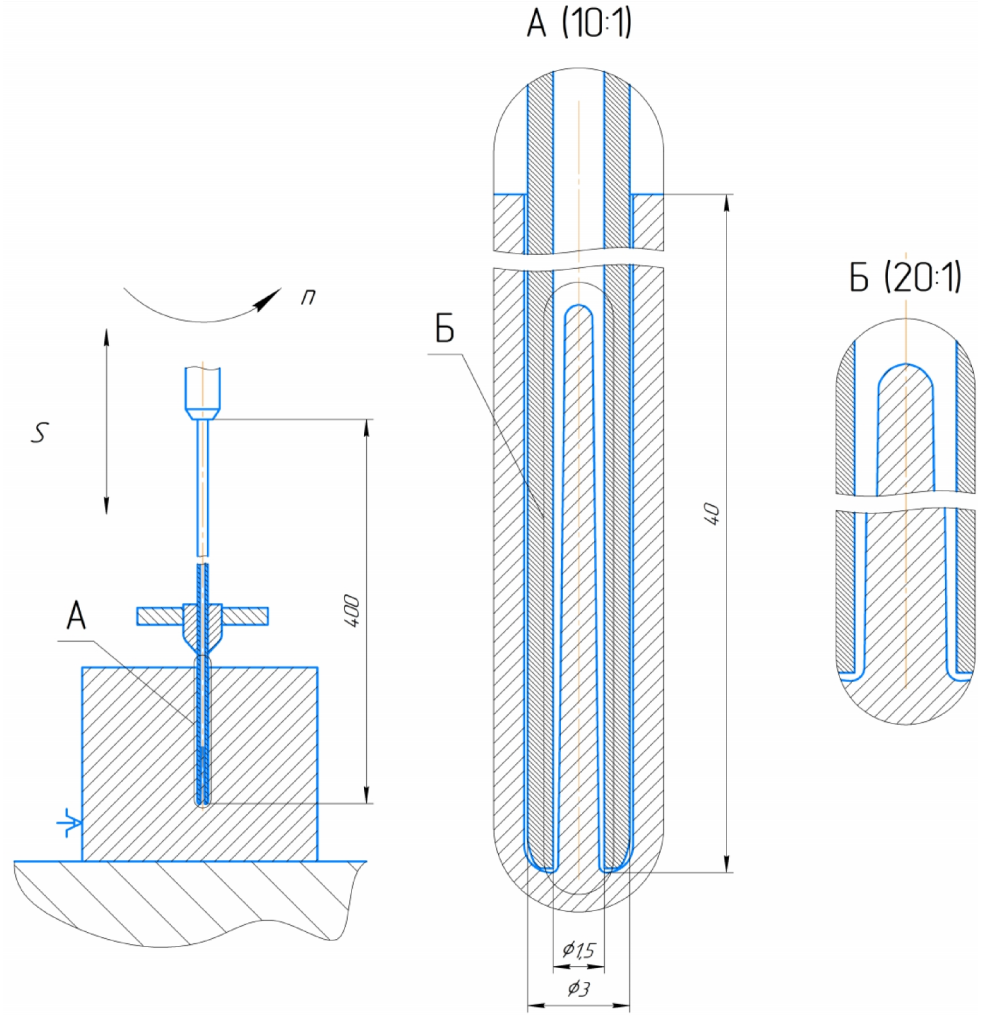


Рис. 1. Схема обработки отверстий

Электрод представляет собой латунную или медную трубку [7] наружным диаметром от 0,1 до 6,0 мм в зависимости от станка. Для расчета используется латунная трубка наружным диаметром 3,0 мм.

Известно, что давление жидкости внутри электрода $p_н$= 20 атм, а давление жидкости на выходе из отверстия p_n= 1 атм.

Расчетный диаметр электродной трубки d = 3 мм, диаметр отверстия внутри электрода $d_0 = 1{,}5$ мм расчетная глубина отверстия L = 40 мм. Разбиваем участок обработки на n=10 частей и вычисляем силу, с которой давит жидкость на наружную и внутреннюю поверхность трубки на разных участках, и строим эпюры.

Рассчитываем давление в точках, отмеченных на рис.2, используя соотношение. По формуле (1) вычисляем и заносим полученные данные в таблицу 1.

$$p_i = p_1 \frac{n-(i-1)}{n}, \tag{1}$$

где p_1 – давление на первом участке (в первой точке); i - номер участка (точки).

Таблица 1

Давление в точках $A_1 - A_{11}$ (МПа).

p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}	p_{11}
1,6	1,44	1,28	1,12	0,96	0,8	0,64	0,48	0,32	0,16	0,8

Рассчитаем давление жидкости внутри электрода. Известно, что исходное давление равняется 2 МПа, в процессе обработки встречается сопротивление внутри отверстия электрода и давление падает [8]. Эмпирическим путем определили, что давление изменяется по формуле (2) вычислим значение для каждой точки и подставим в таблицу 2.

$$p_i = p_1 \cdot k^{i-1}, \tag{2}$$

где k - коэффициент показывающий имение давления.

Таблица 2

Давление в точках $B_1 - B_{11}$ (МПа.)

p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}	p_{11}
1,6	1,64	1,68	1,73	1,77	1,81	1,85	1,89	1,93	1,97	2,0

Рассчитаем силу в точках $A_1 - A_{11}$ и $B_1 - B_{11}$, зная геометрию трубки, по формуле (3). Подставим полученные значения в таблицы 3 и 4 соответственно.

$$F_i = S_{пов} \cdot p_i = \pi \cdot d \frac{L}{n} \cdot p_i, \tag{3}$$

где $S_{пов.}$ – площадь поверхности, на которую действует давление

Таблица 3

Сила удержания в точках $A_1 - A_{11}$ (Н).

F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_9	F_9	F_{10}	F_{11}
60,3	54,3	48,2	42,2	36,2	30,1	24,1	18,1	12,1	6	3

Таблица 4

Сила удержания в точках $B_1 - B_{11}$ (Н).

F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_9	F_9	F_{10}	F_{11}
30,2	31,1	31,8	32,6	33,4	34,2	34,9	35,7	36,5	37,3	37,7

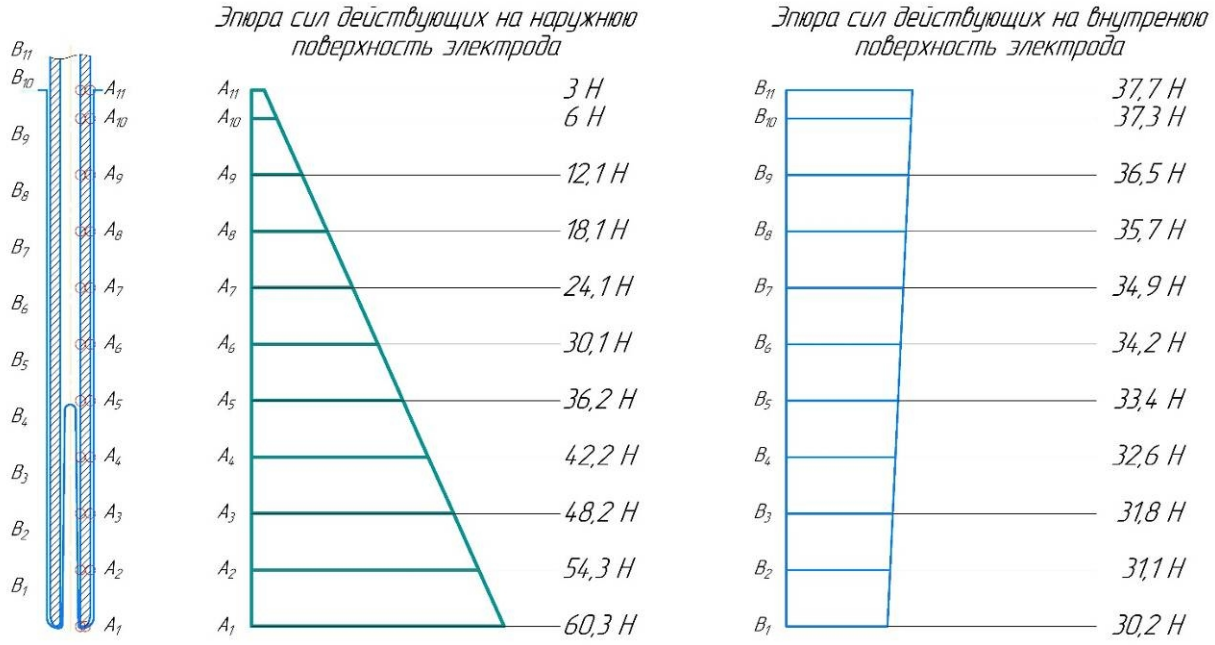


Рис.2. График сил

Одним из предложенных методов повышения точности является использование кондукторной втулки для уменьшения биения электрода. Кондукторная втулка изготовлена из диэлектрического материала, чтобы между электродом и самой втулкой не возникала электроэрозия.

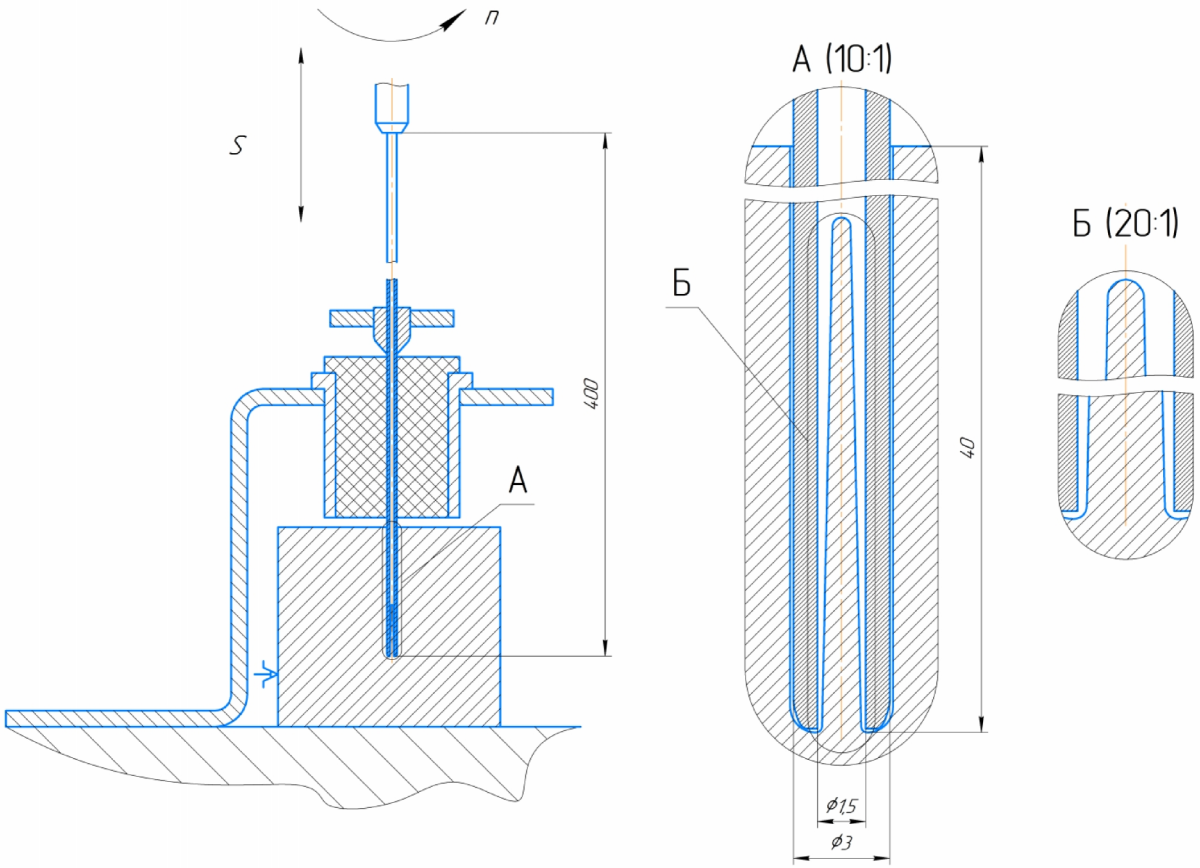


Рис.3. Схема обработки с кондуктором

Результаты и обсуждения

После проведения эксперимента с использованием одного и того же электрода получились следующие данные (замеры диаметров производились по 8 точкам на микроскопе VMM 150):

диаметр отверстия, полученный без применения кондукторной втулки 3,4659 мм,

диаметр отверстия, полученный с применением кондукторной втулки 3,2993 мм,

диаметр электрода 3,0197 мм.

Измерения отверстия с точки зрения искажения его, как цилиндрического, производились в трех точках отверстия: у входа (отступая 3-4 мм), в середине и у выхода (отступая 3-4 мм):

диаметр отверстия, полученный без применения кондукторной втулки у входа 3,5540 мм, в середине 3,8596 мм, у выхода 3,9097мм.

диаметр отверстия, полученный с применением кондукторной втулки у входа 3,3940 мм, в середине 3,5956 мм, у выхода 3,6163 мм.

Вывод

Давление жидкости на стенки электрода изнутри электрода уменьшаются пропорционально глубине отверстия. Силы, воздействующие на электрод, извне увеличиваются то же пропорционально глубине отверстия, что сказывается на искажении цилиндрической формы отверстия.

По данному расчету видно, что сила удержания в оси отверстия максимальна в нижней точке соприкосновения электрода с основанием, дном отверстия и чем дальше от входа, тем меньше сила, удерживающая его в оси у самого входа. Следовательно, участки электрода больше подвержены изгибу. При изгибе боковая поверхность электрода соприкасается с отверстием, что приводит к износу инструмента и увеличению зазора между стенкой электрода и получаемым отверстием. Вследствие чего сила удержания уменьшается и процесс становится неконтролируемым.

Использование кондукторной втулки уменьшает биение электрода, повышает точность отверстия и уменьшает отклонение диаметра от первоначального размера. Без кондуктора минимальное отклонение от диаметра электрода составило 17,7%, а максимальное 29,5%. Результат с кондуктором минимальное 12,4%, максимальное 19,7%.

Список литературы

1. ГОСТ 25331–82. Обработка электроэрозионная. Термины и определения. – Введен 1983-01-07. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 11 с.

2. *Владзиевский А.П.* Электроимпульсная обработка металлов. – М.: ЦИНТИМАШ, 1960. – 352 с.

3. *Артамонов Б.А, Смоленцева В.П.* Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Обработка материалов с применением инструмента: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1983. – Т. 1. – 247 с.

4. *Попилов Л. Я* Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.

5. *Владыкин А.В., Макаров В.Ф.* Эффективность электроэрозионного сверления отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных сплавов // Технология машиностроения. – 2011. – № 5. – С. 13–17.

6. *Макаров В.Ф., Абзаев Р.С., Владыкин А.В.* Оптимизация процесса скоростной электроэрозионной обработки отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных сплавов // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2014. – № 2 (32). – С. 16–20.

7. *Левинсон Е.М., Лев В.С.* Справочное пособие по электротехнологии. Электроэрозионная обработка металлов. – Л.: Лениздат, 1972. – 328 с.

8. *Иванайский А.В., Свириденко Д.С., Рябцева А.В.* Применение электроэрозионной обработки при производстве деталей машин // Технология машиностроения. – 2013. – № 2. – С. 18–20.

9. *Макаров В.Ф., Абзаев Р.С., Владыкин А.В.* Оптимизация процесса скоростного электроэрозионного сверления отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных сплавов // Инженерный журнал. – 2013. – № 7 (196). – С. 8–13.

10. *Egashira K., Morita Y., Hattori Y.* Electrical discharge machining of submicron holes using ultrasmall-diameter electrodes // Precision Engineering. – 2019. – Vol. 64. – P. 139–144. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2009.05.007.

11. *Rajamanickama S., Prasannab J.* Multi Objective Optimization during Small Hole Electrical Discharge Machining (EDM) of Ti-6Al-4V using TOPSIS // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 18. – P. 3109–3115. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.184.

12. *Jiang Y., Zhao W.S., Xi X.C.* A study on pulse control for small-hole electrical discharge machining // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol. 212. – P. 3109–3115. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.01.022.

13. A review on magnetic field assisted electrical discharge machining / Z. Zhang, Y. Zhang, W. Ming et al. // Journal of Materials Processing Technology. – 2021. – Vol. 64. – P. 694–722.

14. Investigation of Advanced Control Schemes for High-speed Small-Hole EDM Drilling / L. Ye, X. Xi, M. Bellotti et al. // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 95. – P. 539–544. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.263.

15. *Anthuvan R.N., Krishnaraj V., Parthiban M.* Magnetic field-assisted electrical discharge machining of micro-holes on Ti-6Al-4V // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 39. – P. 1688–1694. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.153.

LOSS OF ACCURACY DURING ELECTRIC DISCHARGE MACHINING AND METHODS OF ITS PREVENTION

Popov A.Yu., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: popov_a_u@list.ru
Rechenko D.S., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: rechenko-denis@mail.ru
Savin A.V., Postgraduate student, e-mail: oat@oat.ru
Prokofev V.A., Student, e-mail: vladimirprokofev1999@mail.ru

Omsk State Technical University, 11 Mira ave., Omsk, 644050, Russian Federation

Abstract

In the process of electrical discharge machining of cylindrical holes in workpieces made of carbide materials, deviations from the specified dimensions occur. Through experimental research and theoretical calculations, it was argued that the electrode during electrical discharge machining deviates from its axis, including under the influence of pressure from the liquid washing out slags, and the greater the depth of processing, the greater the deviation. The use of a jig, as a guiding device, helps to align the required parameters of the hole being created. The behavior of the electrode inside the hole is similar to a throttle valve and a hydrostatic bearing, a protrusion forms inside the electrode, which can be interpreted as a needle throttle – all this allows to apply calculation formulas to obtain data on the pressure and forces on the electrode inside the hole.

The Bernoulli equation, the calculation of the ring stiffness, the calculation of the moments of inertia of the electrode, and the calculation of the holding force in the axis were used as formulas. For the experiments, a high-speed electrical discharge machine for making small holes D720, steel, brass electrodes with an outer diameter of 3.019 mm were used. To analyze the results, a VMM 150 microscope was used. This paper allows understanding the reasons for the deviations of the parameters and what will contribute to its elimination.

Keywords

Super drill, EDM, electrode, bore precision, butterfly valve, hydrostatic bearing, needle choke, jig.

УДК 621.91.01

К ВОПРОСУ НЕОБХОДИМОСТИ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЕТАЛЕЙ ТИПА КАРКАС И ОБШИВКА

П.Н. КОСТИН, м.н.с., аспирант
А.А. ПАШКОВ, канд. техн. наук, доцент
(*ИРНИТУ, г. Иркутск*)

Костин П.Н. – 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
e-mail: kostin95pavel@mail.ru

В статье обосновывается необходимость создания цифровых двойников деталей типа каркас и обшивка сложной геометрической формы. Рассматривается подход по прогнозированию напряженно-деформированного состояния детали на всех этапах обработки методом конечно-элементного моделирования. В данном подходе предполагается учитывать технологическую наследственность заготовки после каждого технологического перехода, т.е., выходные параметры одного процесса будут являться начальными условиями для построения модели следующего этапа обработки заготовки. Внедрение и использование данного подхода позволит создать компьютеризированную технологию, прогнозирующую деформации деталей на всех этапах обработки и обеспечивающую необходимую точность деталей при максимальной производительности, не прибегая при этом к проведению натурных экспериментов. Также данный подход может исключить проблему коробления за счёт преднамеренного изменения формы деталей на этапах формоизменения или за счёт изменения режимов фрезерования.

Ключевые слова: Коробление, механическая обработка, каркас, обшивка, формообразование, правка, поверхностное упрочнение.

Введение

При изготовлении летательных аппаратов широкое применение имеют детали с малой жесткостью, сочетающие в себе обшивку, подкрепленную ребрами жесткости. Применение данного типа деталей приводит к повышению летных характеристик, снижает трудоёмкость обработки, сокращает количество конструктивных разъемов, уменьшает количество основных и крепежных элементов, что в конечном итоге значительно снижает себестоимость производства. К данным деталям, как правило, предъявляются высокие требования к точности их формы, которые могут достигать 0,1 мм, что сложно осуществимо, учитывая, что все они имеют большие габариты (до 30000 мм). Сложность получения такой точности объясняется наличием в технологическом процессе изготовления детали операций, вызывающих возникновение остаточных напряжений, изменяющихся и накапливающихся на каждом этапе производства и приводящих к локальным и общим деформациям.

На пути совершенствования технологии механообработки учитывается ряд факторов способных повлиять на качественные и эксплуатационные характеристики изделия, но при производстве изделий каркаса и обшивки самолета одной из главных проблем является коробление изделий, причиной чему является технологический процесс, не в полной мере учитывающий остаточные напряжения заготовки.

Кроме проблемы коробления остаточные напряжения могут играть разрушающую роль в изделиях, так, например, они повышают химическую активность материала, что приводит к ускоренному проявлению коррозии, повышают риск хрупкого разрушения, снижают предел упругости и усталости материала.

Напряжения особенно разрушительны для изделия, если они растягивающие и сконцентрированы на поверхностных слоях изделия [1], это объяснимо тем, что усталостные трещины, в основном, зарождаются на поверхности изделия. Негативное влияние растягивающих остаточных напряжений часто усиливается фактором работы изделия при знакопеременной нагрузке.

Основная часть

Изучению вопроса возникновения, распределения, а также определению величин остаточных напряжений, посвящены работы [2, 3], по результатам которых видно, что возникновение остаточных напряжений при механической, термической и химической обработках неизбежно. А в работах [4 - 5] было установлено, что определенное распределение остаточных напряжений в изделиях может приводить к благоприятным факторам, например к увеличению усталостной и вибрационной прочности.

Следовательно, при создании технологического процесса изготовления детали, следует стремиться не к борьбе с остаточными напряжениями, а к их оптимальному распределению, повышающему или как минимум не ухудшающему эксплуатационные свойства изделия.

В связи с вышесказанным, поставлена цель по контролю, прогнозированию и созданию условий для оптимального распределения остаточных напряжений и деформаций в деталях каркаса и обшивок сложной геометрии. Для достижения данной цели предлагается создание технологических цифровых двойников, построенных при помощи современных CAD/CAE-систем, прогнозирующих изменение напряженно-деформированного состояния и формоизменения детали на всех стадиях производства от заготовки до готового изделия, учитывая технологическую наследственность [6], т.е., предполагается создание цифрового двойника процесса изготовления деталей каркаса и обшивки сложной геометрической формы.

Детали класса каркас и обшивка, как правило, имеют большие габариты, сложную пространственную геометрию и низкую жесткость, что усложняет технологию изготовления изделия.

Над термически упрочненными заготовками на станках с ЧПУ выполняются фрезерные операции, после которых выполняется непосредственно формообразование, чаще всего осуществляемое гибкой-прокаткой [7], дробеударной обработкой [8], раскаткой роликами методами посадки и разводки [9]. С целью увеличения усталостной и коррозионной сопротивляемости, для особо ответственных деталей, выполняется поверхностное деформационное упрочнение [10].

Заготовки для деталей каркаса и обшивки поступают термически упрочненными, а как известно термообработка устраняет влияние остаточных напряжений от предыдущих операций (металлургических) [11]. Формирование деформаций и термических напряжений можно описать следующими выражениями [12]:

$$\sigma = -E \cdot \varepsilon_T$$

где σ - температурные напряжения (Па), E - модуль упругости (Па), $\varepsilon_T(t)$ - температурные деформации, определяемые выражением:

$$\varepsilon_T(t) = \alpha(T(t)) \cdot (T(t) - T_{ref}) - \alpha(T) \cdot (T_0 - T_{ref})$$

где $T(t)$ - температура тела (°C), T_{ref} - эталонная (референтная) температура (°C), T_0 - начальная температура (°C), $\alpha(T)$ - коэффициент линейного температурного расширения (1/°C).

Одним из распространённых способов получения остаточных (термических) напряжений является конечно-элементное (КЭ) моделирование процесса термической обработки [13].

КЭ расчёт над заготовкой предполагается на основе её твердотельной CAD-модели. При этом необходимо учитывать, что реальные её размеры могут отличаться от номинальных, поэтому необходимо проведение измерений геометрии и на их основе выполнять корректировку исходной CAD-модели. Наиболее эффективным методом измерения для данной задачи является лазерное сканирование.

Также необходимо выполнить уточнение физико-механических свойств материала заготовки, поскольку, как известно заготовки из разных партий могут обладать различными показателями данных параметров.

На рисунке 1 приведена схема процесса моделирования термических напряжений в заготовке.

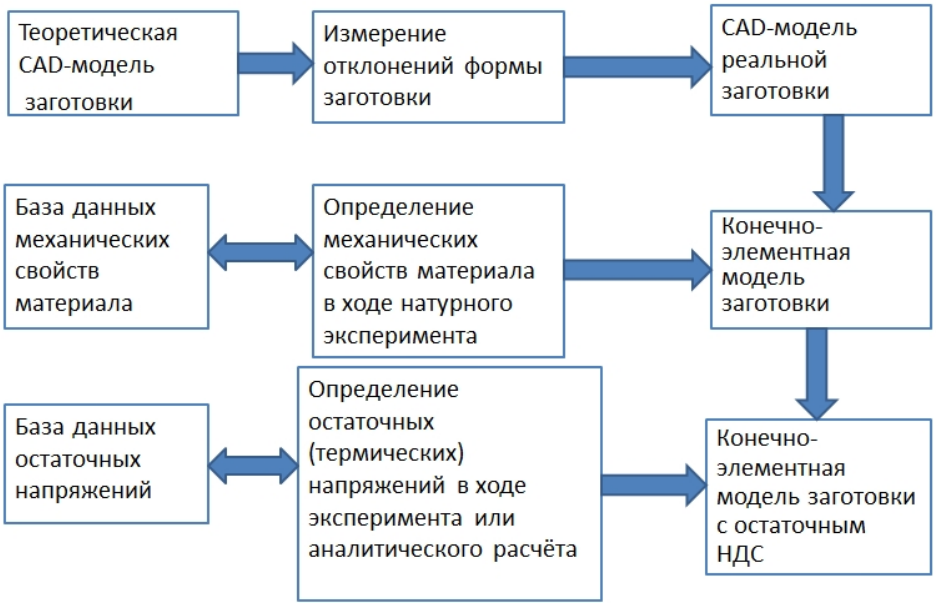


Рис. 1. Схема процесса моделирования термических напряжений в заготовке

Результаты моделирования представляют собой деформации, остаточные напряжения и их распределение в заготовке. Данные результаты будут являться начальными установочными параметрами перед моделированием процесса фрезерования.

Цель моделирования процесса фрезерования – прогнозирование формоизменения полученной заготовки и перераспределения остаточных напряжений. Данные явления возникают при снятии припуска, сопровождающегося формированием и разрушением поверхностных слоёв материала, что приводит к выходу из равновесного состояния термических напряжений и появлением изгибающих моментов между заготовкой и инструментом.

Известен ряд работ посвященных моделированию процесса фрезерования [14]. При моделировании процесса фрезерования кроме учета сил резания и определенных ранее термических напряжений, авторами предлагается также учитывать изгибы инструмента, возникающие из-за высоких динамических сил резания в процессе механической обработки, как это было сделано в работе [15].

Сведения о кривизне, величине и распределении остаточных напряжений в заготовке после операции фрезерования являются исходными параметрами для последующего моделирования процесса формообразования и правки деталей.

Большинство опубликованных работ по моделированию процессов формообразования и правки не учитывают технологическую предысторию заготовки [16-19]. Авторы же считают необходимым учитывать технологическую наследственность с целью повышения адекватности модели.

Процесс дробеударного упрочнения, представляет собой сложную задачу для моделирования, поэтому авторами в работе [19], предлагается использование косвенных методов моделирования процесса дробеударного упрочнения с вычислением внутренних силовых факторов, соответствующих режимам обработки и взаимному расположению обрабатываемых поверхностей.

Выводы

Таким образом, внедрение технологий цифрового производства деталей даёт возможность прогнозировать напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе изготовления на всех его этапах, отказавшись при этом от проведения опытных работ, что в свою очередь способствует исключению коробления деталей за счёт возможности превентивного изменения формы деталей или корректировки технологического процесса с учётом данных о напряженно-деформированном состоянии заготовки.

Список литературы

1. *Новиков Н.Н.* Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1978. – 392 с.

2. Анализ способов определения и устранения остаточных напряжений в трубных заготовках / С.П. Буркин и др. // Достижения в теории и практике трубного производства: сборник трудов конференции, Екатеринбург, 10–12 марта 2004 г. – Екатеринбург: Изд-во УГТУУПИ, 2004. – С. 87–97.

3. *Соколов И.А., Уральский В.И.* Остаточные напряжения и качество металлопродукции. – М.: Металлургия, 1981. – 96 с.

4. *Абрамов В.В.* Остаточные напряжения и деформации в металлах. – М.: Машиностроение, 1963. – 355 с.

5. *Кудрявцев И.В.* Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность стали. – М.: ВИНИТИ, 1957. – 17 с.

6. *Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М.* Полезные и опасные остаточные напряжения // Природа. – 2002. – № 10 (1046). – С. 17–24.

7. *Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д.* Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1989. – 254 с.

8. *Макаров В.И.* Формообразование обводообразующих элементов летательных аппаратов методом дробеударной обработки и компенсирующей гибки-прокатки: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.07.04. – М.: Изд-во МАИ, 1990. – 21 с.

9. *Фёдоров А.В., Лебский С.Л., Мельников М.Г.* К модели обработанной поверхности при дробеструйном наклепе // Научные труды Волгоградского политехнического института. – 1977. – Вып. 8. – С. 82–90.

10. *Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М.* Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. – СПб.: Наука, 2004. – 644 с.

11. *Бойцов Б.В., Кравченко Г.Н.* Определение продолжительности упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием // Вестник машиностроения. – 1981 – № 6. – С. 6–8.

12. *Александров А.А., Лившиц А.В., Рудых А.В.* Расчет термических остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 1 (49). – С. 52–56.

13. *Биргер И.А.* Остаточные напряжения. – М.: Машиностроение, 1963. – 233 с.

14. MSC Nastran: расчет и оптимизация конструкций [Электронный ресурс] // MSC Software. – URL: http://www.mscsoftware.ru/products/msc-nastran (дата обращения 29.04.2021).

15. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

16. Study on the machining distortion of aluminum alloy parts induced by forging residual stresses / L.B. Liu, J.F. Sun, W.Y. Chen, P.F. Sun // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2017. – Vol. 231, iss. 4. – P. 1–10. – DOI: 10.1177/0954405415583805.

17. *Marusich T.D.* Effects of friction and cutting speed on cutting force // Proceedings of ASME Congress, New York, 11–16 Nov. 2001. – New York, 2001. – P. 115–138.

18. Yan Y., Wang H.B., Wan M. FEM modeling for press bend forming of doubly curved integrally stiffened aircraft panel // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2012. – Vol. 22. – P. S39–S47. – DOI: 10.1016/S1003-6326(12)61681-1.

19. Finite element modeling of shot peening process: prediction of the compressive residual stresses, the plastic deformations and the surface integrity / M. Frija, T. Hassine, R. Fathallahc et al. // Materials Science and Engineering. A. – 2006. – Vol. 426, iss. 1/2. – P. 173–180. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.03.097.

TO THE QUESTION OF THE NEED TO DEVELOP DIGITAL DUPLICATES FOR FRAME AND CASING PARTS

Kostin P.N., Research assistant, Post-graduate Student, e-mail: kostin95pavel@mail.ru
Pashkov A.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: pashk0ff@mail.ru

Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

Abstract

The paper justifies the need for creation digital duplicates for frame and casing parts of a complex geometric shape. An approach to predicting the stress-strain state of a part at all stages of processing by the method of finite element modeling is considered. In this approach, it is supposed to take into account the technological heredity of the workpiece after each technological transition, i.e., the output parameters of one process will be the initial conditions for building a model of the next stage of workpiece processing. The introduction and use of this approach will make it possible to create a computerized technology that predicts deformations of parts at all stages of processing and ensures the necessary accuracy of parts at maximum productivity, without resorting to carrying out full-scale experiments. Also, this approach can eliminate the problem of warpage by deliberately changing the shape of parts at the stages of shaping or by changing the milling modes.

Keywords
Warpage, machining, frame, casing, shaping, levelling, case hardening.

УДК 621.914.1

ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНОГО ДЕМПФЕРА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ

А.М. КОЗЛОВ[1], доктор техн. наук, профессор
С.Ф. КУЗНЕЦОВ[2], канд. техн. наук, начальник отдела
А.А. КОЗЛОВ[1], канд. техн. наук, доцент
([1] ЛГТУ, г. Липецк,
[2] ПАО «НЛМК», г. Липецк)

Козлов А.М. - 398055, г. Липецк, ул. Московская, д.30, ЛГТУ,
Липецкий государственный технический университет,
e-mail: kam-48@yandex.ru

Рассматривается проблема снижения колебаний при обработке деталей на малогабаритном оборудовании, в частности, настольном фрезерном станке с числовым программным управлением. Предлагается снизить уровень колебаний за счет генерирования «противоколебаний» дополнительным оборудованием – активным демпфером. Представлены конструкция устройства и принципиальная электрическая схема управления. Экспериментально установлено, что при активном демпфировании общий уровень колебаний системы снижается. Это дает возможность интенсифицировать процесс резания без роста уровня вибрации, что позволяет повысить производительность процесса или обрабатывать материалы с более высокими механическими характеристиками.

Ключевые слова: фрезерование, малогабаритное оборудование, вибрации, демпфер, производительность

Введение

Применяемый до последнего времени принцип «универсальности» оборудования, когда на станке обрабатывается широкая гамма типоразмеров деталей, показал недостаточную экономическую эффективность и потребовал исключения обработки малогабаритных деталей на станках с излишним объемом рабочего пространства. Это в полной мере относится к процессу фрезерования, в частности, относительно небольших по размерам пресс-форм. Сложные пространственные формы таких изделий требуют для их обработки применения концевых фрез со сферической режущей частью [1 - 4].

С другой стороны, переход со станков, имеющих высокую жесткость конструкции, на малогабаритные, настольные станки, вызывает проблемы с обеспечением необходимого качества обработки при требуемой производительности. Причиной является возникновение вибраций [5 - 7] в процессе резания, которые обусловлены особенностями процесса фрезерования – периодическим врезанием зуба фрезы в обрабатываемый материал и его выходом из зоны резания [8 - 15]. Невозможность полного решения этой проблемы привело к тому, что на малогабаритных станках обрабатывают материалы невысокой твердости (алюминий), или обработку ведут на низких режимах с малой глубиной резания.

Методика экспериментального исследования

Мы предположили, что снизить уровень возникающих в технологической системе колебаний можно за счет генерирования «противоколебаний», т.е. гасящих колебания, возникающих в процессе резания. Генератором таких колебаний может быть «активный демпфер» [13].

Для проверки данного положения использовали громкоговоритель, который затем усовершенствовали и изготовили генератор колебаний, элементы корпуса которого были получены на 3*D*-принтере – рисунок 1.

Рис. 1. Варианты конструкции демпфера

Для управления колебаниями демпфера предварительно получают информацию о колебаниях технологической системы. Для этого, при помощи датчиков вибраций записывают колебания в той точке станка, где планируется установить демпфер [14, 15]. Затем полученная информация анализируется и генерируются колебания, направленные на гашение колебаний, возникающих в технологической системе.

Для исследования влияния демпфирующего устройства на процесс возникновения вибраций при обработке металла использовался настольный фрезерный станок *SBJ1400* с системой ЧПУ (рис. 2).

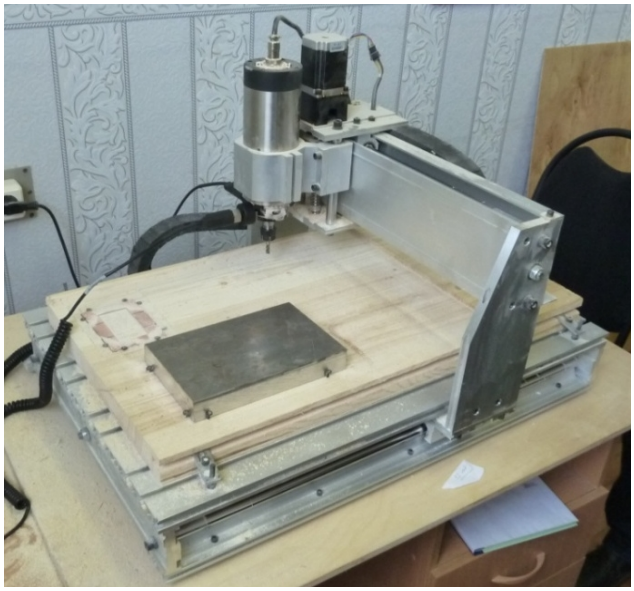
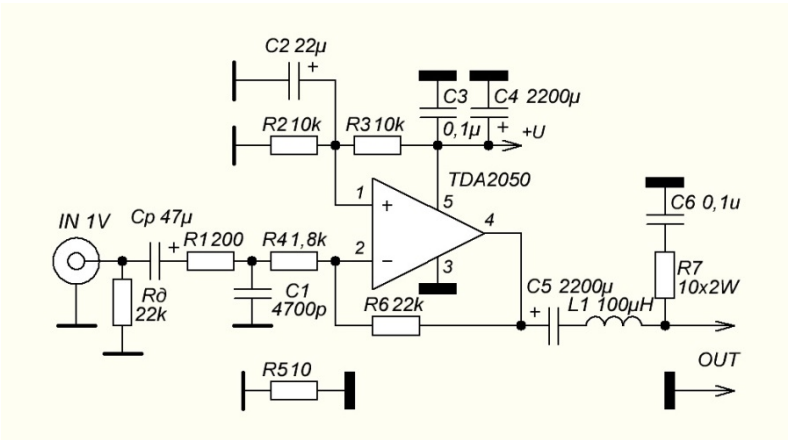


Рис. 2. Оборудование для апробации применения демпфера

В соответствии с паспортными данными, оборудование предназначено для работы с относительно небольшими нагрузками, в частности, обработки алюминия и его сплавов. Задача исследования заключалась в определении уровня колебаний системы при работе без демпфера и с ним. Обработка велась концевыми фрезами с цилиндрическим хвостовиком Ø8, z = 5. Для определения возможности повышения режимов резания, или обработки заготовок с более высокими механическими характеристиками использовались алюминиевые и стальные (09Г2С) пластины.

Управление демпфером велось при помощи ЭВМ, которая формировала программу – генератор сигнала и программы управления, отслеживающей сигнал обратной связи. Устройство было подключено к ЭВМ через плату (усилитель сигнала), с учётом обратной связи.

Принципиальная электрическая схема и внешний вид платы (усилителя) управления демпфером представлены на рисунке 3.



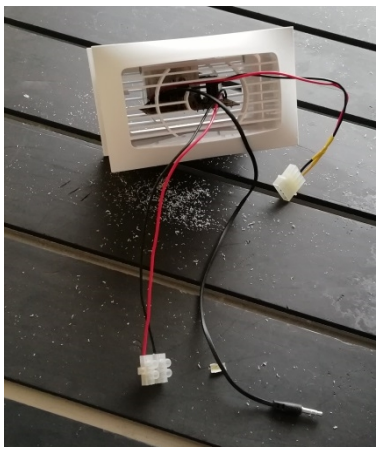


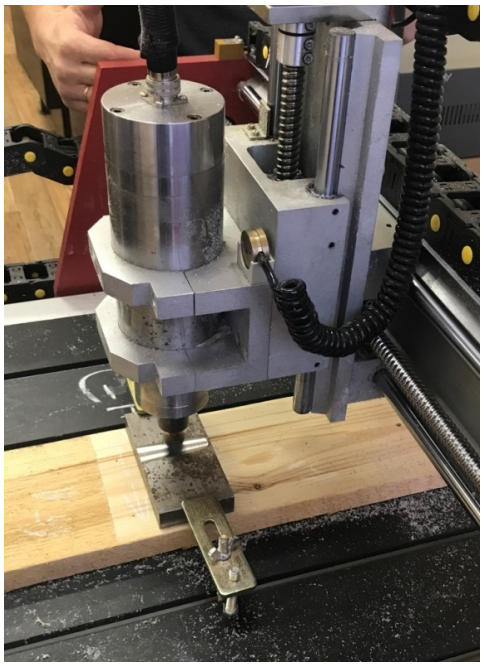
Рис. 3. Принципиальная электрическая схема и внешний вид платы (усилителя) управления демпфером

Результаты и обсуждение

На рисунке 4 представлен фрагмент обработки стальной пластины, в таблице – режимы резания, на которых проводилась обработки для установления эффективности применения демпфера. Демпфер устанавливался на корпусах подшипниковых узлов станка.

Анализ результатов измерений, представленных в таблице, показал, что при некоторых режимах, например №10 можно использовать при обработке концевыми фрезами, так как спектре колебаний (рис. 4) отсутствуют околорезонансные частоты. При этом общий уровень колебаний в целом сохраняется на том же уровне, что и при обработке без демпфера.

Инструмент при активном демпфировании равномерно нагружен, общий уровень колебаний системы снижается, в результате появляется возможность интенсифицировать процесс резания без роста уровня вибрации.



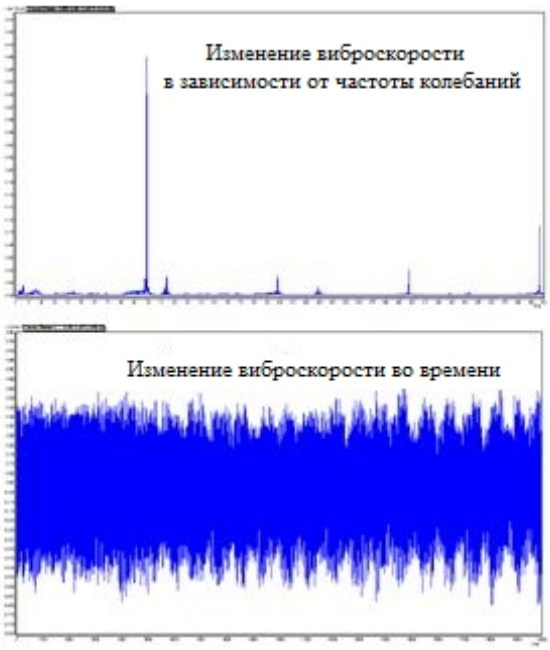


Рис. 4. Обработка стальной пластины на фрезерном оборудовании, предназначенном для алюминиевых сплавов

Таблица

Режимы резания и результаты измерения виброскорости при испытании демпфера

Номер режима	Частота вращения фрезы n, мин$^{-1}$	Подача S, мм/мин	Виброскорость пик, мм/с		Частота пика, Гц
1	6000	200	9,8	0,95	98,75
2	7800	200	5,5	1,15	134,63
3	5300	200	8,4	4,61	85,38
4	6000	360	3,01	0,38	99
5	6000	100	2,04	0,18	99,38
6	7800	360	1,45	0,08	134,25
7	5300	100	1,11	0,59	85,5
8	7800	100	1,06	0,57	134,5
9	5300	360	1,77	1,14	85,6
10	20000	2000	0,77	0,77	337

Применение демпфера позволило уменьшить пиковые значения виброскорости, что снизило динамическую нагрузку на технологическую систему и стабилизировало процесс резания. Это позволяет повысить производительность процесса и обрабатывать материалы с более высокими механическими характеристиками.

Выводы

Таким образом, предложенная конструкция демпфера позволяет при фрезеровании концевым инструментом увеличить режимы резания за счёт снижения общего уровня колебаний.

Список литературы

1. Influences of the tool path strategy on the machining force when milling free form geometries with a ball-end cutting tool / A. de Souza, E. Berkenbrock, A. Diniz, A. Rodrigues // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2015. – Vol. 37, iss. 2. – P. 675–687. – DOI: 10.1007/s40430-014-0200-9.

2. A new algorithm for the numerical simulation of machined surface topography in multiaxis ball-end milling / W. Zhang, G. Tan, M. Wan et al. // Journal of Manufacturing Science and Engineering – Transactions of the ASME. – 2008. – Vol. 130, iss. 1. – P. 011003. – DOI: 10.1115/1.2815337.

3. *Козлов А.М., Малютин Г.Е.* Повышение производительности чистового объемного фрезерования на станках с ЧПУ // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2013. – № 11 (29). – С. 14–18.

4. *Козлов А.М., Малютин Г.Е.* Параметрическое управление подачей при фрезеровании сложных поверхностей на станках с ЧПУ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 8/1. – С. 59–64.

5. Свинин В.М. Исследование регенеративных автоколебаний при многолезвийной обработке // Обработка металлов. – 2005. – № 3 (28). – С. 28–30.

6. *Svinin V.M., Savilov A.V., Zarak T.V.* Self-oscillation regeneration control by irregular tooth pitches // Advances in Engineering Research, International Conference on Aviamechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). – 2018. – Vol. 158. – P. 399–405.

7. *Kozlov A., Kiryuschenko E., Kirichek A.* Technological system self-tuning when milling // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – P. 01033. – DOI: 10.1051/matecconf/201712901033.

8. *Afazov S.M., Ratchev S.M., Segal J.* Modelling and simulation of micro-milling cutting forces // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – Vol. 210, iss. 15. – P. 2154–2162. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.07.033.

9. Research on the modeling of burr formation process in micro-ball end milling operation on Ti–6Al–4V / M.J. Chen, H.B. Ni, Z.J. Wang, Y. Jiang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 62, iss. 9/12. – P. 901–912. – DOI: 10.1007/s00170-011-3865-6.

10. *He K.J., Chen Z.M., Zhao L.H.* A new method for classification and parametric representation of freeform surface feature // International journal of advanced manufacturing technology. – 2011. – Vol. 57, iss. 1/4. – P. 271–283. – DOI: 10.1007/s00170-011-3271-0.

11. *Амбросимов С.К., Поддубных И.Ю.* Решение некоторых задач обработки резанием методами алгебры логики // Вестник ЛГТУ. – 2020. – № 2 (43). – С. 26–30.

12. *Jin X., Altintas Y.* Prediction of micro-milling forces with finite element method // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol. 212, iss. 3. – P. 542–552. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.05.020.

13. *Пономарев Б.Б., Нгуен Ш.Х.* Моделирование и анализ влияния условий обработки на силы резания при концевом фрезеровании // Современные технологии – системный анализ – моделирование. – 2018. – № 3 (59). – С. 8–16.

14. Патент на полезную модель 150688 Российская Федерация. Устройство демпфирующее / А.М. Козлов, Е.В. Кирющенко, С.Ф. Кузнецов. – № 2014136031/11; заявл. 03.09.2014; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5.

15. *Алейников Д.П., Лукьянов А.В.* Исследование динамики крепления датчиков вибрации шпинделей обрабатывающих центров // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 2 (97). – С. 28–35.

APPLICATION OF THE ACTIVE DAMPER TO REDUCE VIBRATION WHEN MILLING

Kozlov A. M.[1], D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kam-48@yandex.ru
Kuznetsov S. F.[2] Ph.D. (Engineering), Head of the Department, e-mail: sergey_kuzn@mail.ru
Kozlov A. A.[1], Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: soy4astnik@mail.ru

[1]Lipetsk State Technical University, 30 Moscow St., Lipetsk, 398055, Russian Federation
[2]Novolipetsk Metallurgical Plant, 2 Metallurg Square, Lipetsk, 398040, Russian Federation

Abstract

The problem of reducing vibration when processing parts on small-sized equipment, in particular, a desktop-sized mill with numerical control, is considered. It is proposed to reduce the level of oscillations by generating “counter-oscillations” by additional equipment – an active damper. The design of the device and the control circuit diagram are presented. It is experimentally established that with active damping, the overall level of system oscillations decreases. This makes it possible to intensify the cutting process without increasing the level of vibration, which makes it possible to increase the productivity of the process or to process materials with higher mechanical characteristics.

Keywords
milling, small-sized equipment, vibration, damper, productivity

УДК 621.9

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ НЕМЕТАЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д.В. ЛОБАНОВ, доктор техн. наук, профессор
П.Г. ДАНИЛОВ, аспирант
Н.А. ВЛАДИМИРОВА, магистрант
А.Н. ГРИГОРЬЕВ, магистрант
(*ЧГУ им. И.Н. Ульянова*)

Лобанов Д.В. – 428015, Чувашская Республика, г. Чебоксары, пр-т Московский, д. 15, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
e-mail: lobanovdv@list.ru

Композиционный материал отличается низкой плотностью, высокой удельной прочностью и жесткостью. Механическая обработка композитов значительно отличается от обработки металлов. В статье рассматриваются критерии для создания экспериментального стенда для обработки неметаллических композиционных материалов. Повышение эффективности обработки композитов режущим инструментом требует обеспечения технологических параметров станка, приспособления и инструмента, которые гарантируют его работу с максимальной работоспособностью и качеством обработанных изделий. Целью данной работы является разработка экспериментального стенда для исследования процесса обработки неметаллических композиционных материалов. Приведены прочностные и динамические расчеты элементов стенда. В результате расчётов выявлено, что спроектированный стенд позволяет исследовать процесс лезвийной обработки на различных режимах инструментом с различными геометрическими параметрами, оснащенным различными инструментальными материалами.

Ключевые слова: композиционные материалы, режущий инструмент, приспособление, резание, эффективность.

Введение

Создание новых композиционных материалов (КМ), обладающих высокими физико-механическими эксплуатационными свойствами на сегодняшний день охватывает все больше отраслей промышленности. Однако, обработка изделий из этого материала достаточно трудоемкая и не всегда эффективная [1 - 6]. В особенности это касается полимерных КМ (ПКМ), в силу того, что они упруги, анизотропны, обладают низкой теплопроводностью, теплостойкостью и т.д. Следовательно, затруднительно использование таких методов обработки, как гидроабразивная (высокая вероятность насыщения материала водой), лазерная (незначительное оплавление краев в зоне резания, выделение дыма и пыли) и ультразвуковая (низкая производительность и стойкость режущего инструмента). Рациональной, с точки зрения обеспечения качества изделий из композитов, является механическая (лезвийная) обработка. Однако и она обладает рядом сложностей по сравнению с механической обработкой металлов. Требуется использование специально

подготовленных инструментов со специфической геометрией, использование высоких скоростей резания, что в отсутствии СОЖ, еще более усугубляет процесс резания [7 - 9].

Требуется более детальное изучение процессов обработки композиционных материалов на полимерной основе. В связи с этим, целью данной работы является разработка экспериментального стенда для исследования процесса обработки неметаллических композиционных материалов. Задачами исследования являются:

1. Выявление условий и требований к экспериментальной установке
2. Расчеты и проектирование экспериментальной оснастки, инструмента, стенда
3. Обеспечение безопасных условий работы

Методика

Исходными данными являются рекомендуемые режимы и условия обработки ПКМ, сформированное ранее на основе экспериментальных исследований [2, 4 - 6].

1. Инструмент позволяет выдерживать высокие скорости резания, инструментальный материал должен обладать достаточной твердостью и прочностью, режущая кромка должна обладать достаточной остротой. Конструкция инструмента позволяет использовать вставки с различной геометрией, формой режущей кромки, использовать разную геометрию вставки. Это позволяет варьировать эти параметры в процессе исследований.

Рассмотрим обработку композитов на примере одной из часто встречающихся операций обработки изделий из композиционных материалов – фрезерования [1, 7 - 9].

Для обработки композиционных материалов применяются цельные и составные фрезы с затылованными и острозаточенным и зубьями, а также сборные конструкции фрез [10 - 13].

В нашем случае рассмотрим, в качестве инструмента, сборную фрезу, которая обладает простотой конструкции (для быстрого снятия/установки режущих элементов при фиксировании стойкостных показателей инструмента в процессе обработки) в сочетании с надежностью, подходит по основным размерам для исследовательского оборудования. Геометрия инструмента выбрана на основе ранее проведенных исследований [14 - 17]: передний угол $\gamma = 15…20°$; задний угол $\alpha = 10…15°$; угол заострения $\beta = 55…60°$.

Конструкция сборной экспериментальной фрезы представлена на рис.1.

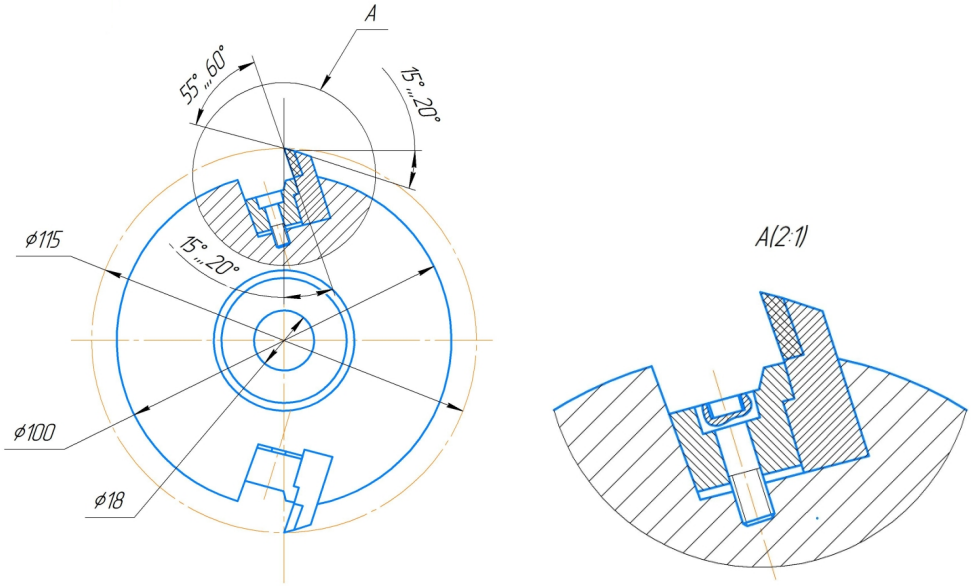


Рис.1. Фреза для обработки композиционного материала

2. Для обработки ПКМ рекомендуются следующие режимы резания [3, 4, 5, 7, 8]: подача на зуб S_z = 0,15…0,17 мм/зуб; глубина резания t = 0,5…0,6 мм.

Далее выбираем оборудование. Фрезерно-гравировальный станок *SHG* 0609/*CARVER MINI* 0609 выбран исходя из того, что фрезерование композитов происходит при больших скоростях резания [14 - 17]. Данный станок позволяет установить частоту вращения шпинделя 24000 об/мин (Гц) и скорость рабочей подачи 3500 мм/мин. Кроме того, габаритные размеры оборудования позволяют разместить его в планируемой исследовательской лаборатории машиностроительного факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Внешний вид станка и его модель представлены на рис 2. Исходные характеристики станка представлены в табл.1

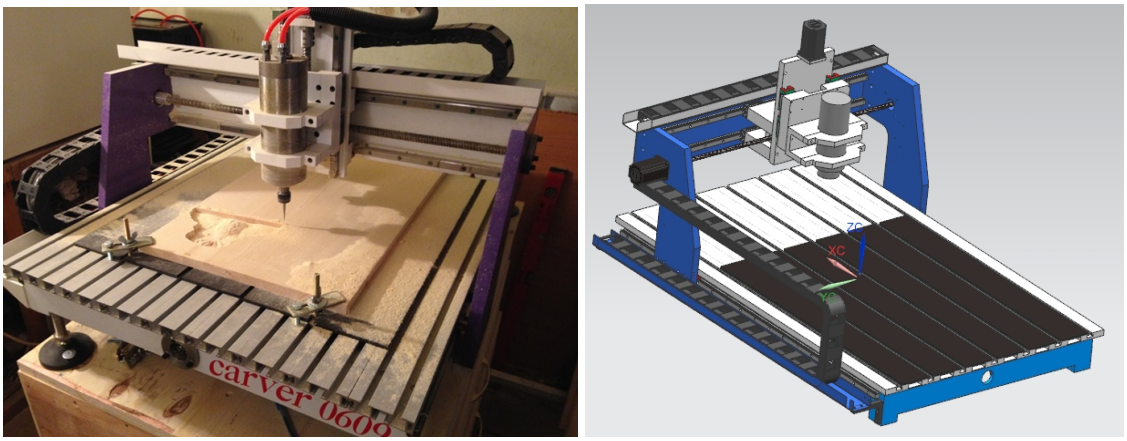


Рис. 2. Фрезерно-гравировальный станок SHG 0609/CARVER MINI 0609

Таблица 1

Характеристики станка

Рабочие размеры X,Y,Z,мм	600x900x120
Перемещение суппорта:	
X(Шарико-винтовая пара 16 мм)	600
Y(Шарико-винтовая пара16 мм)	900
Z(Шарико-винтовая пара16 мм)	120
Материал станины	Литой чугун
Мощность шпинделя(кВт)	1,5
Частота вращения шпинделя, об/мин(Гц)	24000(400)
Скорость рабочей подачи, мм/мин	3500
Скорость ускоренного перемещения, мм/мин	5000
Посадочный диаметр инструмента, мм(ER)	1-6(ER11)
Способ охлаждения шпинделя	Воздушное охлаждение
Тип привода	Микрошаговый двигатель
Погрешность повторного позиционирования	±0,02
Механическое разрешение	±0,03/300
Рабочая температура окружающей среды, С°	5-45
Система управления(Интерфейс)	NC Studio
Программное обеспечение	NC Studio
Поддерживаемые форматы	G-code
Электропитание	220±10% 50HZ
Габаритные размеры, мм	720x1000x500
Масса,кг	180

Для того, чтобы проверить, выдержит ли оборудование планируемые нагрузки, в программном комплексе Ansys проведен прочностной расчет конструкции портала станка с учетом планируемых нагрузок.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты в виде эпюр напряжений и перемещений.

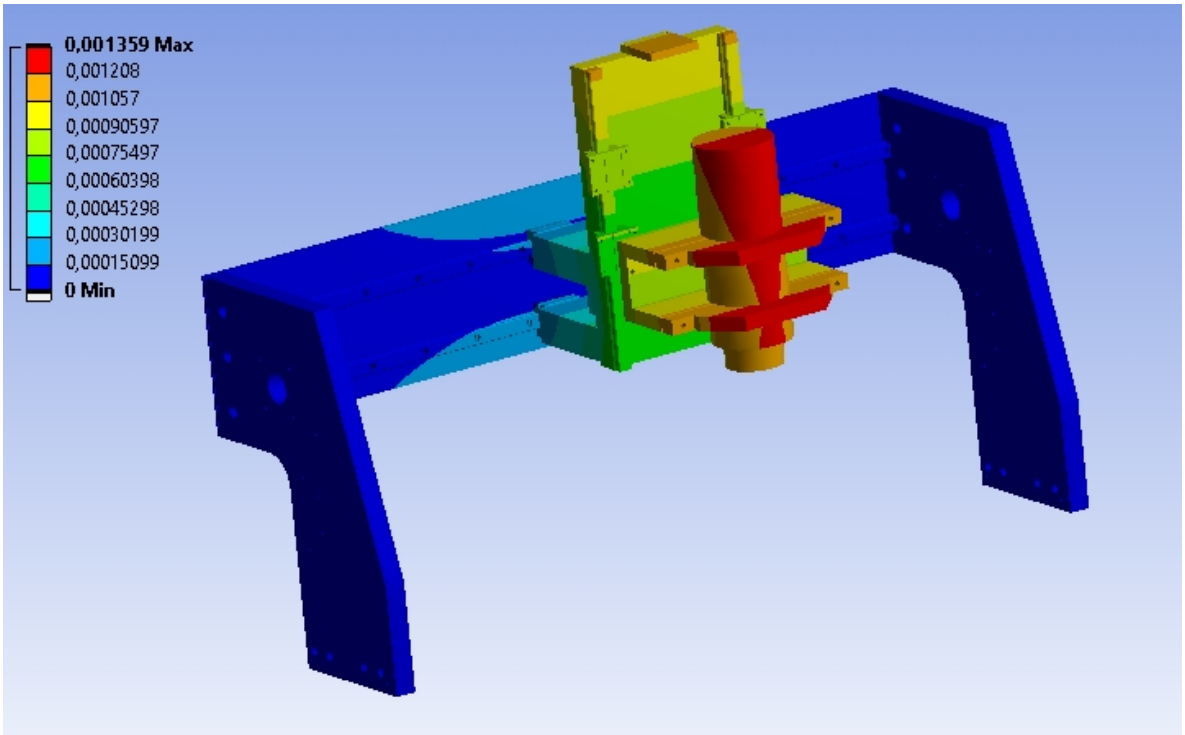


Рис. 3. Эпюры перемещения. Расчет 1: Крутящий момент 3,2 Н·*м*

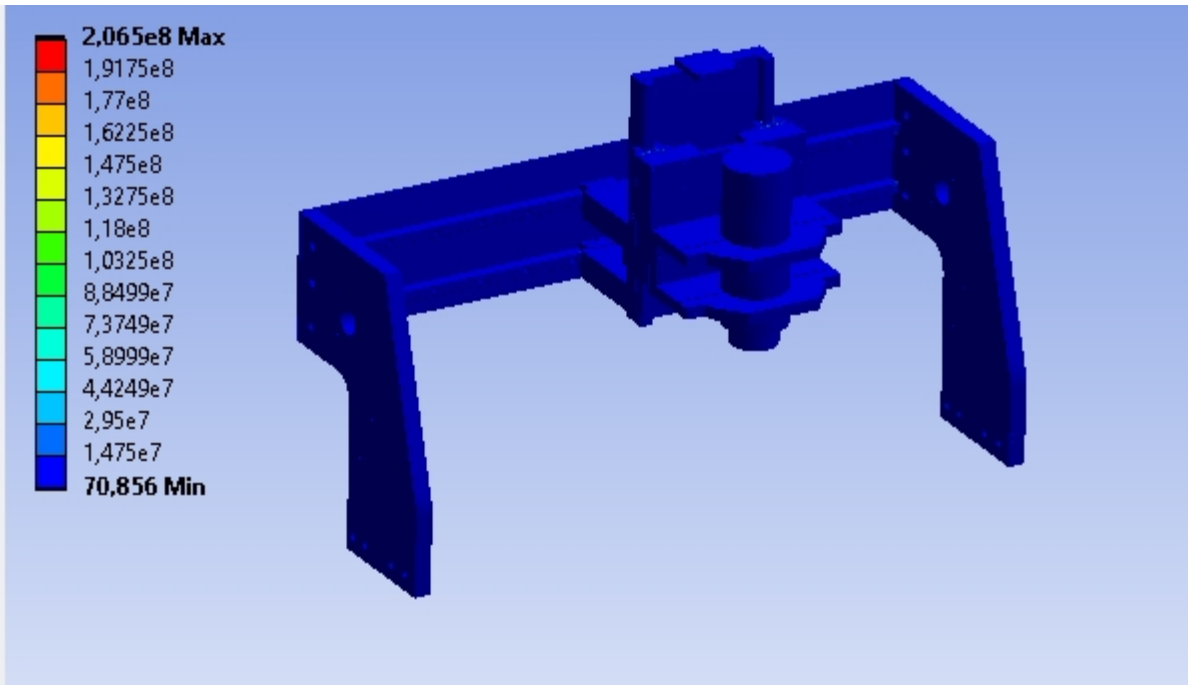


Рис. 4. Эпюры напряжения. Расчет 1: Крутящий момент 3,2 Н·м

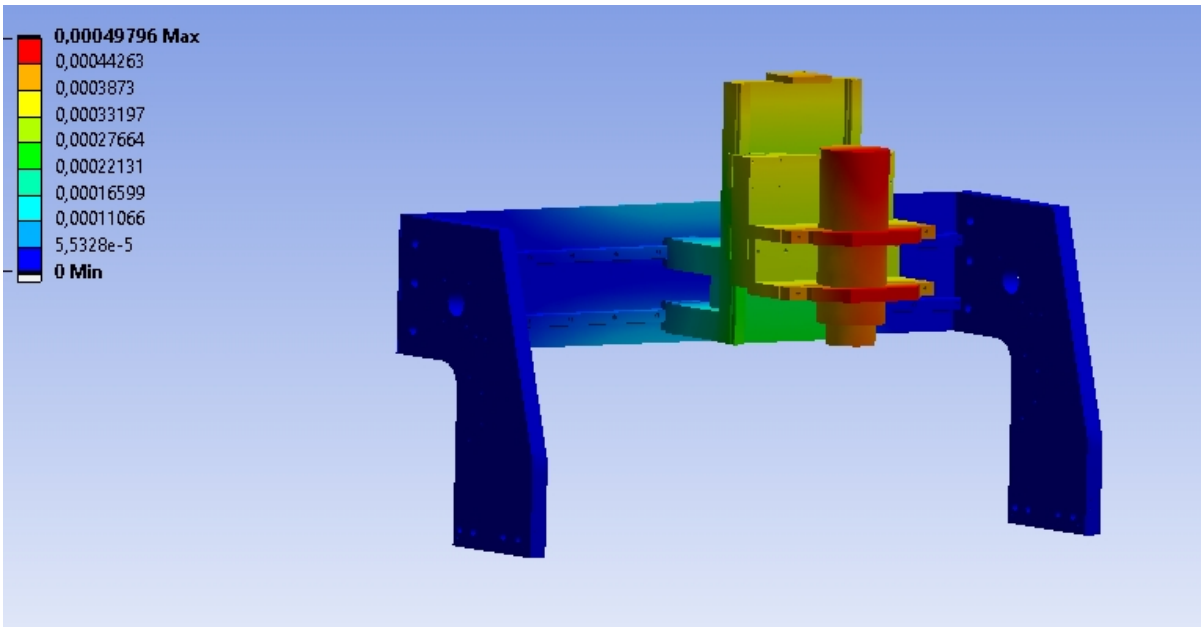


Рис. 5. Эпюры перемещения. Расчет 2: Крутящий момент 3,2 Н·м

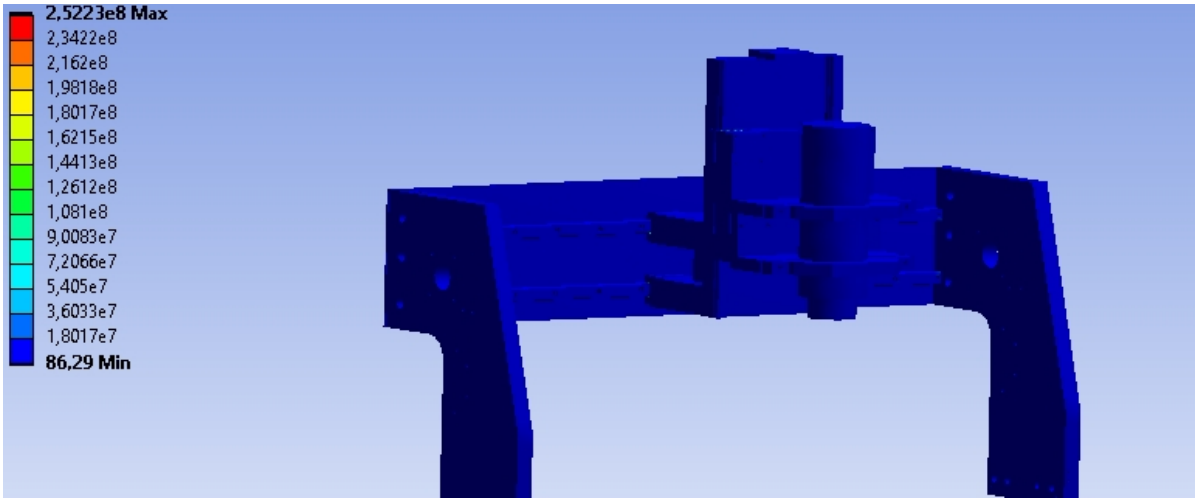


Рис 6. Эпюры напряжения. Расчет 2: Крутящий момент 3,2 Н·м

В расчетах наблюдаются локальные напряжения от 200 до 250 МПа на направляющей рельсе оси *Z* шпинделя, однако они находятся в пределе допустимых значений (рис. 5, 6.).

Проведенные расчеты позволили сделать вывод, что оборудование подходит для проведения исследований обработки ПКМ представленной конструкцией инструмента.

Для реализации технологии на выбранным оборудовании его следует разместить на опорном основании. Конструкция основания представлена на рис. 7. Основание сварено из листа, толщиной 10 мм, четырех прямоугольных накладок, толщиной 10 мм, четырех швеллеров сечением 80x50x6, четырех уголков 40x40x4, шести швеллеров 55x30x6 и двух уголков 55x40x5.

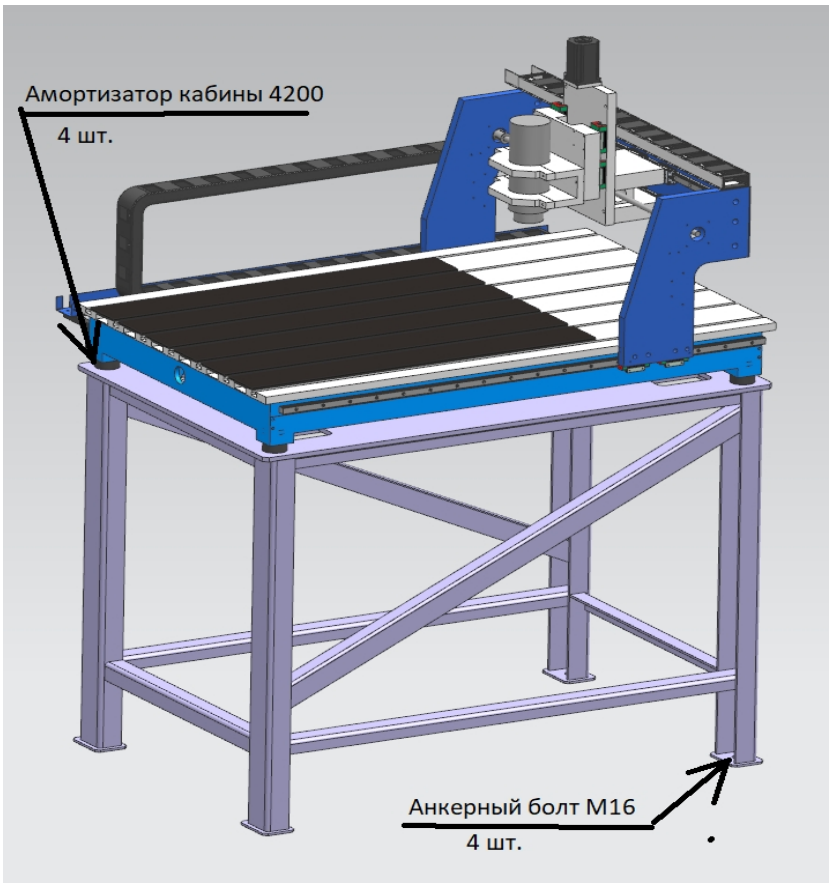
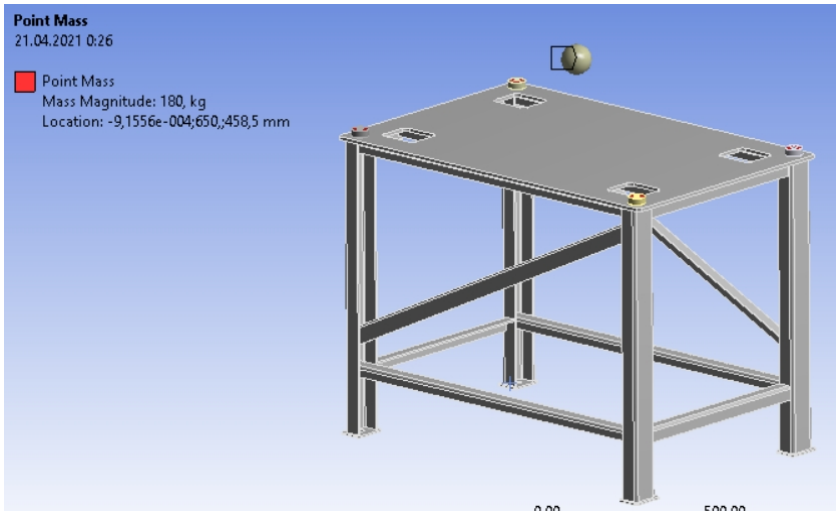
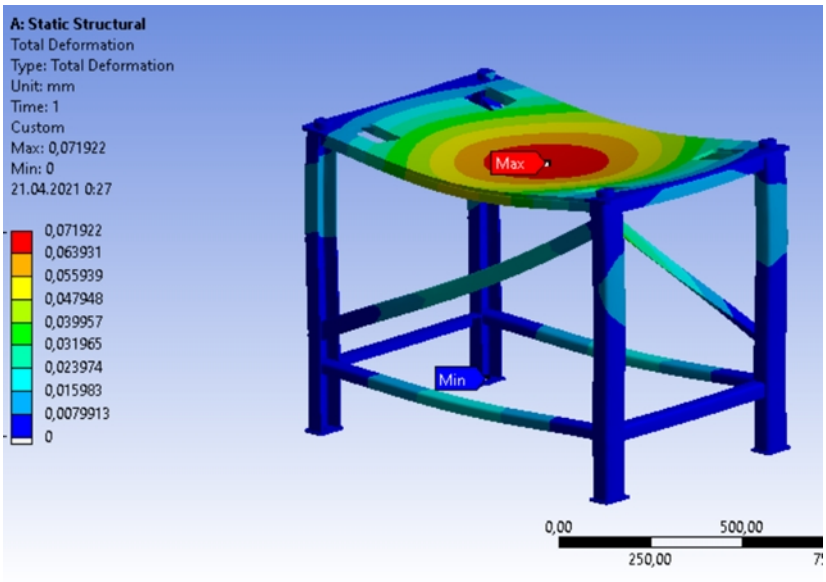


Рис. 7. Основание фрезерного станка.

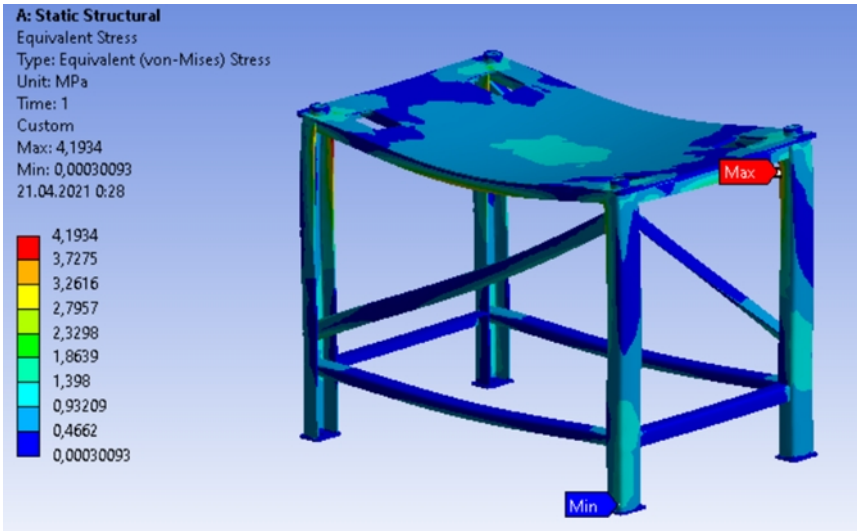
Для проверки проведен расчет основания на прочность. Результаты расчета основания в среде *ANSYS* представлены на рисунке 8 (а, б, в).



а)



б)



в)

Рис.8. Расчет каркаса основания на собственные частоты:
а) расчет центра масс; б) расчет на статику - полная структура; в) расчет на статику - эквивалентное напряжение.

Для дальнейшего анализа необходимо определить источники возмущающих колебаний (двигатели перемещения по осям координат, электрошпиндель и т. д.). Построить графики с диапазоном каждого источника и сравнить с собственными частотами станка и определить диапазон, при котором есть вероятность возникновения резонанса станка. Диапазон, при котором есть вероятность возникновения резонанса станка, представлен на рисунке 9.

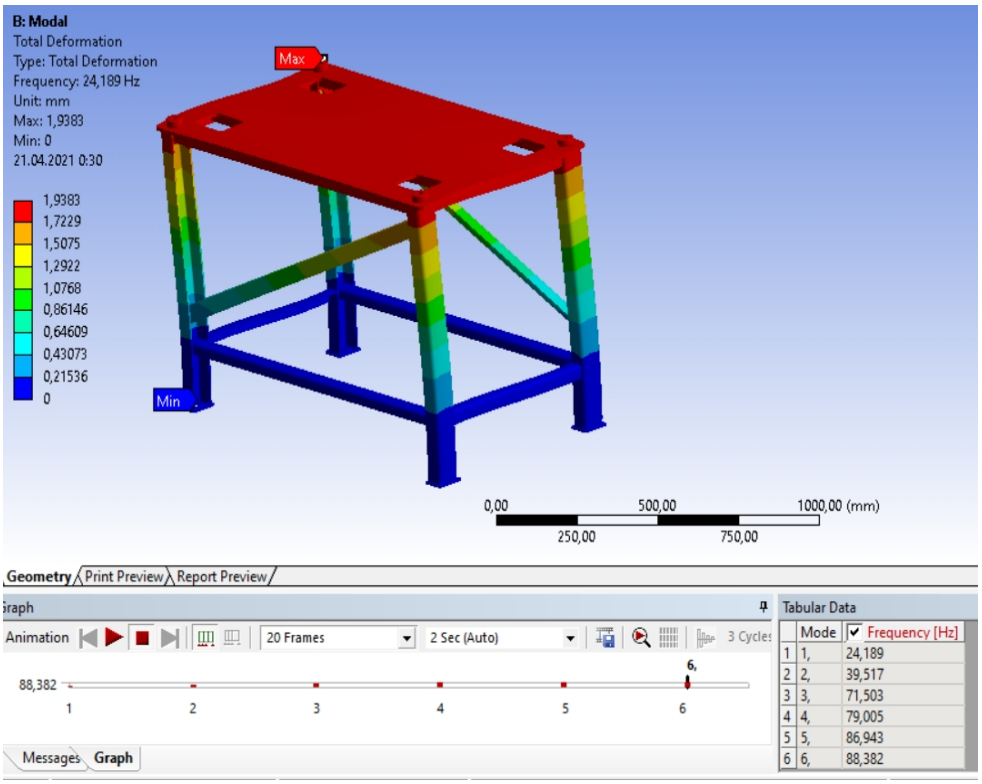


Рис .9. Диапазон вероятности возникновения резонанса станка

Результат проведенного расчета показал, что основание выдерживает станок и процесс обработки.

Кроме того, необходимо учитывать, что обработка резанием композитов сопровождается обильным выделением большого количества стружки и пыли. Частички разрушенного армирующего материала (стекло, угольные и борные волокна и т.п.), смешанные с частицами затвердевшего связующего, рассеиваются в воздухе и загрязняют его.

Максимально допустимая концентрация стеклянной пыли в производственном помещении не должна превышать 4 мг/м^3. Установлено, что при отсутствии в производственном помещении специальной приточно-вытяжной вентиляции концентрация стеклопыли может достигать 100-130 мг/м^3.

Следовательно, оборудование необходимо снабдить защитными кожухами и устройством для удаления стружки и пыли из зоны резания.

Для удаления пыли и стружки из зоны резания рекомендуем использовать индивидуальный отсасывающий арегат на базе стандартного циклона модели ЗИЛ-900. Внешний вид агрегата представлен на рис. 9.

Рис.10. Пылеулавливающий агрегат ЗИЛ-900

Габариты агрегата выбраны с учетом размеров лаборатории, в которой планируется установка стенда. Технические характеристики представлены в табл. 2. По техническим характеристикам пылеуловитель подходит для оснащения экспериментального стенда.

Таблица 2

Технические характеристики ЗИЛ-900

№ п/п	Параметры	ЗИЛ-900
1	Габаритные размеры	1700x135x160
2	Производительность по чистому воздуху, $м^3$	720
3	Допускаемая запыленность очищаемого воздуха, $мг/м^3$	35
4	Эффективность пылеулавливания, %	99
5	Очищаемая среда	неагрессивная, невзрывоопасная
6	Поверхность фильтрования, $м^2$	2,8
7	Тип электродвигателя	АИР 80А2
8	Мощность электродвигателя, кВт	1,5
9	Частота вращения, об/мин	2835
10	Род тока	99
11	Габаритные размеры, (длина х ширина х высота)	773x715x1700
12	Масса, кг, не более	110

Окончательная компоновка экспериментального стенда представлена на рис. 11.

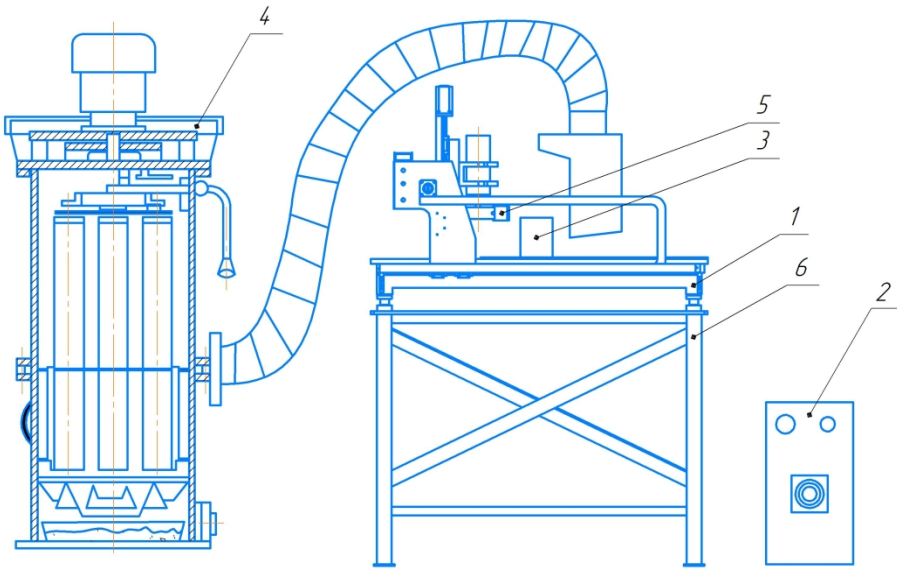


Рис.11. Схема экспериментального стенда для лезвийной обработки неметаллических композитов:
1 – станок *SHG* 0609/*CARVER mini* 0609; 2 – *DSP*-контроллер; 3 – заготовка; 4 – пылеулавливающий агрегат; 5 – фреза; 6 – основание под станок.

Выводы

Спроектированный экспериментальный стенд представляет собой компоновку технологического оборудования, расположенного на основании, контроллера управления, пылеулавливателя, оснастки и инструмента и позволяет исследовать процесс лезвийной обработки неметаллических композитов с различными режимами резания, варьируемыми геометрическими параметрами инструмента и при сочетаниях разных инструментальных и обрабатываемых материалов, что позволяет определить рациональные режимы и условия обработки ПКМ.

Список литературы

1. *Буланов И.М., Воробей В.В.* Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. – М.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.

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

3. Формирование режущей кромки фрезерного инструмента для обработки слоистых композиционных материалов, армированных стеклянными волокнами / Д.А. Рычков, В.А. Скрипняк, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2 (22). – С. 42–46.

4. *Макаров В.Ф., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В.* Оптимизация процесса обработки высокотехнологичных композиционных материалов методом фрезерования // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: материалы 7 Всероссийской научно-технической конференции, Уфа, 23–24 марта 2017 г. – Уфа, 2017. – С. 9–17.

5. *Рычков Д.А.* Рационализация параметров фрезерования полимерных композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 100–105.

6. *Рычков Д.А., Янюшкин А.С.* Способ повышения эффективности производства изделий из полимерных композитов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 3 (72). – С. 23–30. – DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30.

7. Рационализация процесса фрезерования труднообрабатываемых композиционных материалов твердосплавным инструментом / А.М. Кузнецов, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов и др. // Механики XXI веку. – 2008. – № 7. – С. 196–200.

8. Конструкции фрез для обработки стеклопластиков / С.А. Катаева, А.М. Марков, П.О. Черданцев и др. // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 307–312.

9. *Мешкас А.Е., Макаров В.Ф., Ширинкин В.В.* Технологии, позволяющие повысить эффективность обработки композиционных материалов методом фрезерования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8/2. – С. 291–299.

10. *Артамонов Е.В.* Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – 192 с.

11. *Артамонов Е.В., Помигалова Т.Е., Утешев М.Х.* Расчет и проектирование сменных режущих пластин и сборных инструментов / под общ. ред. М.Х. Утешева. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 152 с.

12. Патент 2076789 Российской Федерации. Устройство для крепления режущих пластин различных типоразмеров или кассет, их содержащих, в сборном режущем инструменте, МПК С1 В23С5/22 / С.Ф. Аслибекян, В.К. Прокофьев, М.М. Филин, С.И. Ветров. – № 95110853/08; заявл. 11.07.95; опубл. 10.04.97.

13. Сборный твердосплавный инструмент / Г.Л. Хает, В.М. Гах, К.Г. Громаков и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.

14. *Лобанов Д.В., Владимирова Н.А., Рафанова О.С.* Особенности процесса лезвийной обработки полимерных композиционных материалов и формообразования режущего инструмента // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: материалы 4 международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Пермь, 14–15 дек. 2020 г. – Пермь, 2021. – С. 141–144.

15. *Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А.* Технологические методы изготовления и выбора режущего инструмента для фрезерования композиционных материалов на полимерной основе // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Машиностроение. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 35–46.

16. Организация инструментального хозяйства при обработке композиционных материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Н.П. Петров // СТИН. – 2010. – № 11. – С. 2–4.

17. Новые конструктивные решения сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков, А.М. Кузнецов // Труды Братского государственного университета. Естественные и инженерные науки. – 2013. – Т. 1. – С. 153–157.

DEVELOPMENT OF A TEST BENCH FOR THE STUDY OF THE MACHINING PROCESS OF NON-METALLIC COMPOSITE MATERIALS

Lobanov D.V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: lobanovdv@list.ru
Danilov P.G, Post-graduate Student, e-mail: danilov211@mail.ru
Vladimirova N.A, Graduate students, e-mail: nata1410_1997@mail.ru
Grigoriev A.N, Graduate students, e-mail: sanya.grigori@yandex.ru

I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

Abstract

The composite material is characterized by low density, high specific strength and rigidity. The mechanical processing of composites differs significantly from the processing of metals. The paper discusses the criteria for creating an experimental stand for processing non-metallic composite materials. Improving the efficiency of processing composites with a cutting tool requires ensuring the technological parameters of the machine, the device and the tool, which guarantee its operation with maximum efficiency and quality of the processed products. The purpose of this work is to develop an experimental stand for the study of the machining process of non-metallic composite materials. The strength and dynamic calculations of the elements of the stand are given. As a result of the calculations, it is revealed that the designed bench allows studying the process of blade processing with different modes and a tool with different geometric parameters, equipped with different tool materials.

Keywords
composite materials, cutting tool, fixture, cutting, efficiency.

УДК 621.9.06(07): 621.785(787)

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО ОБОРУДОВАНИЯ*

В.Ю. СКИБА, канд. техн. наук, доцент
Е.А. ЗВЕРЕВ, канд. техн. наук, доцент
В.В. ИВАНЦИВСКИЙ, доктор техн. наук, профессор
К.А. ТИТОВА, аспирант, ассистент
(*НГТУ, г. Новосибирск*)

Скиба В.Ю. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: skiba@corp.nstu.ru

Объектом данных исследований является технологический процесс изготовления деталей машин, состоящий из операций: предварительная механическая обработка (черновое и получистовое точение), поверхностная закалка (высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты) и финишная механическая обработка (чистовое точение и алмазное выглаживание). Представлено решение задачи прогностики качества при концептуальном проектировании гибридного технологического оборудования. Разработанная методика обоснования технических характеристик гибридного металлообрабатывающего оборудования на базе математического моделирования условий его эксплуатации обеспечивает возможность использования систем автоматического проектирования на начальной стадии создания общей концепции нового технологического оборудования. Произведена апробация разработанной методики проектирования и предложена схема реализации гибридного металлообрабатывающего технологического оборудования на базе станков токарной группы.

Ключевые слова: Гибридное оборудование, механическая обработка, резание, режущая керамика, поверхностная закалка, высокоэнергетический нагрев.

Введение

В условиях рыночной экономики, неотъемлемой частью которой является глобализация предприятий и жесткая конкурентная борьба, перед машиностроительной отраслью промышленности стоить крайне важная задача, заключающаяся в повышении производительности оборудования и сокращении производственных затрат при сохранении качества выпускаемой продукции [1 - 17]. Традиционная технологическая схема изготовления деталей машин подразумевает разделение поверхностно-термической закалки и механической обработки. Каждая операция выполняется на разных участках, оснащенных технологическим оборудованием, предназначенным для раздельного выполнения этих операций (рис. 1) [4, 5, 9]. При реализации такой схемы необходимо назначать достаточно большой припуск на чистовую обработку (до 40% заданной глубины закалки), это вызвано наличием погрешностей при деформация материала в процессе термической обработки, при переустановке деталей, а также на предыдущих стадиях процесса [4 - 22].

Исходя из этого, возникает необходимость в осуществлении термообработки поверхности на глубину, превышающую заданную чертежом, а затем на стадии финишной обработки приходится удалять наиболее эффективный поверхностный слой. Это снижает производительность на обеих операциях и увеличивает энергозатраты.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 20-48-540016

Рис. 1. Типовой технологический процесс и технологический процесс при использовании гибридного металлообрабатывающего оборудования

Гибридные металлообрабатывающие станки позволяют минимизировать недостатки, присущие традиционной технологии с раздельной обработкой поверхностей деталей, поэтому такое инновационное технологическое оборудование набирает популярность в станкостроительной отрасли отечественного машиностроения [1, 3 – 5, 7, 9, 11, 13]. Объединение на базе одного станка двух и более процессов (абразивное шлифование – поверхностная закалка, лазерная поверхностная закалка – механическая обработка, точение – закалка – шлифование), различных по своей природе, расширяет технологические возможности оборудования. Такие станки могут работать автономно в условиях гибкого машиностроительного производства. Их применение позволяет значительно повысить производительность, сохранить качество выпускаемой продукции и снизить ресурсо- и энергозатраты. Сокращение потерь времени на вспомогательные и промежуточные операции при осуществлении технологического цикла обработки деталей делает применение интегрированных технологий еще более эффективным [1 - 23].

Разработка общей концепции гибридного станка представляет собой техническое предложение и является началом процесса проектирования нового технологического оборудования. На этом этапе осуществляется выбор рациональных значений технических характеристик интегрального оборудования, отражающих его технологические возможности, металло- и энергоёмкость, эргономичность и пр. [4, 5, 9, 24 – 37]. Еще одной первоочередной задачей, решаемой на данной стадии проектирования гибридной металлообрабатывающей системы, является ее структурный синтез, заключающийся в определении составляющих элементов системы и связей между ними.

Таким образом, целью данной работы является разработка и апробирование технологии проектирования гибридного оборудования.

Методика исследований

Для проведения проектирования гибридного металлообрабатывающего станка были проведены предпроектные исследования на примере комплексной обработки детали типа «Вал» (рис. 2).

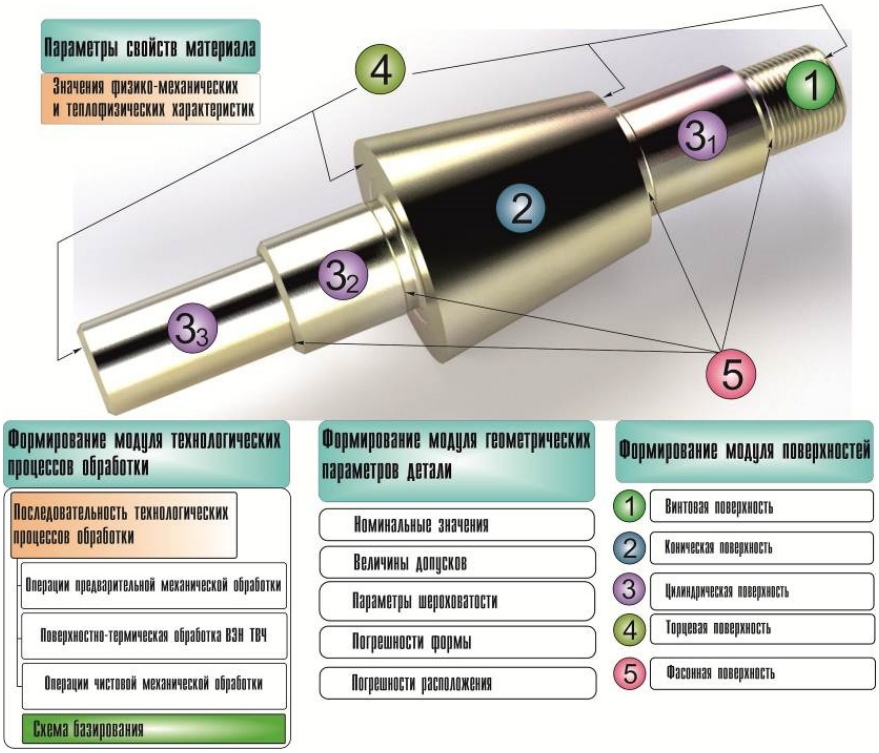


Рис. 2. Обрабатываемая деталь - представитель

При интеграции механических и поверхностно-термических процессов на основании положений структурно-кинематического синтеза металлорежущих станков были проведены исследования возможного структурного состава и компоновки гибридной металлообрабатывающей системы (ГМС), определены исполнительные движения, а также ряд необходимых настраиваемых параметров [4, 5, 9, 24 – 27, 29]. Примеры возможных компоновок металлообрабатывающих систем представлены в работах [4, 5, 9, 24 – 27, 29, 32, 33].

Поскольку технические характеристики (ТХ) новых технологических машин во многом определяют качество обрабатываемых деталей, тем самым формируя их потребительскую ценность, то обоснование ТХ является одной из главных задач еще на стадии разработки общей концепции оборудования [4, 32 - 37].

Комплексированное металлообрабатывающее оборудование имеет ряд специфических особенностей, что усложняет решение поставленных задач. Прежде всего, сложность заключается в том, что при разработке станочной системы такого уровня необходимо спрогнозировать условия ее долгосрочной эксплуатации [4, 32 - 37]. С учетом суммарного времени процессов проектирования, изготовления, испытания и функционирования станочного комплекса этот период может составлять более 10 лет. Вторая проблема заключается в том, что между изменением геометрических характеристик деталей и инструментов и изменением режимных параметров процессов резания и высокоэнергетического индукционного нагрева существует взаимосвязь. Поскольку гибридные металлообрабатывающие станки предназначены для обработки изделий широкой номенклатуры, они выполняют множество различных технологических операций, значительно отличающихся между собой природой функционального воздействия на изделия, в связи с этим изложенные выше проблемы для ГМС представляют особую сложность. Значительно упростить решение таких сложных задач в рамках предлагаемой методологии можно, применяя разработанный нами программный продукт, который позволяет обосновать технические характеристики технологического оборудования. Эта

разработка обладает рядом важных положительных качеств, таких как достаточно широкая универсальность и малая чувствительность к ошибкам прогноза исходных факторов. При использовании данного продукта для определения рациональных значений ТХ проектируемого оборудования потребуется минимальный набор первичной информации. Достаточно лишь указать средние и максимальные значения случайной величины, количество вариантов и вероятность условий обработки, а также коэффициент корреляции случайных величин [4, 32 - 37].

Результаты и обсуждение

Анализ альтернативных вариантов организации процессов формообразования элементарных поверхностей при условии, что все чистовые и черновые механические операции и поверхностно-термическая обработка осуществляются за один установ детали, позволил получить структурную формулу ГМС, которая имеет следующий вид: $C_h0ZX(rd+d)$.

Затем определили требуемое количество и состав исполнительных движений (ИД), исходя из функционального назначения оборудования. Это могут быть формообразующие, установочные, вспомогательные движения, движения управления или деления. Пример структурно-кинематической схемы гибридного оборудования, реализуемого по токарной схеме, представлен на рис. 3.

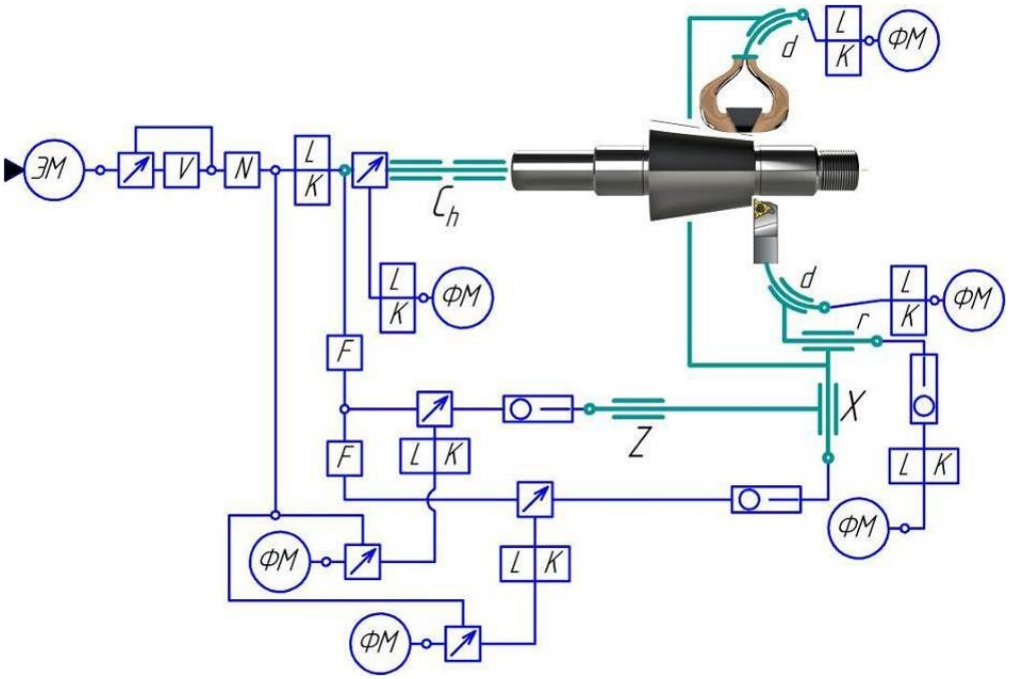


Рис. 3. Структурно-кинематическая схема гибридной металлообрабатывающей системы – структурная формула $C_h0ZX(rd+d)$

На одном из технологических переходов гибридного станка предполагается применить индукционный нагрев, т.е. нагрев токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ), и это учитывается при проектировании интегрального оборудования. Поверхностная закалка стальных деталей с глубиной упрочнения порядка h = 1 мм, входящая в область наших интересов, предполагает эффективное применение ВЭН ТВЧ на частотах, находящихся в диапазоне ω = 100÷440 кГц, поскольку при данном факторе глубина проникновения тока в стальные изделия составляет от 0,6 до 0,8 мм. Как показало моделирование ТХ гибридного металлообрабатывающего оборудования, для обеспечения производительности термической

обработки сопоставимой с производительностью механических операций формообразования, осуществлять ВЭН ТВЧ необходимо на скоростях $V_и \in [50, 100]$ мм/с. Как показали результаты натурного эксперимента, удельные мощности источника $q_и$ *(h,* $V_и$*)* для осуществления обработки ВЭН ТВЧ должны находиться в диапазоне $q_и \in [1,5; 4,0]\ 10^8$ Вт/м^2 [4, 5, 9]. Сравнительно высокие показатели удельных мощностей процесса индукционного нагрева предъявляют особые требования к конструкции индукторов, которая будут иметь существенные отличия от традиционных конфигураций. Не смотря на разнообразие форм индукторов, для термоупрочнения деталей с применением высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты рекомендуется отдавать предпочтение плоским индукторам петлевого типа с магнитопроводом. Такая конструкция индуктора обеспечивает локализованный участок нагрева. Выбор длины магнитопровода осуществляется на основании учета значений удельной мощности в зоне обработки, а также геометрическими параметрами обрабатываемого участка детали, которые в свою очередь также взаимосвязаны с шириной активного провода индуктора. Толщина стенок активного провода индуктора должна находиться в пределах $(1...1,4)\delta_м$ (здесь $\delta_м$ – глубина проникновения тока), чтобы обеспечить отвод теплоты в необходимом количестве, тем самым предотвращая опасность перегорания провода. Так, например, глубина проникновения тока для меди при частоте тока 440 кГц составит 0,11 мм, следовательно, чтобы снизить суммарную мощность на индукторе, его активный провод должен иметь минимальную ширину, т.е. составлять 1...2 мм. Определяя длину активного провода индуктора, необходимо учитывать особенности осуществления типовых формообразующих движений при поверхностной закалке и трудоемкость технологии его изготовления. Как правило длина активного провода индуктора составляет порядка 10 мм, тогда максимальная площадь зоны активного провода индуктора будет равна 20 мм^2 [4, 5, 9].

Учитывая, что

$$q_и = N_{ТВЧуст} \cdot \eta_{ТВЧуст} / A,$$

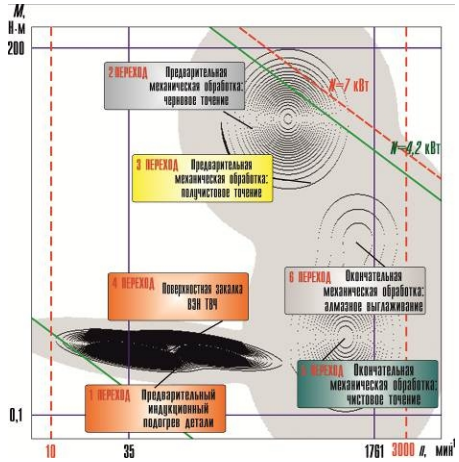
где $N_{ТВЧуст}$ – мощность ТВЧ установки, $\eta_{ТВЧуст}$ – коэффициент полезного действия ТВЧ установки (для генераторов тиристорного типа $\cdot\eta_{ТВЧуст} \approx 0,97$), А – площадь зоны активного провода индуктора, максимальная мощность генератора токов высокой частоты равна:

$$N_{max} = 4,0 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / 0,97 \approx 8,25 \text{ кВт}.$$

Таким образом нами будут рассматриваться высокочастотные генераторы типа СВЧ-10 мощностью 10 кВт, т.к. они соответствуют высокому уровню развития микропроцессорной техники в области высокочастотных промышленных преобразователей тиристорного типа, а также соответствуют критериям удобоваримого встраивания в ГМС.

Разработанная и предложенная в данной работе методика прогноза (рис. 4, а) позволила смоделировать технические характеристики гибридного оборудования и определить их рациональный диапазон варьирования. Это дало возможность оценить целесообразность модернизации привода главного движения станка для расширения диапазона регулирования скорости (рис. 4, б).

Параметры условий обработки	Обозначение	1 ПЕРЕХОД Предварительный индукционный подогрев деталей	2 ПЕРЕХОД Предварительная механическая обработка: черновое точение	3 ПЕРЕХОД Предварительная механическая обработка: получистовое точение	4 ПЕРЕХОД Поверхностная закалка ВЭН ТВЧ	5 ПЕРЕХОД Окончательная механическая обработка: чистовое точение	6 ПЕРЕХОД Окончательная механическая обработка: алмазное выглаживание
Минимальный диаметр обработки, мм	d_{min}	10	10	10	10	10	10
Максимальный диаметр обработки, мм	d_{max}	160	160	160	160	160	160
Минимальная скорость обработки, м/мин	V_{min}	1	16	60	2	90	110
Максимальная скорость обработки, м/мин	V_{max}	3	190	250	12	300	260
Минимальная сила, Н	P_{min}		1200	300		9	100
Максимальная сила, Н	P_{max}		4000	1000		50	300
Минимальный момент, Н м	M_{min}	0,2			0,2		
Максимальный момент, Н м	M_{max}	0,5			0,5		
Вероятность условий обработки	P^*	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,05
Коэффициент корреляции между логарифмами скорости и диаметра	R_V	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Коэффициент корреляции между логарифмами силы и диаметра	R_M		0,6	0,6		0,6	0,6
Коэффициент корреляции между логарифмами момента и частоты вращения	R_N	-0,6			-0,6		



а *б*

Рис. 4. Моделирование технических характеристик гибридного оборудования:
а – исходные данные; *б* – суммарная функция распределения ТХ

В результате реализации всего комплекса необходимых процедур и мероприятий вероятность выполнения всех указанных переходов интегральной обработки повысилось с 80% до 99%, а это, безусловно, будет способствовать к повышению производительности гибридного оборудования в целом.

Общий вид гибридного станка для интегрированной обработки деталей в виде тел вращения представлен на рисунке 5.

Рис. 5. Гибридный станок для интегральной обработки деталей в виде тел вращения

Заключение

На основе разработанной методики предпроектных исследований произведено проектирование и конструирование гибридного металлообрабатывающего технологического оборудования на базе станка токарной группы. Использование предлагаемого гибридного станка обеспечит повышение эффективности металлообработки в целом: существенно повысится производительность изготовления деталей машин за счет реализации процессов поверхностной закалки методом высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты и

механической обработки от одной технологической базы без промежуточных переустановов детали и инструментов.

Список литературы

1. *Макаров В.М.* Комплексированные технологические системы: перспективы и проблемы внедрения // Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2011. – № 6 (64). – С. 20–23.

2. *Garro O., Martin P., Veron M.* Shiva a multiarms machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1993. – Vol. 42, iss. 1. – P. 433–436. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.

3. *Макаров В.М., Лукина С.В.* Уникальная синергия гибридных станков // Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2016. – № 8. – С. 18–25.

4. *Скиба В.Ю.* Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности ранних стадий проектирования комплексированных металлообрабатывающих станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 62–83. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

5. *Скиба В.Ю., Иванцивский В.В.* Гибридное металлообрабатывающее оборудование: повышение эффективности технологического процесса обработки деталей при интеграции поверхностной закалки и абразивного шлифования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 312 с. – ISBN 978-5-7782-3690-5.

6. Manufacturing systems and technologies for the new frontier: 41st CIRP conf. on Manufacturing Systems, Tokyo, Japan, May 26–28, 2008 / eds.: M. Mitsuishi, K. Ueda, F. Kimura. – London: Springer, 2008. – 556 p. – eBook ISBN 978-1-84800-267-8. – DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.

7. *Борисов М.А., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С.* Гибридная технология электрохимической обработки сложнопрофильных изделий // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 25–34. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-25-34.

8. *Brecher C., Özdemir D.* Integrative production technology: theory and applications. – Cham: Springer International Publ., 2017. – 1100 p. – ISBN 978-3-319-47451-9. – DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6.

9. *Иванцивский В.В., Скиба В.Ю.* Гибридное металлообрабатывающее оборудование. Технологические аспекты интеграции операций поверхностной закалки и абразивного шлифования: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 348 с. – ISBN 978-5-7782-3988-3.

10. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeeba, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 30, iss. 12. – DOI: 10.1080/10426914.2014.973595.

11. Research of influence electric conditions combined electrodiamond processing by on specific consumption of wheel* / D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, V.Yu. Skeeba // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142. – P. 012081. – DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012081.

12. Ways to implement hybrid finishing technology with a hand-held rotary tool / D. Lobanov, M. Borisov, A. Yanyushkin, V. Skeeba // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709, iss. 4. – P. 044075. – DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044075.

13. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / V.Y. Skeeba, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyshkin, K.A. Parts // IOP

Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 126. – P. 012016. – DOI: 10.1088/1757-899x/126/1/012016.

14. Hybrid processes in manufacturing / B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A.E. Tekkaya et al. // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 63, iss. 2. – P. 561–583. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.

15. *Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V.* Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 91. – P. 012051. – DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.

16. *Yamazaki T.* Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 42. – P. 81–86. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.

17. *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. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.09.001.

18. Densification, surface morphology, microstructure and mechanical properties of 316L fabricated by hybrid manufacturing / Y. Yang, Y. Gong, S. Qu, Y. Rong, Y. Sun, M. Cai // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 97, iss. 5–8. – P. 2687–2696. – DOI: 10.1007/s00170-018-2144-1.

19. *Nagae A.* Development Trend of Multi-tasking Machines // Proceedings of the 11th International Conference on Machine Tool Engineers, Japan, Tokyo, Nov. 3–5, 2004. – Tokyo, 2004. – P. 312–323.

20. *Moriwaki T.* Multi-functional machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 57, iss. 2. – P. 736–749. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.

21. *Boivie K., Karlsen R., Ystgaard P.* The concept of hybrid manufacturing for high performance parts // South African Journal of Industrial Engineering. – 2012. – Vol. 23, iss. 2. – P. 106–115. – DOI: 10.7166/23-2-334.

22. Effects of turn-milling conditions on chip formation and surface finish / K.R. Berenji, U. Karagüzel, E. Özlü, E. Budak // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 68. iss. 1. – P. 113–116. – DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.067.

23. *Jeon Y., Lee C.M.* Current research trend on laser assisted machining // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2012. – Vol. 13, iss. 2. – P. 311–317. – DOI: 10.1007/s12541-012-0040-4.

24. *Ивахненко А.Г.* Повышение эффективности ранних стадий проектирования металлорежущих станков на основе структурного синтеза формообразующих систем: дис. … д-ра техн. наук. – Москва. 1998. – 244 с.

25. *Куц В.В.* Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем: дис. … д-ра техн. наук: 05.02.07. – Курск, 2012. – 365 с.

26. Effectiveness of structural–parametric synthesis of metal-cutting systems / A.G. Ivakhnenko, V.V. Kuts, O.Y. Erenkov, E.O. Ivakhnenko, A.V. Oleinik // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37, iss. 10. – P. 901–905. – DOI: 10.3103/S1068798X17100112.

27. *Врагов Ю.Д.* Анализ компоновок металлорежущих станков (Основы компонетики). – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.

28. *Mekid S.* Introduction to Precision Machine Design and Error Assessment. Series: Mechanical and Aerospace Engineering Series. – London: CRC Press, 2008. – 302 p. – ISBN 9780367386061.

29. *Ивахненко А.Г., Куц В.В.* Структурно-параметрический синтез технологических систем: монография. – Курск: Курский гос. техн. ун-т, 2010. – 151 с.

30. 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.

31. Optimal Structure Design Methodology for Compound Multiaxis Machine Tools – II – Investigation of Basic Structure / M. Nakaminami, T. Tokuma, K. Matsumoto, S. Sakashita, M. Moriwaki, K. Nakamoto // International Journal of Automation Technology. – 2007 – Vol. 1, iss. 2. – P. 87–93. – DOI: 10.20965/ijat.2007.p0087.

32. Разработка технологической установки для плазменно-механической обработки / П.В. Трегубчак, Д.Ю. Корнев, В.Н. Пушнин, В.Ю. Скиба // Механики XXI веку. – 2015. – № 14. – С. 135–141.

33. Прогнозирование технических характеристик интегрального технологического оборудования / В.Н. Пушнин, Д.Ю. Корнев, Н.В. Вахрушев, В.Ю. Скиба, К.А. Парц // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2014. – Т. 2. – С. 97–101.

34. *Skeeba V.Y., Ivancivsky V.V.* Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 194, iss. 2. – P. 022037. – DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.

35. *Skeeba V.Y., Skeeba P.Y.* Determining the operational loads of the hybrid metalworking machines drive // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 378. – P. 012031. – DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012031.

36. *Skeeba V.Y.* Parametric optimization of hybrid metalworking machinery quality // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 378. – P. 012030. – DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012030.

37. Надежность прогноза качества технологического оборудования / С.В. Птицын, В.Ю. Скиба, Ю.С. Чёсов, Е.В. Мережко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 2 (59). – С. 33–38.

HYBRID EQUIPMENT DEVELOPMENT

Skeeba V.Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skiba@corp.nstu.ru
Zverev E.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: egor_z@ngs.ru
Ivancivsky V.V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ivancivskij@corp.nstu.ru
Titova K.A., Ph.D. student, Assistant, e-mail: krispars@yandex.ru

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

Abstract

The object of these studies is the technological process of manufacturing machine parts, consisting of the following operations: preliminary machining (rough and semi-finishing turning), surface hardening (high-energy heating by high-frequency currents) and finishing machining (finishing turning and diamond burnishing). The solution to the problem of predicting quality in the conceptual design of hybrid technological equipment is presented. The developed methodology for substantiating the technical characteristics of hybrid metalworking equipment on the basis of mathematical simulation of the conditions of its operation provides the possibility of using automatic design systems at the initial stage of creating a general concept of new technological equipment. The developed design methodology is tested and a scheme for the implementation of hybrid metalworking technological equipment based on lathe machines is proposed.

Keywords
Hybrid equipment, machining, cutting, cutting ceramics, surface hardening, high-energy heating

Funding
The research was funded by RFBR and Novosibirsk region, project number 20-48-540016.

УДК 621.9

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОФИЛЯ ДИСКОВОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

О.В. ЗАХАРОВ, доктор техн. наук, профессор
А.А. ТРОШИН, аспирант
(*СГТУ им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов*)

Захаров О.В. – 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77,
Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина,
e-mail: zov20@mail.ru

Винтовые поверхности являются основным рабочим элементом концевых фрез, сверл, а также роторов насосов. В настоящее время для обработки винтовых поверхностей наиболее часто используют дисковый инструмент типа фрез и шлифовальных кругов. Рассмотрена математическая модель и численный алгоритм профилирования дискового инструмента. Достоинством численного алгоритма будет гарантированное отсутствие подрезания при сколь угодно сложном профиле. Исследована оптимизация профиля инструмента в зависимости от трех параметров его установки относительно детали: угла скрещивания, кратчайшего межосевого расстояния и наладочного осевого смещения. Критерием оптимизации выбрана наименьшая высота профиля с минимальной кривизной. Разработанный алгоритм реализован в виде программы в среде *MATLAB*. Для проверки алгоритма проведено моделирование профиля и его оптимизация. Численные эксперименты показали, что профиль инструмента за счет оптимизации может менять глубину в 2-5 раз и кривизну в 2-3 раза.

Ключевые слова: винтовая поверхность, дисковый инструмент, математическая модель, профилирование, численный алгоритм, оптимизация.

Введение

Винтовые поверхности являются рабочими для концевых фрез, сверл, а также роторов насосов [1-3]. Обработка винтовой поверхности представляет собой трудоемкий, дорогостоящий и технологически сложный процесс. Применение новых сложных профилей винтовых поверхностей и повышение требований к точности требуют совершенствования методов расчета. В настоящее время для обработки наиболее часто используют дисковый инструмент типа фрез и шлифовальных кругов [4, 5]. Решение задачи профилирования может осуществляться методами дифференциальной геометрии, численными методами, применением известных CAD/CAE программ [6, 7].

В статье рассматривается задача расчета точного профиля инструмента при заданном профиле винтовой канавки и параметрах относительного положения на станке. Такая задача является более сложной и в общем случае не решается методами дифференциальной геометрии [8]. Разработан численный метод расчета профиля. Основы метода изложены в работах [9, 10]. В настоящей статье численный метод усовершенствован и обоснована оптимизация профиля. Профиль моделируется малым набором опорных точек, которые с помощью аппроксимации увеличиваются в десятки-сотни раз. Достоинством авторского

метода будет гарантированное отсутствие подрезания при сколь угодно сложном профиле.

Математическая модель

Для аналитического описания используем координатную схему обработки (рис. 1). Декартова ортогональная система координат *XYZ* связана с винтовой канавкой таким образом, что в плоскости $Z = 0$ известен её профиль. Система координат $X_1Y_1Z_1$ связана с дисковым инструментом и соотносится с системой *XYZ* с помощью трёх установочных параметров: кратчайшего межосевого расстояния *A*, угла λ скрещивания и наладочного осевого смещения *L*.

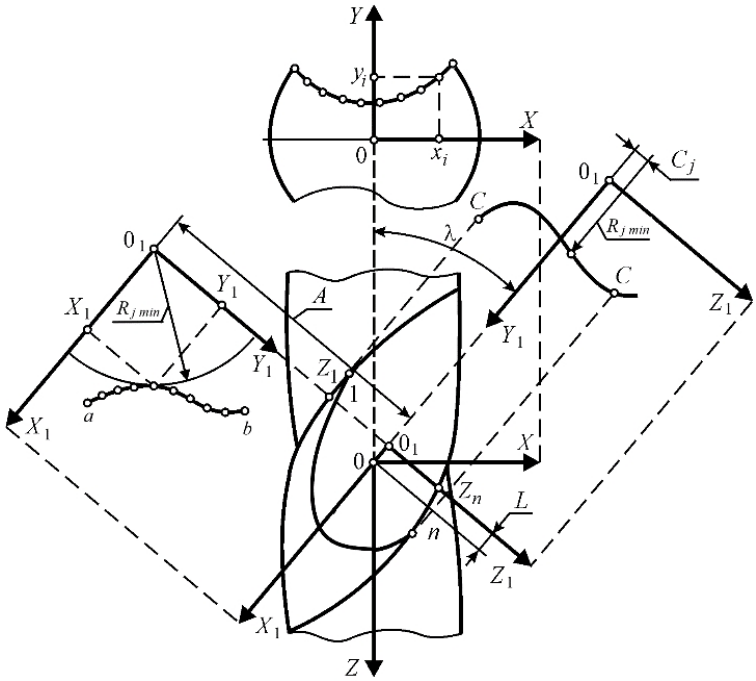


Рис. 1. Координатная схема профилирования инструмента

Исходный профиль винтовой канавки для удобства задается опорными точками с координатами x_i, y_i (i = 1, …, n), число n которых определяет точность расчетов. Для повышения точности расчета используется аппроксимация полученного профиля кубическим сплайном для получения числа точек в 10-100 раз больше исходного числа.

Уравнения i-й винтовой линии, лежащей на винтовой канавке, имеют вид:

$$\left.\begin{aligned} X &= x_i\cos\varphi - y_i\sin\varphi; \\ Y &= x_i\sin\varphi + y_i\cos\varphi; \\ Z &= \pm p\varphi, \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где p – параметр винтовой линии («+» соответствует правой винтовой линии, «–» – левой); φ – угол винтового движения.

Уравнения (1) при изменении i от 1 до n описывают семейство винтовых линий, образованных опорными точками профиля. Винтовые линии, заданные уравнениями (1), в системе $X_1Y_1Z_1$ дискового инструмента преобразуются по формуле:

$$\left.\begin{aligned} X_1 &= -X\sin\lambda + Z\cos\lambda + L; \\ Y_1 &= -Y + A; \\ Z_1 &= X\cos\lambda + Z\sin\lambda. \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Для расчета профиля инструмента используется следующий численный алгоритм. Исходными данными будут семейство винтовых линий в системе координат дискового инструмента, описанных уравнениями (1) и (2). Рассечём искомую поверхность инструмента системой плоскостей $Z_1 = C_j$ (j = 1, ..., m) и в каждой из плоскостей найдем минимальный радиус $R_{j\,\min}$ для множества точек пересечения с i-ми винтовыми линиями. Для этого сначала решим последнее уравнение системы (2) для всех i-х винтовых линий. После подстановки выражений (1) в уравнения (2) получим трансцендентное уравнение относительно φ:

$$f(\varphi) = (x_i\cos\varphi - y_i\sin\varphi)\cos\lambda \pm p\varphi\sin\lambda - C_j = 0. \qquad (3)$$

Подставим полученное значение φ из уравнения (3) в первое и второе уравнения системы (2) и найдем координаты X_1 и Y_1 точек, в которых винтовые линии пересеклись с плоскостью $Z_1 = C_j$. Для расчета радиуса $R_{j\,\min}$ поверхности инструмента в плоскости $Z_1 = C_j$ найдем кратчайшее расстояние от оси дискового инструмента (точка 0_1) до найденных точек на кривой ab:

$$R_{j\min} = \min\{R_j\} = \min\left\{\sqrt{X_1^2 + Y_1^2}\right\}_j$$

Рассмотрев все значения j = (1, …, m), получим профиль $C{-}C$ поверхности дискового инструмента в цилиндрических координатах Z_1R_1, где $Z_1 = C_j$, $R_1 = R_{j\,\min}$ (рис. 2).

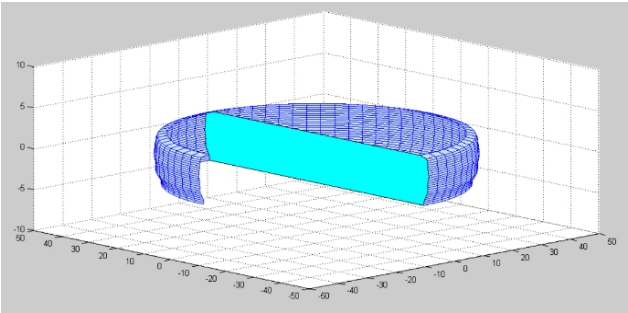


Рис. 2. Производящая поверхность дискового инструмента

Результаты и обсуждение

Для реализации разработанного численного алгоритма подготовлена программа в среде *MATLAB* [11]. Алгоритм расчета профиля дискового инструмента дополнительно учитывает: 1) аппроксимация профиля винтовой канавки для увеличения числа опорных точек, 2) определение границ инструмента, 3) оптимизация профиля инструмента.

Полученный в результате расчета профиль инструмента может быть технологически неудовлетворительным. Однако его можно существенно улучшить, изменяя параметры установки инструмента относительно детали с винтовой канавкой. Наилучшим следует считать профиль, который: 1) имеет наименьшую высоту, 2) имеет наименьшую кривизну. Проведенные численные эксперименты показали, что профиль инструмента за счет оптимизации может менять глубину в 2-5 раз и кривизну в 2-3 раза. При этом может меняться знак кривизны (профиль становится вогнутым или выпуклым).

Некоторые примеры влияния параметров наладки на профиль инструмента даны на рис. 3, где показаны: а – изменение угла λ, б – изменение смещения L, в – изменение

расстояния *A*.

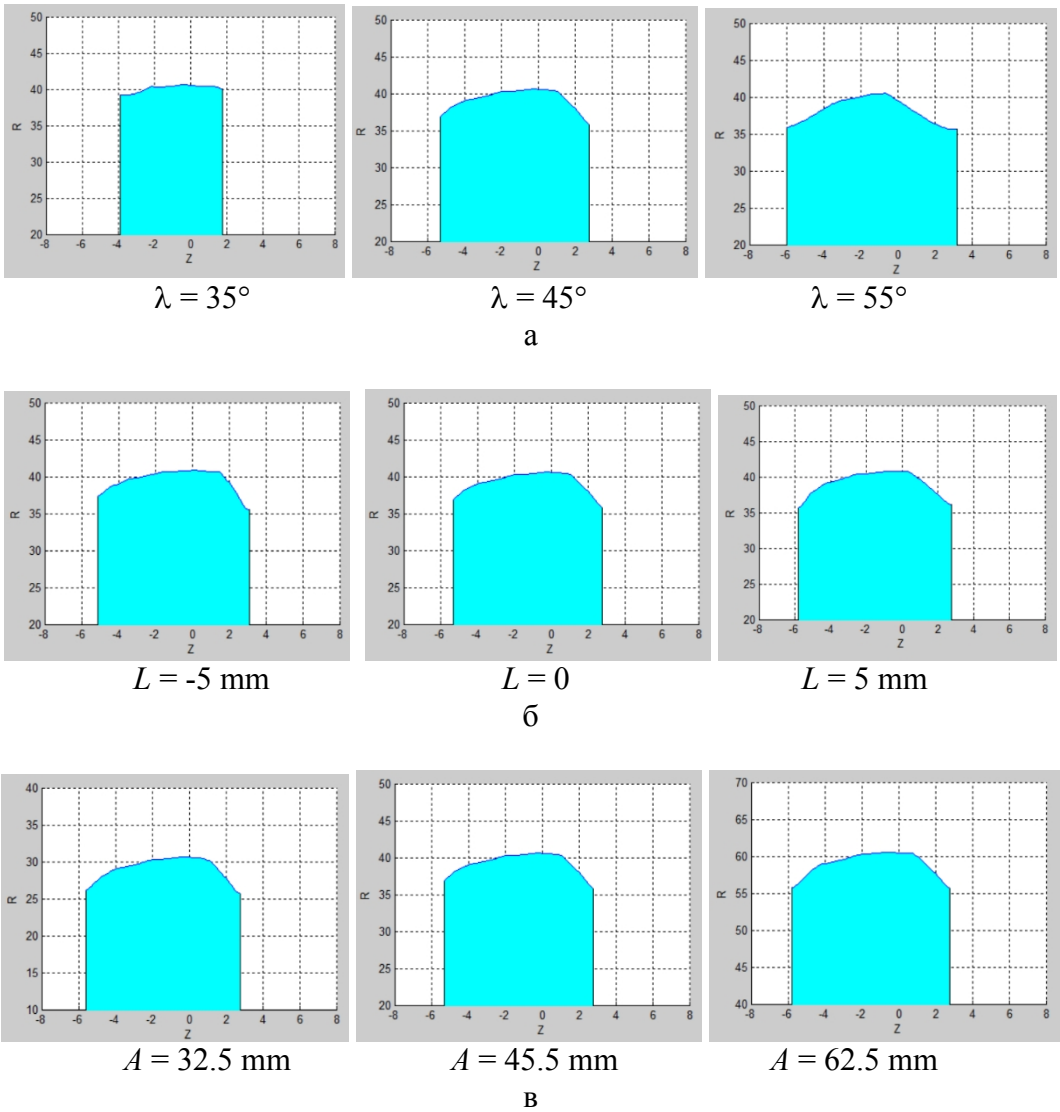


Рис. 3. Примеры оптимизации профиля дискового инструмента

Анализ этих примеров и результатов других расчетов показал следующее. Межосевое расстояние *A* в меньшей степени влияет на профиль, увеличение параметра *A* приводит к незначительному уменьшению высоты профиля, кривизна мало меняется. Межосевое расстояние в первом приближении определяет максимальный радиус инструмента. Поэтому его следует по возможности назначать наибольшим.

Изменение угла λ скрещивания оказывает наибольшее влияние на форму профиля инструмента. При этом меняется ширина инструмента. Наладочное смещение *L* также оказывает влияние на профиль инструмента. Однако степень изменения профиля инструмента сильно зависит от формы профиля и его исходного расположения.

Выводы

Разработан численный алгоритм без использования дифференциальной геометрии для расчета профиля дискового инструмента для обработки винтовой поверхности. Алгоритм

реализован в программе *MATLAB*. Достоинством нового метода является гарантированное отсутствие подрезания при сколь угодно сложном профиле. Проведены эксперименты, позволившие сделать следующие выводы.

1. Путем оптимизации параметров установки инструмента на станке можно менять глубину профиля в 2-5 раз и его кривизну в 2-3 раза.

2. Изменение угла перекрещивания оказывает наибольшее влияние на форму профиля. При этом меняются высота и ширина профиля инструмента. Угол перекрещивания следует выбирать в качестве основного параметра при оптимизации.

3. Наладочное смещение оказывает влияние в основном на высоту профиля. При этом могут существенно меняться форма профиля и его кривизна. Этот параметр наиболее просто устанавливается на станке и его целесообразно оптимизировать наряду с углом перекрещивания.

Список литературы

1. *Мальков О.В., Павлюченков И.А., Козяр В.Н.* Профилирование стружечных канавок резьбовых фрез // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 3. – С. 3–13. – DOI: 10.18698/0536-1044-2018-3-3-13.

2. Исследование работоспособности насоса и выявление причин выхода его из строя / Т.Н. Иванова, Е.О. Емельянов, Д.Н. Новокшонов, Е.Ю. Вдовина // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2016. – № 5. – С. 33–34.

3. *Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А.* Технологические методы изготовления и выбора режущего инструмента для фрезерования композиционных материалов на полимерной основе // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Машиностроение. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 35–46.

4. *Фомин А.А.* Анализ схем попутного и встречного фрезерования заготовок с неоднородными свойствами // Вестник машиностроения. – 2013. – № 2. – С. 59–61.

5. *Печенин В.А., Болотов М.А., Рузанов Н.В.* Модель координатных измерений геометрии поверхностей сложной формы // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 21, № 4. – С. 675–685. – DOI: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.675-685.

6. Современные методы решения задач формообразования сложного режущего инструмента / В.А. Гречишников, П.В. Домнин, В.А. Косарев и др. // СТИН. – 2013. – № 12. – С. 6–11.

7. *Погораздов В.В., Захаров О.В.* Геометро-аналитическая поддержка технологий формообразования винтовых поверхностей: учебное пособие. – Саратов: СГТУ, 2004. – 72 с.

8. *Иванов В.А., Перевозников В.К.* Исследование параметров установки дисковых инструментов, обрабатывающих винтовые сложнопрофильные поверхности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15, № 4. – С. 7–16.

8. *Бржозовский Б.М., Захаров О.В.* Профилирование дискового инструмента для обработки винтовых поверхностей в среде Matlab // Автоматизация и современные технологии. – 2012. – № 10. – С. 7–11.

9. *Бржозовский Б.М., Захаров О.В.* Алгоритм профилирования дискового инструмента для обработки винтовых поверхностей // Вестник машиностроения. – 2014. – № 9. – С. 35–37.

10. RU 2019662523. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Профилирование дискового инструмента для обработки винтовой поверхности, заданной торцевым сечением / О.В. Захаров, А.А. Королева, А.А. Трошин. – № 2019661517; заявл. 18.09.2019; Опубл. 25.09.2019.

DISC TOOL PROFILE OPTIMIZATION FOR PROCESSING HELICAL SURFACES

Zakharov O.V., D.Sc. (Engineering), Full Professor, e-mail: zov20@mail.ru
Troshin A.A., Post-graduate Student, e-mail: andreyguardian64@gmail.com

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation

Abstract

Helical surfaces are the main working element of end mills, drills, and pump rotors. A mathematical model and a numerical algorithm for profiling a disk tool are considered. The optimization of the tool profile is investigated depending on three parameters of its installation relative to the part: the crossing angle, the shortest center distance and the adjusting axial displacement. The optimization criterion is the smallest profile height with the minimum curvature. The developed algorithm is implemented as MATLAB program. Numerical experiments shown that the tool profile, due to optimization, can change the depth by 2-5 times and the curvature by 2-3 times.

Keywords

helical surface, disk tool, mathematical model, profiling, numerical algorithm, optimization.

УДК 537.533.9

ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ЭЛАСТОМЕРОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ, ДЛЯ 3*D* ПРИНТЕРОВ*

Н.В. ЗЕМЦОВА, аспирант
А.В. ЩЕГОЛЬКОВ, канд. техн. наук, доцент
(ТГТУ, г. Тамбов)

Земцова Н.В. – 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д.106,
Тамбовский государственный технический университет,
e-mail: natasha_paramonova_68@mail.ru

В статье представлены технические подходы, направленные на разработку электронагревателей на основе эластомеров, модифицированных углеродными нанотрубками, для 3*D* принтеров. Разработанный электронагреватель позволяет добиться равномерного распределения температурного поля на подогреваемой поверхности в 3*D* принтере. За счет эффекта саморегулирования электронагреватель способен без статической ошибки поддерживать температуру. Адаптируемая температура электронагревателя задается питающим напряжением. Измерение температурного поля проводили бесконтактным методом с помощью тепловизора *Testo* 875. Вследствие того, что поверхность нагревателя будет контактировать с поверхностью выстраиваемой детали, распределение температурного поля будет адаптироваться к температурному режиму в точке контакта, где находятся элементы детали.

Ключевые слова: углеродные наноструктуры, 3*D* принтер, 3*D* печать, композитный материал, эластомер, электронагреватель

Введение

В настоящее время аддитивная технология, реализуемая с помощью 3*D* принтеров, применяется во многих областях промышленности благодаря универсальности и доступности материалов для изготовления деталей. 3*D* принтеры позволяют создавать технологические объекты с различными размерами и степенью детализации.

3*D* принтеры могут использоваться для изготовления прототипов с минимальными временными затратами и отсутствием размерных ошибок. Также они позволяют экономить не только время, но и обеспечивают быстрый выпуск нестандартных деталей и ремонтных комплектов. Кроме прототипов, 3*D* принтер может создавать и готовые изделия за относительно короткий срок.

Конструкция 3*D* принтера состоит из основных трех частей - компонентов механики и электроники, а также программного обеспечения. Механические составляющие отвечают за опорную структуру и кинематическую связь для передвижения разных частей 3*D* принтера. За счет компонентов электроники происходит движение, а также они обеспечивают механизмы управления для системы. Программное обеспечение позволяет 3*D* принтеру взаимодействовать с пользователем, задающим ему конкретные задачи в соответствии с инструкцией.

Одной из составляющих 3*D* принтера является платформа с подогревом, на которую наносится первый слой расплавленного материала из экструдера через сопло для печати детали. Во время поступления материала на платформу для печати, по краям он охлаждается

* Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках научного проекта по контракту № 15535ГУ / 2020 (доб. 0059250) от 4 июля 2020 г.

быстрее, чем в центре, это приводит к образованию неровностей на поверхности изготавливаемой детали. Для компенсирования данного эффекта температурного градиента применяется подогреваемая поверхность, которая обеспечивает легкое приклеивание к первому слою материала.

На сегодняшний момент проведено немало исследовательских работ по улучшению теплофизических характеристик подогреваемой поверхности для 3*D* принтера.

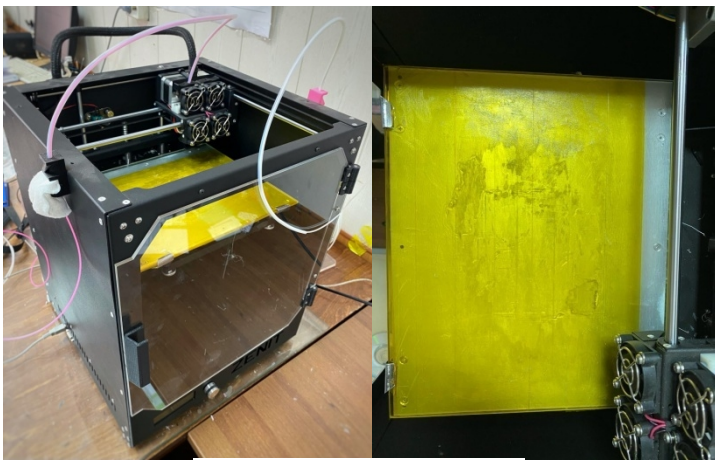
Большинство исследователей рассматривают термический анализ 3*D* печати как фактор процесса, влияющий на производимую деталь. Температурные составляющие являются критическим аспектом, который необходимо изучить, поскольку окончательные механические свойства деталей, напечатанных на 3D принтере, оказались в значительной степени зависимыми от прочности связи между нитями, как следствие этого процесса [1 - 3]. С другой стороны, деформация основы - это дефект, который часто присутствует в деталях, напечатанных в 3*D* принтере. Деформация, наблюдаемая на печатных деталях, вызвана термическими напряжениями, возникающими во время горячей экструзии материала, и, следовательно, является следствием теплового поведения системы [4 - 6]. Хотя стратегия осаждения материала сильно влияет на результаты, более глубокое изучение термического поведения ожижителя независимо от его перемещения является неизбежным шагом для повышения точности размеров и механической прочности деталей [7, 8].

В исследовании [9] авторы установили, что сцепление между слоями может быть улучшено за счет обеспечения адекватного теплового поведения системы, так что свежеэкструдированный материал может химически соединяться с уже нанесенным материалом за счет эффекта роста шейки между нитями и диффузии полимерных цепей.

В статье [4] исследовали напряжение при изгибе и растяжении образцов из *АБС*-пластика и обнаружили, что значения модуля упругости и критической прочности в обоих случаях были самыми низкими для образцов, построенных в плоскости *xoz*. Это было объяснено тем, что они демонстрируют самую слабую прочность сцепления из всех протестированных ориентаций, и, следовательно, термическое поведение разжижителя имеет сильные последствия для мезоструктурированных деталей 3*D*-печати.

Другие авторы показывают корреляцию теплового поведения с остаточным напряжением деталей, напечатанных на 3*D* принтере [3, 10, 11], но в их работах не рассматриваются изменение температуры или механизмы рассеивания тепла в процессе 3*D* печати.

В этом отношении актуальным решением данной задачи является разработка и применение электронагревателя на основе эластомеров, модифицированных углеродными наноструктурами [12], для 3*D* принтеров (рис. 1).



а) б)

Рис. 1. а) 3*D* принтер; б) Платформа с подогревом

В целях получения материалов с улучшенными теплофизическими параметрами могут быть использованы углеродные нанотрубки, синтезированные по *CVD* технологии [13].

Методика и материалы

В качестве полимерной матрицы для нагревателей использовали силиконовый компаунд «Силагерм 8030» (ООО "ЭЛЕМЕНТ 14", Москва, Россия) [12]. Литьевые компаунды состоят из двух компонентов, при этом их перемешивание проводили в соотношении 1/1. В качестве электропроводящего наполнителя использовали МУНТ марки «Таунит-М» (ООО «НаноТехЦентр», Тамбов, Россия). Взвешивание компонентов производили с использованием аналитических весов «*OHAUS Pioneer PA*» (Чанджоу, Китай). Приготовление композитов, модифицированных МУНТ, производили по схеме, представленной на рис. 2.

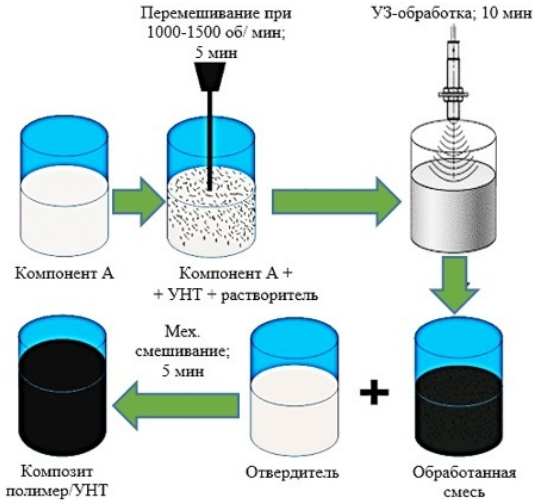


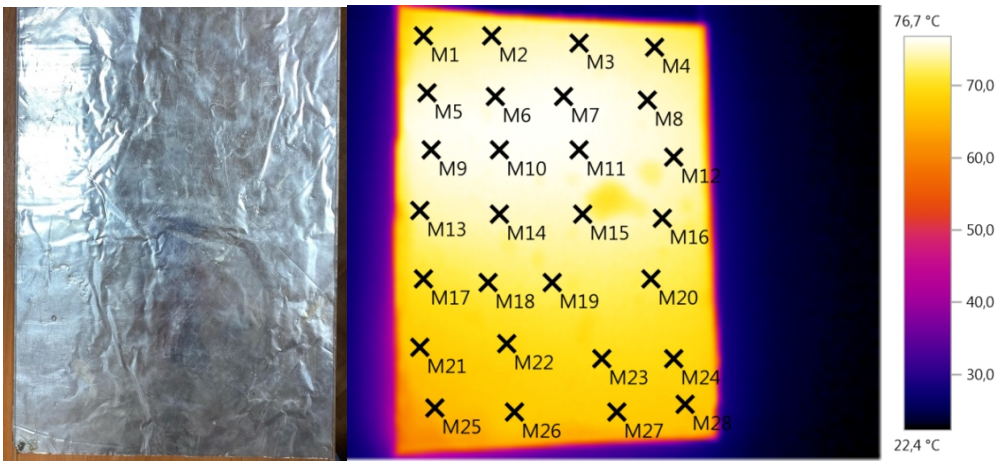
Рис. 2. Схема изготовления электропроводящего силиконового композита, модифицированного МУНТ

В первый компонент силиконового компаунда вводили МУНТ. Для этого в емкость наливали компонент А, затем перемешивали с дисперсной смесью – МУНТ. Полученный состав перемешивали при помощи механической мешалки в течение 5 мин при скорости вращения рабочих элементов в диапазоне 1000-1500 об/мин. Далее полученную смесь обрабатывали с помощью ультразвуковой установки в течение 5 мин. Затем полученный материал помещали в вакуумный шкаф, чтобы убрать воздушные включения, образовавшиеся при смешивании. После вакуумной обработки композит формовали между двумя токоподводящими электродами. Для этого на нижнее стекло с размерами 200×200×5 мм укладывали алюминиевую фольгу толщиной 100 мкм (ООО «Уральская фольга», Михайловск, Россия), на которой формировали композит (активный элемент нагревателя), при этом устанавливали пластмассовые ограничители толщиной 2 мм и размещали второй алюминиевый электрод сверху композита. На второй алюминиевый электрод устанавливали стекло (одинаковое по геометрическим размерам первому), на котором размещали груз массой 10 кг для установления лучшего и плотного контакта и образования более плотных связей между электропроводящими сетями, образованными МУНТ.

Измерение температурного поля проводили бесконтактным методом с помощью тепловизора *Testo* 875.

Результаты и обсуждение

Электронагреватель на основе эластомеров с углеродными нанотрубками для 3*D* принтеров работает при напряжении 220 В переменного электрического тока и имеет удельную мощность равную 2,2 Вт/см^2, т.е. для нагревателя площадью 25 см^2 мощность составила 55 Вт (рис. 3 (а)).



а) б)

Рис. 3. а) Электронагреватель на основе эластомеров, модифицированных углеродными наноструктурами; б) Тепловизионный снимок электронагревателя при переменном напряжении 220 В

Тепловизионный снимок поверхности нагревательного элемента, представлен на рис. 3 (б). Анализ распределения температурного поля нагревателя показывает, что имеются отдельные локации температурного поля, при этом разница между максимальным 76,4 °С и минимальным 65,4 °С значением температуры составила 11 °С. При этом средняя температура на его поверхности составляла около 74 °С. Учитывая, что поверхность нагревателя будет контактировать с поверхностью прототипируемой детали, распределение температурного поля будет адаптироваться под температурный режим в том месте контакта, где расположена деталь с заданной температурой, которая зависит от питающего напряжения [12].

Выводы

В ходе проведенных исследований разработан плоский электронагреватель на основе эластомеров, модифицированных углеродными наноструктурами, который может быть использован в качестве подогреваемой поверхности для 3*D* принтеров.

Применение плоских нагревателей с саморегулированием позволит улучшить температурные режимы подогреваемых поверхностей 3*D* принтеров и повысит качество получаемой детали любой сложности.

Список литературы

1. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments / Q. Sun, G.M. Rizvi, C.T. Bellehumeur, P. Gu // Rapid Prototyping Journal. – 2008. – Vol. 14, iss. 2. – P. 72–80. – DOI: 10.1108/13552540810862028.

2. *Thomas J.P., Rodríguez J.F.* Modeling the fracture strength between fused deposition extruded roads // Proceedings of the 11th International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, USA, Aug. 7–9, 2000. – 2000. – P. 16–23.

3. *Bellini A., Güçeri S.* Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling // Rapid Prototyping Journal. – 2003. Vol. 9, iss. 4. – P. 252–264. – DOI: 10.1108/13552540310489631.

4. Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process / C. Bellehumeur, L. Li, Q. Sun, P. Gu // Journal of Manufacturing Processes. – 2004. – Vol. 6, iss. 2. – P. 170–178. – DOI: 10.1016/S1526-6125(04)70071-7.

5. *Zhang Y., Chou K.* A parametric study of part distortions in fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2008. – Vol. 222, iss. 8. – P. 959–968. – DOI: 10.1243/09544054JEM990.

6. *Wang T.M., Xi J.T., Jin Y.* A model research for prototype warp deformation in the FDM process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2007. – Vol. 33, iss. 11–12. – P. 1087–1096. – DOI: 10.1007/s00170-006-0556-9.

7. *Nickel A.H., Barnett D.M., Prinz F.B.* Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing // Materials Science and Engineering: A. – 2001. – Vol. 317, iss. 1. – P. 59–64. – DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01179-0.

8. *Yardimci M.A., Güçeri S.* Conceptual framework for the thermal process modelling of fused deposition // Rapid Prototyping Journal. – 1996. – Vol. 2, iss. 2. – P. 26–31. – DOI: 10.1108/13552549610128206.

9. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts / M. Domingo-Espin, J.M. Puigoriol-Forcada, A.A. Garcia-Granada, J. Lluma, S. Borros, G. Reyes // Materials and Design. – 2015. – Vol. 83. – P. 670–677. – DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.074.

10. Finite element analysis of the thermal behavior of a RepRap 3D printer liquefier / R. Jerez-Mesa, J.A. Travieso-Rodriguez, X. Corbella, R. Busqué, G. Gomez-Gras // Mechatronics. – 2016. – Vol. 36. – P. 119–126. – DOI: 10.1016/j.mechatronics.2016.04.007.

11. A comparative study of the thermal behavior of three different 3D printer liquefiers / R. Jerez-Mesa, G. Gomez-Gras, J.A. Travieso-Rodriguez, V. Garcia-Plana // Mechatronics. – 2018. – Vol. 56. – P. 297–305. – DOI: 10.1016/j.mechatronics.2017.06.008.

12. *Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V.* Electric heaters based on polymers modified with carbon nanostructures with self-regulation effect: electrical and thermophysical properties: monograph // Moscow: RUSAYNS, 2021. – 144 p. – ISBN 978-5-4365-7513-1.

13. Nanomodified Heat-Accumulating Materials with Controlled Thermophysical Characteristics / A.V. Shchegolkov, S.R. Verma, S. Ramakrishna, P.O. Borovskikh // Advanced Materials and Technologies. – 2019. – No. 2. – P. 025–031. – DOI: 10.17277/amt.2019.02.pp.025-031.

ELECTRIC HEATERS BASED ON ELASTOMERS MODIFIED WITH CARBON NANOSTRUCTURES FOR 3D PRINTERS

Zemtsova N.V., Ph.D. student, e-mail: natasha_paramonova_68@mail.ru
Shchegolkov A.V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: Energynano@yandex.ru

Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation

Abstract

The paper presents technical approaches aimed at the development of electric heaters based on elastomers modified with carbon nanotubes for 3D printers. The developed electric heater allows achieving a uniform distribution of the temperature field on the heated surface in a 3D printer. Due to the self-regulation effect, the electric heater is able to maintain the temperature without a static error. The adaptable temperature of the electric heater is set by the supply voltage. The temperature field is measured by a non-contact method using a Testo 875 thermal imager. Due to the fact that the heater surface will contact the surface of the part being built, the temperature field distribution will adapt to the temperature regime at the contact point where the part elements are located

Keywords
carbon nanostructures, 3D printer, 3D printing, composite material, elastomer, electric heater.

Funding
This work was financially supported by the Fund for the Promotion of Innovations within the framework of a scientific project under contract No. 15535GU / 2020 (ext. 0059250) dated July 4, 2020.

УДК 621.791.927.5 + 620.178.165

ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СПЛАВА СИСТЕМЫ Fe – C – Cr – Ni – Mn – Mo – Ti – Nb В УСЛОВИЯХ ГАЗОАБРАЗИВНОГО ИЗНОСА*

Д.В. ПРИЯТКИН, аспирант
А.А. АРТЕМЬЕВ, канд. техн. наук, доцент
В.И. ЛЫСАК, академик РАН, доктор техн. наук, профессор
А.А. КАРТАШОВА, магистрант
(ВолгГТУ, г. Волгоград)

Прияткин Д.В. – 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28,
Волгоградский государственный технический университет,
e-mail: nanomaterial-vstu@yandex.ru

В работе показана актуальность разработки новых наплавочных сплавов для упрочнения деталей оборудования, работающего в условиях газоабразивного изнашивания. Исследовано влияние содержания углерода в экспериментальном сплаве системы легирования Fe-C-Cr-Ni-Mn-Mo-Ti-Nb на его структурно-фазовый анализ и эксплуатационные свойства. Выполнены методом сканирующей электронной микроскопии металлографические исследования сплава, а также произведена оценка его стойкости к абразивному изнашиванию методом склерометрии. Дана оценка технико-экономической эффективности нового сплава относительно промышленного аналога. Показаны дальнейшие пути повышения износостойкости сплавов данной системы легирования.

Ключевые слова: электродуговая наплавка, наплавленный металл, износостойкость, газоабразивное изнашивание, склерометрия, упрочняющие фазы.

Введение

Выход из строя деталей различного оборудования (например, засыпные устройства доменных печей, лопасти промышленных вентиляторов и дымососов, лопатки газовых турбин, различные узлы газопроводного и газонасосного оборудования и др.) обусловлен воздействием на их рабочие поверхности высокоскоростного газового потока, несущего в себе твердые механические примеси, вызывая тем самым газоабразивный износ [1-3].

Наибольшее влияние на интенсивность процесса изнашивания оказывают: угол атаки газоабразивной струи относительно рабочей поверхности; скорость абразивной частицы к моменту удара; температура газоабразивного потока и изнашиваемой поверхности; соотношение значения твердости поверхности и абразива [4,5]. Известно [2, 3, 5-7], что характер разрушения материала, независимо от температуры, зависит от угла атаки газоабразивного потока: максимальный износ для пластичных материалов находится в диапазоне 20…30°, а для хрупких – около 90°. Это обусловлено тем, что разрушение материала при данном виде изнашивания происходит за счет скольжения и микрорезания при малых углах атаки и прямого внедрения с образованием лунок, микротрещин и сколов твердых фаз при углах атаки близких к 90° [8, 9]. Таким образом, для косвенной оценки стойкости к газоабразивному изнашиванию рабочих поверхностей роторов тягодутьевых

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 20-33-90168, 19-48-340010.

машин, для которых наиболее вероятны углы атаки в диапазоне 25…35°, возможно применение метода склерометрии [10]. При этом алмазный индентор, формирующий царапину на поверхности испытуемого материала, позволяет моделировать режущее воздействие абразивной частицы [11].

Существенно продлить срок службы новых и восстановить изношенные детали оборудования, работающего в условиях газоабразивного изнашивания, возможно наплавкой износостойкими сплавами, позволяющей радикально улучшить эксплуатационные свойства рабочих поверхностей [12]. Однако на основании анализа, проведенного в работе [13], установлено, что промышленные сплавы по причине чрезмерного легирования обладают не только высокой стоимостью, но и пониженными сварочно-технологическими свойствами (склонны к трещинообразованию при наплавке). Следовательно, создание новых экономнолегированных сплавов, обладающих повышенной стойкостью к газоабразивному изнашиванию – актуальная задача.

Цель работы – исследование структурно-фазового состава опытного наплавочного сплава системы Fe-C-Cr-Ni-Mn-Mo-Ti-Nb, а также определение его износостойкости методом склерометрии и оценка технико-экономической эффективности.

Методика экспериментального исследования

Электродуговую наплавку сплава производили на постоянном токе обратной полярности с использованием сварочного автомата ESAB A2S Mini Master. Наплавку в среде аргона выполняли на пластины из стали Ст3сп. В качестве электродной использовали экспериментальные порошковые проволоки диаметром 2,8 мм, обеспечивающие химический состав наплавленного металла (масс.%): Cr 13,5…15 ; Mn 5,7…6,0; Ni 6,0…6,2; Mo 3,0…3,15; Ti 2,0…2,15; Nb 2,0…2,1; остальное Fe. Содержание углерода в сплавах составляло 1,2; 2,1 и 2,8 масс.%.

Химический состав наплавленного металла определяли оптико-эмиссионным анализатором PMI Maser Pro. Твердость металла измеряли по методу Роквелла с использованием твердомера ТН-500. Микроструктуру наплавленного металла изучали с использованием растрового электронного микроскопа Versa 3D. Рентгенофазовый анализ проводили на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance Eco с вертикальным θ-θ гониометром. Фазы идентифицировали с использованием порошковой базы ICDD PDF-2 (2016). Расшифровку фазового состава осуществляли с помощью программного обеспечения к дифрактометру Diffrac.EVA. Для полуколичественного рентгеновского анализа сплавов применяли метод корундовых чисел, в котором в качестве внутреннего стандарта сравнения используется синтетический корунд (α-Al_2O_3). Вычисленные отношения интенсивности пика определяемой фазы $I_к$ интенсивности пика стандарта I_c (корундовые числа k) приводятся в соответствующих карточках базы данных PDF-2. Прогнозирование структурно фазового состава сплавов выполняли по диаграмме Данильченко Б. В. [14].

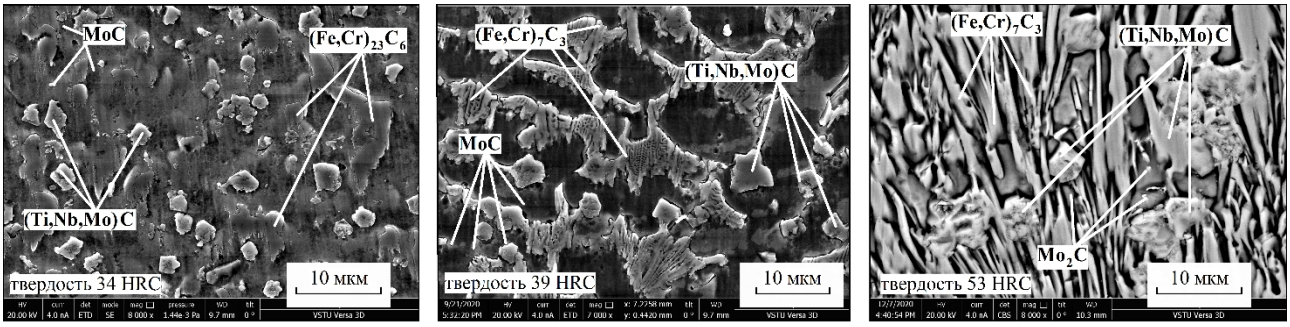
Износостойкость сплавов определяли методом склерометрии, по методике, изложенной в работе [15], с определением показателя износостойкости k. Поверхность наплавленного металла скрайбировали при нормальной температуре алмазным индентером Виккерса при его движении ребром вперед. Для сравнительной оценки разработанных и промышленного сплавов рассчитывали коэффициент технико-экономической эффективности i по формуле:

$$i = \frac{k}{C_m}, \tag{1}$$

где: k – показатель износостойкости; C_m – стоимость наплавочного материала, руб/г.

Результаты и их обсуждение

Выполненные методом электронной микроскопии металлографические исследования наплавленного металла показали (рис. 1), что микроструктура металла, наплавленного экспериментальной порошковой проволокой, с содержанием углерода 1,2 % и 2,1% эвтектическая с равномерно распределенными по всему объему дисперсными упрочняющими фазами, а при повышении содержания углерода до 2,8 % становится заэвтектической.



а *б* *в*

Рис. 1. СЭМ изображение микроструктуры и твердость наплавленных сплавов, содержащих 1,2 (а), 2,1 (б) и 2,8 (в) масс. % углерода

Результаты проведенного рентгенофазового анализа (рис. 2) показали, что твердый раствор карбидной эвтектики состоит из γ-Fe. Упрочняющая твердая фаза представлена в основном карбидами $(Fe,Cr)_xC_y$, комплексными карбидами $(Ti,Nb,Mo)_xC_y$, и монокарбидами Mo_xC. По мере увеличения содержания углерода происходит снижение доли комплексных карбидов $(Ti,Nb,Mo)_xC_y$ и увеличение содержания карбидов $(Fe,Cr)_xC_y$, которые при повышении содержания углерода до 2,1 масс.% изменяют свою стехиометрию. В наплавленном металле с 2,8 масс.% углерода образуются как эвтектические, так и избыточные карбиды $(Fe,Cr)_7C_3$.

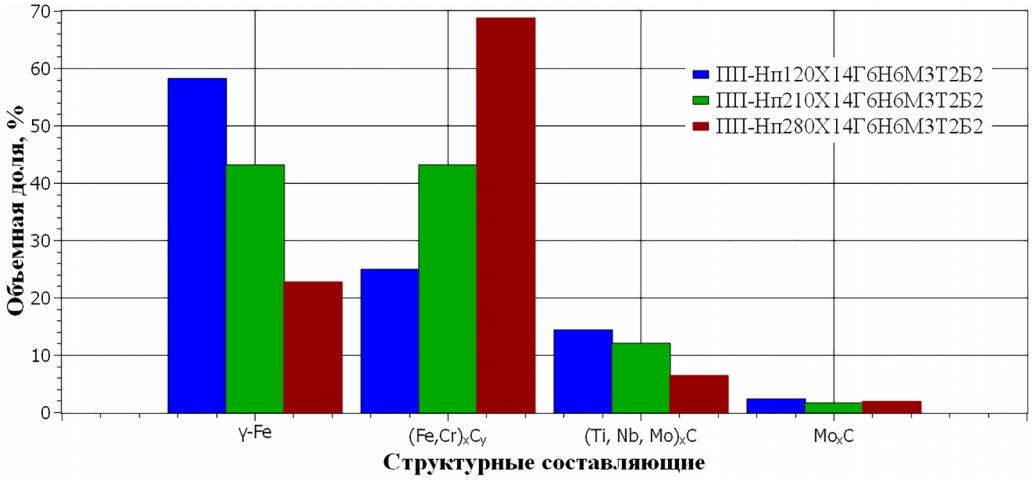


Рис. 2. Содержание структурных составляющих в наплавленном металле

Исследования износостойкости металла, наплавленного опытными и промышленным сплавом, методом склерометрии (рис. 3) показали, что сплав с содержанием 2,8 масс.%

углерода по своей износостойкости сопоставим с высоколегированным промышленным сплавом и двукратно превосходит его по показателю технико-экономической эффективности.

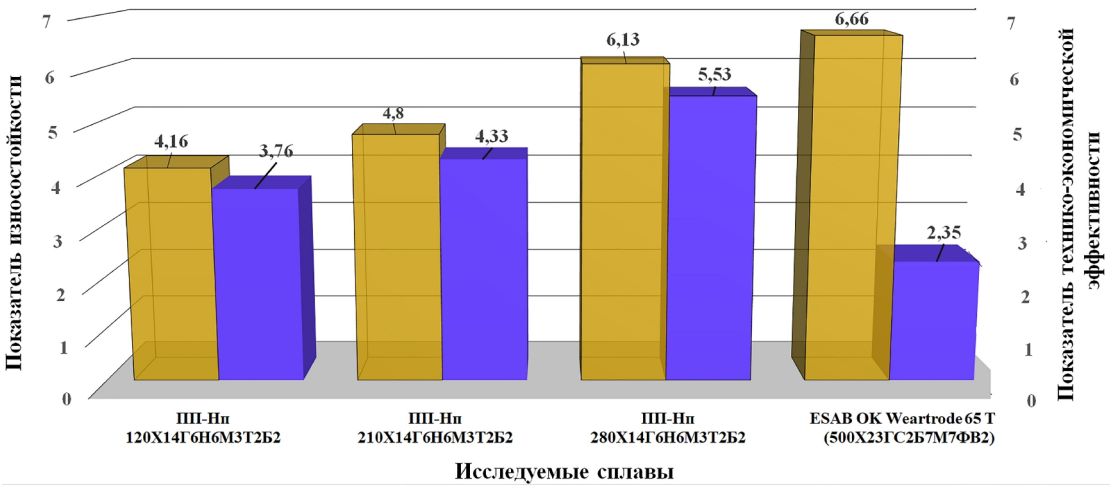


Рис. 3. Сравнение показателей износостойкости и технико-экономической эффективности опытных сплавов с промышленным аналогом

Это достигается формированием в наплавленном металле большой объемной доли железохромистых карбидов, расположенных в прочном и пластичном легированном аустените, упрочненном дисперсными карбидами молибдена, а также высокотвердыми комплексными карбидами $(Ti,Nb,Mo)_xC_y$, которые оказывают сопротивление пластической деформации сплава в процессе микрорезания.

Выводы

Использование износостойких сплавов на основе аустенита, упрочненного карбидной фазой, обеспечивает высокий показатель технико-экономической эффективности их применения. Дальнейшие исследования сплавов данной системы легирования с целью повышения их износостойкости могут быть направлены на выявление оптимальных соотношений между содержанием углерода и карбидообразующих элементов, обеспечивающих увеличение объемной доли высокотвердых комплексных карбидов.

Список литературы

1. Экспериментальная оценка влияния механических свойств контактирующих материалов на газоабразивное изнашивание сталей в системах пескоструйного типа / Б. Крупич, В. Тарасюк, В.Г. Барсуков, А.И. Свириденок // Трение и износ. – 2020. – Т. 41, №. 1. – С. 5–11.

2. *Manish, R.* Elevated temperature erosive wear of metallic materials // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2006. – Vol. 39. – P. 101–124. – DOI: 10.1088/0022-3727/39/6/R01.

3. Current state and development of the research on solid particle erosion and repair of turbomachine blades / G. Wang, X. Jia, J. Li, F. Li, Z. Liu, B. Gong // Re-engineering

Manufacturing for Sustainability. –Singapore: Springer, 2013. – P. 633–638. – DOI: 10.1007/978-981-4451-48-2_103.

4. *Тененбаум М.М.* Сопротивление абразивному изнашиванию. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.

5. *Sapate S.G. Rama Rao A.V.* Effect of material hardness on erosive wear behavior of some weld-deposited alloys // Materials and Manufacturing Processes. – 2002. – Vol. 17, iss. 2. – P. 187–198. – DOI: 10.1081/AMP-120003529.

6. *Jindal C., Sidhu H.S.* Effect of Molybdenum Addition in Hardfacing Layer on Erosion Resistance Behavior of Steel // Proceedings of the International Conference on Research and Innovations in Mechanical Engineering. – New Delhi: Springer, 2014. – P. 337–346. – DOI: 10.1007/978-81-322-1859-3_31.

7. Эрозия / А. Эванс, А. Рафф, С. Видерхорн и др.; под ред. К. Прис. – М.: Мир, 1982. – 464 с.

8. Абразивная износостойкость литых металлов и сплавов / В.М. Колокольцев, Н.М. Мулявко, К.Н. Вдовин, Е.В. Синиикий; под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: МГТУ, 2004. – 228 с.

9. *Stachowiak, G. Batchelor A.W.* Engineering tribology. – 4th edit. – Butterworth-Heinemann, 2013. – 852 p.

10. *Брук А.Д.* Дымососы газоочистных сооружений. – М.: Машиностроение, 1984. – 144 с.

11. Study of wear mechanisms at high temperature scratch testing / M. Varga, S. Leroch, H. Rojacz, M.R. Ripoll // Wear. – 2017. – Vol. 388–389 – P. 112–118. – DOI:10.1016/j.wear.2017.04.027.

12. Структура и свойства композиционных износостойких наплавок на сталь / Е.В. Капралов, Е.А. Будовских, В.Е. Громов, С.В. Райков, Ю.Ф. Иванов. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – 109 с.

13. Анализ наплавочных сплавов для работы в условиях газоабразивного изнашивания при повышенных температурах / Д.В. Прияткин, А.А. Артемьев, В.И. Лысак, П.В. Лойко, // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2020. – №. 10. – С. 49–55. – DOI: 10.35211/1990-5297-2020-10-245-49-55.

14. *Данильченко Б.В.* Выбор износостойкого наплавленного металла для работы в условиях абразивного изнашивания // Сварочное производство. – 1992. – № 5. – С. 31–33.

15. Диагностика износостойкости наплавленного металла методом склерометрии / Г.Н. Соколов, А.А. Артемьев, И.В. Зорин, В.И. Лысак, В.Б. Литвиненко-Арьков // Сварка и диагностика. – 2012. – № 2. – С. 34–39.

THE ASSESSMENT OF WEAR RESISTANCE OF Fe - C - Cr - Ni - Mn - Mo - Ti – Nb ALLOYING SYSTEM UNDER ON THE GAS ABRASIVE WEAR

Priyatkin D.V., Ph.D. student, e-mail: nanomaterial-vstu@yandex.ru
Artem'ev A.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: nanomaterial-vstu@yandex.ru
Lysak V.I., Academician of the Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: nanomaterial-vstu@yandex.ru
Kartashova A.A., Graduate students, e-mail: nanomaterial-vstu@yandex.ru

Volgograd State Technical University, 28 Lenin Avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation

Abstract

The paper deals with relevance of the development of new wear-resistant alloys for increasing the service life of equipment which operates under conditions of gas abrasive wear. The influence of the carbon content in an experimental alloy of the alloying system Fe-C-Cr-Ni-Mn-Mo-Ti-Nb on its structural-phase analysis and operational properties is investigated. The experimental results are analyzed by scanning electron microscopy, X-ray diffraction analyzer, hardness tester also the wear abrasion resistance properties are obtained by means of micro indenter scratching the surface under investigation. Moreover, in the paper an assessment of the technical and economic efficiency of the new alloy is given relative to the industrial analogue. The recommendations of the further wear resistance increasing of this alloying system are shown.

Keywords
Arc surfacing, weld metal, wear resistance, gas abrasive wear, sclerometry, precipitate particles

Funding
Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number № 20-33-90168, 19-48-340010

УДК 621.9:669-179

ПРИМЕНЕНИЕ РЕАКЦИОННОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ ОБЪЕМНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Е.П. ШАЛУНОВ, канд. техн. наук, профессор
В.М. СМИРНОВ, канд. физ.- мат. наук, доцент
А.С. ЯНЮШКИН, доктор техн. наук, профессор
Ю.О. ВЛАДИМИРОВА, аспирант
П.Г. ДАНИЛОВ, аспирант
(ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары)

Владимирова Ю.О. – 428015, Чувашская Республика, г. Чебоксары, пр-т Московский, д. 15, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
e-mail: yulivladimirova@mail.ru

В работе приводятся результаты использования метода реакционного механического легирования в аттриторах при получении и дальнейшем промышленном производстве объемных наноструктурных материалов на основе металлических порошков, обладающих высокими прочностными свойствами при повышенных температурах и хорошей износостойкостью. Описываются особенности структуры и их влияние на свойства этих материалов. Приводится информация о производстве указанных материалов и высокоресурсных изделиях из них для различных областей современной и перспективной техники.

Ключевые слова: реакционное механическое легирование, аттритор, механохимический синтез, порошковая металлургия, компактирование, экструзия, температура рекристаллизации, износостойкость.

Введение

Доказано, что конструкционные материалы, имея структурные составляющие на уровне 100 нм и меньше, проявляют, если не чрезвычайные, то более высокие, чем обычные материалы прочностные свойства [1-3].

Поэтому разработчики конструкционных материалов постоянно ведут поиск таких методов получения и/или обработки материалов [4-7], которые обеспечили бы им структурные составляющие вышеуказанного уровня. При этом, чаще всего, используются «экзотические» способы, которые или очень далеки от воспроизведения в производственных условиях, или весьма дороги, или обладают обоими этими недостатками.

Тем не менее, на настоящий момент, все-таки, имеется несколько способов получения наноструктурных конструкционных материалов, которые заслуживают внимания не только самих разработчиков таких материалов, но и промышленности [8-10]. Речь, прежде всего, может идти о так называемом методе «интенсивной пластической деформации» (ИПД) и, в частности, о равноканальном угловом прессовании [3], которое по своей сути является более напряженной для обрабатываемого материала (и значительно более дорогой и менее

производительной) разновидностью освоенного за рубежом Conform™ – процесса [11]. Метод ИПД действительно обеспечивает обрабатываемым с его использованием материалам субзеренную структуру со средним размером субзерен от 100 нм до 500 нм, благодаря чему удается существенно повысить прочностные характеристики этих материалов [2, 3]. Однако, при повышенных температурах происходит укрупнение субзеренной структуры материалов и потеря ими прочностных свойств.

Очевидно, что для предотвращения роста зерен необходимо создать препятствия на их границах, в качестве которых могут выступать мелкодисперсные стабильные включения, не растворимые в матрице материала. Исходя из теорий взаимодействия с такими частицами движущихся дислокаций [12], можно установить, что максимальный эффект упрочнения материала достигается при среднем размере этих частиц от 10 нм до 50 нм.

Современные технологические методы позволяют получать такие частицы оксидов, карбидов, нитридов и пр., но их порошки, во-первых, весьма дороги, во-вторых, пирофорны, в-третьих, не безопасны для здоровья и, наконец, они склонны к комкованию. Поэтому обычным смешиванием порошка матричного материала с порошком (частицами) упрочняющей фазы не всегда удается достичь равномерного их распределения в матрице. При неравномерном распределении наночастиц в матрице, допускающем прямое их контактирование, наблюдается их рост. Возникающие при термообработке конгломераты наночастиц в процессе консолидации порошковой смеси (например, при горячей экструзии) спекаются в более крупные поликристаллические образования, а при высокотемпературном отжиге материала в этих частицах происходит рекристаллизация [13].

Таким образом, получение материалов с субзеренной структурой со средним размером субзерен 100 нм и менее и с наличием по их границам динамически термостабильных частиц со средним размером 10...50 нм и равномерно расположенных друг от друга на расстоянии 100...500 нм [14], является сложной технологической задачей.

Тем не менее, ее решение возможно при применении в качестве основы технологии получения материалов с указанной структурой так называемого метода «реакционного механического легирования» (РМЛ) [15], успешно применяемого учеными и специалистами Чувашского государственного университета с конца 80-х годов прошлого столетия для разработки и производства целого ряда жаропрочных и износостойких объемных наноструктурных материалов с дисперсно-упрочненной структурой на основе порошков различных металлов – алюминия, меди, железа, титана и др.

Методика экспериментального исследования

Метод реакционного механического легирования осуществляется в высокоэнергетических шаровых мельницах-аттриторах [15, 16], разработанных в Чувашском госуниверситете. На рис. 1 приведены промышленные аттриторы с емкостью рабочей камеры 15 л. При этом, обработке в аттриторах подвергается смесь порошков матричного материала (например, Cu), оксидо- и/или карбидообразующего элемента(-ов) (например, Al, Ti, Cr, V) и углерода [17, 18] Для получения медного материала с оксидными наночастицами (например, Al_2O_3, TiO_2, Cr_2O_3, VO_2), образующимися в результате механохимического

синтеза при реакционном механическом легировании, обработку порошковой смеси в аттриторе ведут в среде воздуха и/или с добавкой порошка окиси меди [19].

Рис. 1. Участок реакционного механического легирования с 15-литровыми аттриторами

В том случае, когда в качестве упрочняющих частиц требуются карбиды (например, TiC, Cr_3C_2, VC), а сами материалы должны обладать высокой электро- и теплопроводностью, реакционное механическое легирование осуществляется в среде аргона или в вакууме. При прокачке рабочей камеры аттритора во время реакционного механического легирования азотом можно получить упрочняющие частицы в виде нитридов (например, AlN).

Полученный в аттриторе продукт в виде гранул или, наоборот, очень мелкодисперсного порошка подвергается холодному компактированию в брикеты при давлении, как правило, 600 МПа, для чего, чаще всего, используются вертикальные гидравлические прессы с максимальным усилием прессования от 60 т.с. до 2500 т.с. При этом, благодаря специальной пресс-оснастке, при компактировании реализуется схема двустороннего прессования, обеспечивающая более равномерное распределение плотности по объему брикета.

Технологический передел полученных брикетов в полуфабрикаты в виде прутков круглого и прямоугольного сечений, размеры которых определяются формой и размерами изготавливаемых из них конкретных деталей, заключается в нагреве брикетов в технологических капсулах, помещенных в электропечь и содержащих углекислый газ, и последующей их экструзия в полуфабрикаты с использованием подогретого контейнера гидропресса.

Конкретные режимы проведения операций технологического процесса зависят как от химического состава получаемых материалов, так и от формы, и размеров изготавливаемых из них полуфабрикатов.

Используя метод реакционного механического легирования в совокупности с технологиями порошковой и гранульной металлургии, а также горячего прессования (экструзии), удалось получить ряд объемных наноструктурных материалов на основе порошкового алюминия систем Al-C-O, Al-C-Zr-O, Al-Mg-C-O, Al-Mg-Li-C-O и др. Материал системы Al-C-O с 4% мас. углерода, способный заменить некоторые стали и титановые сплавы при температуре эксплуатации до 350°C, был паспортизирован Всесоюзным институтом авиационных материалов.

Так же создан целый ряд высокоэффективных объемных наноструктурных материалов на основе порошковой меди систем Cu-Al-C-O, Cu-Ti-C-O, Cu-Cr-C-O, Cu-Fe-C-O, Cu-Al-Ti-C-O, Cu-Al-Cr-C-O и др. для различных областей применения, выпуск которых под товарным знаком ДИСКОМ® (для экспортных поставок - DISCOM®) был освоен на

созданных по проектам ученых и специалистов Чувашского госуниверситета производствах в городах Йошкар-Ола, Пермь, Чебоксары и Верхняя Пышма Свердловской области. Эти материалы изготавливаются, преимущественно, в виде горячепрессованных полуфабрикатов с различным профилем поперечного сечения (рис. 2).

Рис. 2. Типичные представители горячепрессованных полуфабрикатов из медных наноструктурных материалов ДИСКОМ®

Из этих полуфабрикатов разными методами механической обработки изготавливаются высокоресурсные готовые изделия различного назначения, среди которых в первую очередь следует отметить следующие [20, 21]:

- сварочный инструмент (электроды контактной варки, электрододержатели, токоподводящие наконечники и переходники к ним для автоматической, полуавтоматической и ручной электросварки проволочным электродом в среде защитных газов, сопла пистолетов плазменной резки и пр.);
- электрические контакты (разрывные и скользящие, в частности, токосъемные элементы токоприемников скоростных и тяжело нагруженных электропоездов, а также токосъемные элементы токоприемников трамваев, троллейбусов, мостовых и башенных кранов);
- подшипники скольжения (цельные подшипники скольжения в виде втулок для газораспределительного механизма, масляных насосов, верхних головок шатунов, направляющие втулки и седла клапанов форсированных двигателей внутреннего сгорания и составные подшипники скольжения в виде многослойных вкладышей коленчатого вала таких двигателей, а также вала стояковых электродвигателей большой мощности и турбин);
- быстро изнашиваемые детали металлургического и литейного оборудования (трубчатые кристаллизаторы, поршни машин литья под давлением, направляющие втулки литейных машин, прессов и пр.).

На настоящий момент произведено более 3000 тонн горячеэкструдированных полуфабрикатов указанных материалов, из которых изготовлено почти 35 млн. штук различных высокоресурсных изделий для более чем 500 предприятий России и за рубежом (США, Германия, Италия, Австрия, Китай, Казахстан и др.).

Результаты и обсуждение

Таким образом, в результате проведения реакционного механического легирования исходной порошковой смеси и дальнейшего термодеформационного передела, полученного в

аттриторе продукта, при соответствующем исходном составе порошковой смеси, соответствующей среде в рабочей камере аттритора и тщательно подобранных режимах этого процесса в матричном материале образуются упрочняющие частицы оксидов, карбидов, нитридов, боридов нанодисперсного уровня, в частности, 20 ... 40 нм (рис. 3). Кроме этого, всего за один технологический цикл обработки порошковой смеси в аттриторе длительностью не более 60 мин удается получить в горячепрессованном материале субзеренную структуру (рис. 4) со средним размером субзерен от 80 нм до 120 нм.

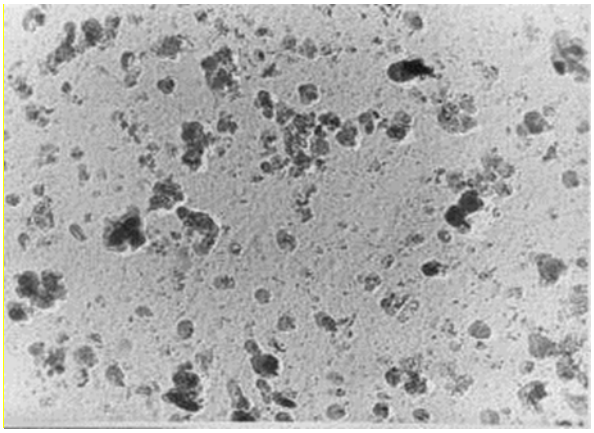


Рис. 3. Типичная углеродная реплика объемного наноструктурного материала системы Cu-Al–C–O

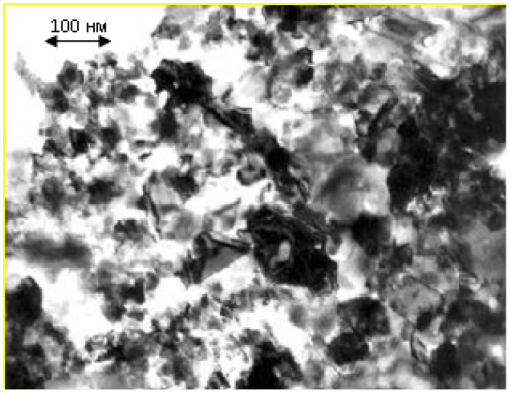


Рис.4. Типичное субзеренное строение объемного наноструктурного материала системы Cu-Al–C–O

Следует отметить, что при этом плотность дислокаций увеличивается с $1 \cdot 10^9$ см$^{-2}$ (исходный порошок меди ПМС-1) до $4{,}5 \cdot 10^{11}$см$^{-2}$ (порошок ПМС-1 после его обработки в аттриторе в течение 30 мин) и $2{,}5 \cdot 10^{10}$см$^{-2}$ (горячепрессованный пруток из порошка ПМС-1, обработанного в аттриторе).

Проведенные исследования показали, что вклад субзеренного упрочнения в суммарное упрочнение вышеуказанных материалов составляет не более 20%, в то время как механосинтезированным частицам принадлежит доминирующая роль в суммарном упрочнении – 60 ... 70%. Упрочнение же матрицы за счет α-твердого раствора, например, алюминия в меди незначительно – 3...7%. Вклад дислокационного упрочнения в суммарное упрочнение составляет 8-10%.

Указанные материалы, благодаря своей субзеренной структуре и наличию матричном материале динамически термостабильных частиц упрочняющих фаз (оксидов, карбидов), обладают чрезвычайно высокой температурой рекристаллизации (рис. 5), которая может достигать 0,92 от температуры плавления меди, а также высокими прочностными свойствами.

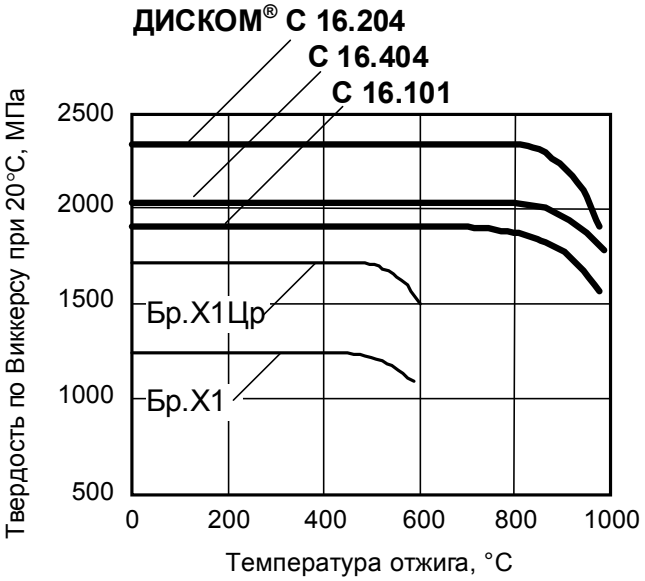


Рис.5. Твердость по Виккерсу при 20°С в зависимости от температуры отжига в течение 1 ч (стандартные материалы дополнительно деформированы на 40%)

Благодаря такой структуре, выполняется и правило Шарпи, согласно которому высокие антифрикционные и износостойкие свойства материала обеспечиваются, когда более твердые структурные составляющие должны залегать в виде изолированных друг от друга включений, а наиболее вязкие – образовывать сплошную матрицу. В связи с этим, большинство указанных выше материалов имеют высокую износостойкость, благодаря чему они успешно используются в качестве антифрикционных материалов, в том числе при повышенных температурах эксплуатации.

Выводы

Выполненный комплекс теоретических и экспериментальных исследований по созданию объемных наноструктурных материалов на основе металлических порошков с использованием метода реакционного механического легирования позволил результаты этих исследований трансформировать в реально действующие производства, продукцией которых являются высокоресурсные изделия современной и перспективной техники.

Список литературы

1. *Пул Ч., Оуэнс Ф.* Нанотехнологии; пер. с англ. – М.: Техносфера,2004. – 250 с.

2. *Старостин В.В.* Материалы и методы нанотехнологии: учебное пособие. – М.: Бином, 2008. – 431 с.

3. *Валиев Р.З., Александров И.В.* Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272с.

4. *Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А.* Перспективы использования композиционных материалов в нефтегазовой промышленности // Проблемы инновационного развития нефтегазовой индустрии: сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. - Алматы: КБТУ, 2012. Т.1. – С.351-356.

5. *Волков С.Д., Ставров В.П.* Статистическая механика композитных материалов. –

Минск: Изд-во БГУ, 1978. – 206 с.

6. *Болотин В.В.* Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение. 1984. – 312 с.

7. *Бабушкин А.В., Лобанов Д.С.* Экспериментальное исследование и моделирование свойств композиционных материалов в условиях сложных термомеханических воздействий // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. - Н.Новгород. - 2011. - № 4(5). - С. 1984-1986.

8. *Кульков С.Н., Буякова С.П.* Наноматериалы: порошки и спеченные композиты: учебное пособие. – Томск: Томск. политехн. ун-т, 2011. – 100 с.

9. *Воронов В.К., Ким Д.Ч, Янюшкин А.С.* Свойства и применение наноматериалов: учебное пособие; 5-е изд., перераб. и доп. - Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2018. - 324 с.

10. *Абрамян А.А., Балабанов В.И.* Основы прикладной нанотехнологии. – М.: Магистр – Пресс, 2007. – 208 с.

11. *Kafeel Khawaja*. Development of Conform™ extrusion gap sending and control technology // Aluminium World. – 2002. – vol. 1. – pp. 110-112.

12. *Гессингер Г.Х.* Порошковая металлургия жаропрочных сплавов: Пер. с англ. – Челябинск: Металлургия, Челябинское отд., 1988. – 320 с.

13. Механическое легирование // Ю.В. Кузьмич, И.Г. Колесникова, В.И. Серба, Б.М. Фрейдин. - Апатиты: Изд-во Кольского научн. центра РАН, 2004.- 179 с.

14. *Портной К.И., Бабич Б.Н.* Достижения в области создания дисперсно-упрочненных сплавов в СССР // Порошковая металлургия – 77. – Киев: Наукова думка, 1977. – С. 166 – 180.

15. Einfluess der Herstellungsbedingungen auf die Eigenschaften von Al-Al_4C_3-Werkstoffen / E. *Schalunov, M. Slesar, M. Besterci u.a.* // Metall. – 1986. – Nr.6. – p.601-606.

16. *Шалунов Е.П., Данилов Н.В., Липатов Я.М.* Разработка научных основ, технологии и оборудования для получения и обработки полуфабрикатов из дисперсно-упрочненных композиционных материалов // Охрана труда и прогрессивные технологические процессы в литейном производстве, порошковой металлургии и машиностроении: тез. межреспубл. научн.-практ. конф. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1990. - С. 287-289.

17. *Шалунов Е.П.. Смирнов В.М., Матросов А.Л.* Реакционное механическое легирование порошковой меди кислородом и углеродом // Вестник Чувашского университета. - 2012. - № 3. - С. 252-259.

18. Углеродные материалы в литейном производстве и порошковой металлургии / И.Е. Илларионов, О.В. Кузьмина, Е.П. Шалунов, Д.Л. Кузьмин // Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии: материалы II-ой Республ. научн.-практ. конф. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2016. – С 90-97.

19. Пат. РФ 2195511. МПК С22С9/01, С22С1/10. Дисперсно-упрочненный композиционный материал для электроконтактных деталей / Е.П. Шалунов, А.Л. Матросов, Я.М. Липатов, В.Я. Берент. Заявл.: 05.02.2001. Заявитель: ООО НТФ «Техма». Опубл.: 27.12.2002.

20. *Dovydenkov V.A., Shalunov E.P.* Experience of Production and use of Precipitation Strengthened Copper - Based Materials made Mechanical Alloying // Powder Metallurgy. - 1998.- Vol. l. -P. 372-377.

21. Разработка технологии изготовления биметаллических разверток вкладышей тяжелонагруженных подшипников скольжения / Ю.О. Владимирова, Е.П. Шалунов, В.М. Смирнов В.М [и др.] // Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии: материалы II-ой Республ. научн.-практ. конф. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2016. - С. 166-173.

APPLICATION OF REACTIONARY MECHANICAL ALLOYING FOR OBTAINING AND PRODUCING OF HEAT RESISTANT VOLUMETRIC NANOSTRUCTURAL MATERIALS BASED ON METAL POWDERS

Shalunov E.P., Ph.D. (Engineering), Professor, e-mail: shalunov2003@mail.ru
Smirnov V.M., Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, e-mail: vms53@inbox.ru
Yanyushkin A.S. D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: yanyushkinas@mail.ru,
Vladimirova Yu.O. Post-graduate Student, e-mail: yulivladimirova@mail.ru,
Danilov P.G. Post-graduate Student, e-mail: danilov211@mail.ru.

I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

Abstract

The paper presents the results of using the method of reactionary mechanical alloying in attritors in the preparation and further industrial production of bulk nanostructured materials based on metal powders with high strength properties at elevated temperatures and good wear resistance. The features of the structure and its influence on the properties of these materials are described. Information on the production of these materials and high-resource products from them for various fields of technology is provided.

Keywords
reactionary mechanical alloying, attritor, mechanochemical synthesis, powder metallurgy, compaction, extrusion, recrystallization temperature, wear resistance.

УДК 621.762:669.2

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ Cu-Ti-C-O

В.М. СМИРНОВ, канд. физ.-мат. наук, доцент
Е.П. ШАЛУНОВ, канд. техн. наук, профессор
Д.В. ЛОБАНОВ, доктор техн. наук, профессор
(ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары)

Смирнов В.М. – 428015, Чувашская Республика, г. Чебоксары, пр-т Московский, д. 15, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
e-mail: vms53@inbox.ru

Представлены результаты исследования структуры и свойств дисперсно-упрочненных композиционных материалов системы Cu-Ti-C-O, полученных методом реакционного механического легирования порошковой меди с титаном и углеродом в воздухе рабочей камеры аттритора. Показано, что исследуемые материалы при эквиатомном соотношении количества введенного углерода и титана имеет неоднородную микроструктуру, состоящую из светлых и темных областей, существенно различающихся по микротвердости. Темные участки менее упрочнены. При увеличении содержания введенного порошка титана по отношению к углероду темные участки исчезают. На основе атомно-силовой микроскопии и измерения периода решетки показано, что медная матрица исследуемых композиционных материалов в виде твердого раствора с содержанием титана не более 0,2 % имеет нанокристаллическое строение. Методом рентгенофазового анализа анодного осадка исследуемых материалов установлено, что основными упрочняющими фазами являются наночастицы карбида титана. Кроме того, в исследованных материалах наблюдаются следы присутствия свободного титана в виде его α-модификации и интерметаллида Cu_3Ti.

Ключевые слова: Аттритор, реакционное механическое легирование, гранулы, дисперсно-упрочненный композиционный материал, микроструктура, параметр решетки, рентгенофазовый анализ, дисперсные фазы.

Введение

В качестве материалов для изготовления электродов для контактной сварки коррозионностойких сталей и жаропрочных сплавов, а также армирующих сеток и решеток железобетонных изделий используются, как правило, дисперсионно-твердеющие никель-бериллиевые бронзы БрБНТ [1-3]. Они обладают высокими значениями твердости (до 240 *HB*) и жаропрочности при достаточно хорошей электропроводности (до 45 % от электропроводности меди). Однако, высокая токсичность бериллия обусловливает введение ограничений во многих странах, в том числе в России на использование бериллиевых бронз [4]. В соответствии с ГОСТ 28873-90 сплавы меди с бериллием не рекомендуется применять во вновь создаваемой или модернизируемой технике.

Возможными материалами для замены бериллийсодержащей бронзы для изготовления электродов для контактной сварки являются дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе порошковой меди, получаемые методом реакционного механического легирования в высокоэнергтических шаровых мельницах – аттриторах [5-7]. Обычно, в качестве легирующих добавок для получения дисперсных, упрочняющих фаз используют металлические порошки, способные образовывать в медной

матрице устойчивые, с высокой температурой плавления оксиды или карбиды [8, 9]. По уровню физико-механических свойств наиболее подходящими для изготовления электродов для контактной сварки, взамен бериллийсодержащей бронзы, являются дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе порошковой меди, легированные титаном и углеродом путем размола порошковой шихты в аттриторе при доступе воздуха [10-13]. Хотя электроды из этих материалов при производственных испытаниях по контактной сварке коррозионностойких сталей и жаропрочных сплавов, а также армирующих сеток и решеток железобетонных изделий показали значительный ресурс [14], дальнейшее их широкое внедрение сдерживается недостаточностью данных о взаимосвязи химического состава шихты со структурой и свойствами указанных материалов, что не позволяет оптимизировать эти параметры и, тем самым, еще более повысить ресурс сварочного инструмента из них.

Поэтому основной целью настоящей работы является исследование структуры и фазового состава дисперсно-упрочненных композиционных материалов системы Cu-Ti-C-O.

Материалы и методика исследования

Эксперименты проводились с использованием композиций из стандартных порошков меди ПМС-1, титана ПТМ-А и графита ГК-3, которые обрабатывались в высокоэнергетическом аттриторе в среде воздуха. Составы исследуемых композиций представлены в табл.

Таблица

Химический состав шихты, твердость и электропроводность исследуемых композиционных материалов на основе меди

Условное обозначение материала	Содержание легирующих добавок в шихте, % масс.		Свойства прутков*	
	Ti	C (графит)	Твердость, *HV*, МПа	Электропроводность относительно чистой меди, %
МТГ100-25	1,0	0,25	2098/1821	57/46
МТГ200-25	2,0	0,25	2373/2427	49/48
МТГ300-25	3,0	0,25	2273/2550	50/47
МТГ300-45	3,0	0,45	2479/2456	46/45
МТГ300-100	3,0	1,00	2327/2216	57/62
Примечание: * данные в знаменателе относятся к пруткам, экструдированным при 850°С.				

Полученные гранулы подвергались холодному компактированию в брикеты, которые затем нагревались до 750°С (или 850°С) и с этих температур экструдировались в прутки ∅13 мм.

Структуру полученных материалов исследовали на оптическом микроскопе Альтами Мет и на атомно-силовом сканирующем зондовом микроскопе Next фирмы NT-MDT. Шлифы для исследований на атомно-силовом микроскопе готовили электрополировкой в электролите следующего состава: 1150 г/л H_3PO_4, 95 мл/л бутилового спирта и H_2O.

Фазовый состав упрочняющих частиц (дисперсоидов) в матрице материала определяли путем электролитического выделения и последующего рентгенофазового

анализа анодного осадка на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М. В качестве электролита использовали водный раствор, включающий 3%масс. $CuSO_4$, 3%масс. H_3PO_4, 3%масс. цитрата аммония.

Период решетки медной матрицы определяли по центру тяжести дифракционной линии от плоскости (422), используя рентгеновскую трубку с медным анодом ($\lambda_{K\alpha ср.}$=0,154178 нм).

Результаты и обсуждение

Как видно из табл., твердость ряда исследуемых композиционных материалов достигает значений твердости бериллийсодержащих бронз. При этом значение электропроводности исследуемых композиционных материалов выше электропроводности бериллийсодержащих бронз. Полученные данные подтверждают, что композиционные материалы системы Cu-Ti-C-O могут быть перспективными при решении задач замены бериллиевых бронз и требуют всестороннего изучения.

Как показывают исследования, структура композиционных материалов (рис.1) системы Cu-Ti-C-O зависит от количества вводимого в шихту титана и количественного соотношения добавок титана и углерода.

При эквиатомном соотношении легирующих добавок титана и углерода, в материале МТГ100-25 наблюдается неоднородная структура, состоящая из светлой (однофазной) и темной (двухфазной) областей (рис.1, *а*). Измерение микротвердости данных структур показало, что светлая составляющая имеет микротвердость, в 1,5…2 раза выше микротвердости темной области. Увеличение содержания титана в шихте при неизменном количестве вводимого углерода (0,25 % масс.) обеспечивает образование в результате реакционного размола и горячей экструзии более однородной структуры в исследуемых композиционных материалах системы Cu-Ti-C-O. При этом наиболее однородная структура наблюдается в материале МТГ300-25 (рис.1, *б*). Во всех исследуемых материалах имеются включения голубого цвета с размерами, достигающими до 50 мкм. С увеличением количества вводимого титана количество голубых включений становится больше.

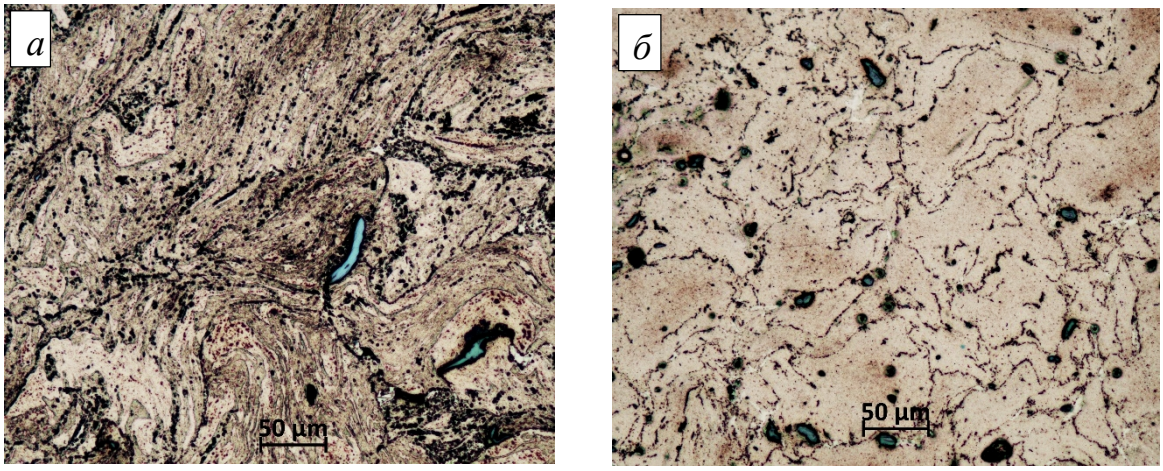


Рис.1. Микроструктура исследуемых композиционных материалов:
а – МТГ100-25; *б* – МТГ300-25. Травление насыщенным аммиаком.

Результаты измерения периода решетки меди подтверждают ограниченный характер растворимости титана в меди [15]. Растворимость титана в меди, рассчитанная по правилу Вегарда, в исследуемых композиционных материалах не превышает 0,2 % масс. Остальная

часть титана в процессе реакционного размола порошковой смеси в аттриторе расходуется в основном на образование дисперсных частиц карбида титана.

Действительно, как показывают результаты рентгенофазового анализа анодных осадков исследуемых материалов, основными дисперсными, упрочняющими частицами являются частицы карбида титана TiC. На дифрактограммах анодных осадков, выделенных из исследуемых композиционных материалов, присутствуют все основные дифракционные линии карбида титана. Кроме того, на дифрактограммах присутствуют самые сильные линии от соединения меди с титаном Cu_3Ti и до конца не растворившихся частиц α - модификации титана.

Исследования методом атомно-силовой микроскопии на сканирующем зондовом микроскопе Next фирмы NT-MTD показывают (рис. 2), что в процессе реакционного механического легирования порошковой меди титаном и углеродом в композиционных материалах формируется нанокристаллическая матрица на основе твердого раствора Cu (Ti) с размерами зерна (кристаллитов) 30…100 нм.

На изображении структуры также видны темные частицы, по-видимому, дисперсной фазы (дисперсоидов), которые имеют размеры 10…60 нм. Небольшая часть из них располагаются внутри зерен, а большинство – по границам зерен. Кроме того, на изображении структуры наблюдаются выделения второй фазы по границам зерен, протяженность которых достигает более 200 нм.

Приведенные здесь параметры тонкой структуры исследуемых материалов позволяют отнести их к объемным металломатричным наноструктурным материалам [16-19].

Анализ табл. показывает, что наибольшую твердость (2456…2479 МПа) имеет материал с условным обозначением МТГ300-45, но он при этом обладает и самой низкой из всех исследуемых материалов электропроводностью, составляющей 45…46 % от электропроводности меди. В то же время имеется медный материал МТГ300-100, содержащий 3% масс. титана и 1 % углерода, у которого при самой высокой электропроводности (57…62%) имеется так же высокая твердость по Виккерсу - 2216…2327 МПа.

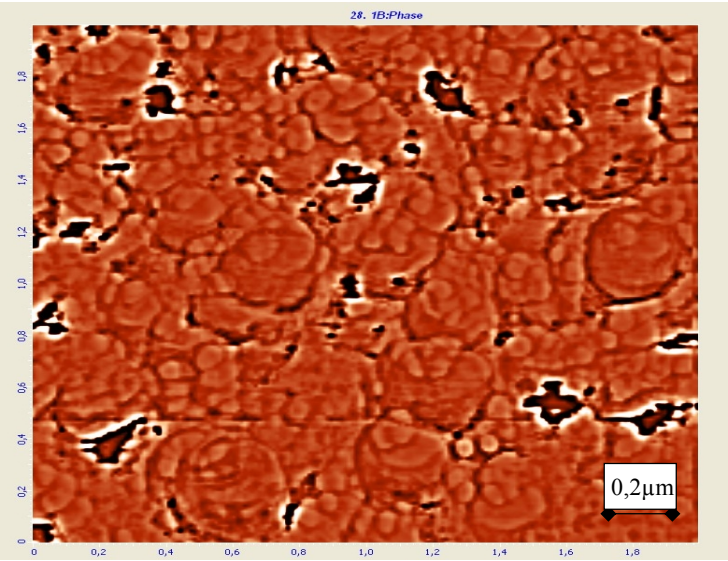


Рис.2. Структура поверхности поперечного шлифа композиционного материала МТГ200-25 (атомно-силовая микроскопия, режим – фаза)

Самое высокое среди всех исследуемых здесь материалов значение углерода (1 % масс.), содержащегося в этом материале, не повысило ему твердость по сравнению с

материалом с таким же содержанием титана, но с более чем в два раза меньшим значением содержания углерода (0,45 % масс.).Это может свидетельствовать о том, что для данной исследуемой системы содержание углерода, сверх этого значения не обеспечивает образования с титаном дополнительного количества карбидной фазы [11, 12], а этот «лишний» углерод расходуется на восстановление меди из ее окислов, повышая, тем самым, электропроводность материала.

Выводы

1. Проведенные исследования показали, что реакционное механическое легирование порошковой меди титаном и углеродом на воздухе обеспечивает получение дисперсно-упрочнённых композиционных материалов системы Cu-Ti-C-O, которые по твердости и электропроводности могут обеспечить замену берилийсодержащих бронз для изготовления электродов контактной сварки.

2. Комплексными исследованиями показано, что матрица исследуемых композиционных материалов в виде твердого раствора Cu (Ti) имеет нанокристаллическое строение, а основными дисперсными упрочняющими частицами являются наночастицы карбида титана TiC.

3. В структуре исследуемых материалов также наблюдаются крупные включения не растворившихся до конца частиц титана и выделения соединений титана с медью, что показывает на необходимость дальнейшей работы по оптимизации технологических режимов получения материалов системы Cu-Ti-C-O.

Список литературы

1. *Кучук-Яценко С.И.* Контактная стыковая сварка оплавлением. – Киев: Наукова думка, 1992. – 236 с.

2. *Банов М.Д.* Технология и оборудование контактной сварки: учебник. – М.: Академия, 2008. – 224 с.

3. *Бердичевский А.В., Редькин Е.Н., Эллик К.А.* Многоэлектродные машины для контактной сварки. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 264 с.

4. *Адрышев А.К., Соколов В.М., Самойлов В.И.* Охрана труда при производстве и использовании бериллия и его соединений // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2007. – № 3. – С. 104–110.

5. *Ловшенко Г.Ф., Ловшенко Ф.Г., Хина Б.Б.* Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с.

6. *Довыденков В.А., Фетисов Г.П., Ярмолык М.В.* Влияние режимов реакционного размола и термической обработки на свойства дисперсно-упрочненной меди // Технология металлов. – 2008. – № 4. – С.17–19.

7. Microstructure, mechanical properties, electrical conductivity and wear behavior of high-volume TiC reinforced Cu-matrix composites / F. Akhtar, S.J. Askari, K.A. Shah, X. Du, S. Guo // Materials Characterization. – 2009. – Vol. 60, iss. 4. – P. 327 – 336. – DOI: 10.1016/j.matchar.2008.09.014

8. *Шалунов Е.П. Смирнов В.М., Матросов А.Л.* Реакционное механическое легирование порошковой меди кислородом и углеродом // Вестник Чувашского университета. – 2012. – № 3. – С. 252–259.

9. Углеродные материалы в литейном производстве и порошковой металлургии / И.Е. Илларионов, О.В. Кузьмина, Е.П. Шалунов, Д.Л. Кузьмин // Проектирование и

перспективные технологии в машиностроении и металлургии: материалы 2 республиканской научно-практической конференции, Чебоксары, 22 апр. 2016. – С. 90–97.

10. *Шалунов Е.П., Данилов Н.В., Липатов Я.М.* Разработка научных основ, технологии и оборудования для получения и обработки полуфабрикатов из дисперсно-упрочненных композиционных материалов // Охрана труда и прогрессивные технологические процессы в литейном производстве, порошковой металлургии и машиностроении: тезисы межреспубликанской научно-практической конференции. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1990. – С. 287–289.

11. *Weissgaerber T., Sauer Ch., Kieback B.* Herstellung dispersionsverfestigter Kupferwerkstoffe durch mechanisches Legieren // Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Unversitat Dresden. – 1997. – № 46 (1). – S. 34–39.

12. Патент 2118393 Российская Федерация, МПК B23K 35/30, C22C 9/00. Дисперсно-упрочненный материал для электродов контактной сварки / Е.П. Шалунов, А.Л. Матросов, Я.М. Липатов, В.Е. Стафик. – № 96118858/02, заявл. 20.09.1996; опубл. 10.02.1998.

13. Разработка технологии изготовления биметаллических разверток вкладышей тяжелонагруженных подшипников скольжения / Ю.О. Владимирова, Е.П. Шалунов, В.М. Смирнов В.М. и др. // Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии: материалы 2 республиканской научно-практической конференции, Чебоксары, 22 апр. 2016. – С. 166–173.

14. Granule formation kinetics in the process of mechanical alloying and their influence upon the properties of materials Cu-Al-O-C and Cu-Ti-C-O / V.A. Dovydenkov, V.S. Simonov, E.P. Shalunov, M.V. Yarmolyk // Euro PM. 2004: powder metallurgy world congress and exibition. In 2 volumes: conference proceeding, Austria, Vienna, Oct. 17–21, 2004. – Shrewsbury: EPMA, 2004. – Vol. 1. – P. 177–180.

15. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справочник / М.Е. Дриц, Н.Р. Бочвар, Л.С. Гузей и др.; отв. ред. Н.Х. Абрикосов. – М.: Наука, 1979. – 248 с.

16. *Пул Ч., Оуэнс Ф.* Нанотехнологии: пер. с англ. – М.: Техносфера, 2004. – 250 с.

17. *Старостин В.В.* Материалы и методы нанотехнологии: учебное пособие. – М.: Бином, 2008. – 431 с.

18. *Валиев Р.З., Александров И.В.* Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.

19. *Воронов В.К., Ким Д.Ч., Янюшкин А.С.* Свойства и применение наноматериалов: учебное пособие. – 5-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2018. – 324 с.

THE STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF DISPERSION-STRENGTHENED COMPOSITE MATERIALS OF THE SYSTEM CU-TI-C-O

Smirnov V.M., Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, e-mail: vms53@inbox.ru
Shalunov E.P., Ph.D. (Engineering), Professor, e-mail: shalunov2003@mail.ru
Lobanov D.V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: lobanodv@list.ru

I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

Abstract

The results of studying the structure and phase composition of dispersion-strengthened composite materials of the Cu-Ti-C-O system obtained by the method of reactive mechanical alloying of powdered copper with titanium and carbon in the air of the attritor working chamber are presented. It is shown that the materials under study with an equiatomic ratio of the amount of introduced carbon and titanium have an inhomogeneous structure, consisting of light and dark areas that differ significantly in microhardness. The dark areas are less strengthened. With an increase in the content of the introduced titanium powder in relation to carbon, the dark areas disappear. On the basis of atomic force microscopy and measurement of the lattice parameter, it is shown that the copper matrix of the investigated composite materials in the form of a solid solution with a titanium content of no more than 0.2% Ti has a nanocrystalline structure. By X-ray phase analysis of the anodic deposit of the materials under study, it is found that the main strengthening phases are titanium carbide nanoparticles. In addition, the studied materials show traces of the presence of free titanium in the form of its α-modification and the Cu_3Ti intermetallic compound.

Keywords
Attritor, reactionary mechanical alloying, granules, dispersion-strengthened composite materials, microstructure, lattice parameter, X-ray phase analysis, disperse phases

УДК 62-533.65

ТЕПЛОПРОВОДЯЩИЕ КЛЕЕВЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНОВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ И УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

А.В. ЩЕГОЛЬКОВ, канд. тех. наук, доцент,
А.В. ХРОБАК, аспирант,
(ТГТУ, г. Тамбов)

Щегольков А.В. – 392000, г. Тамбов, Советская, 106,
Тамбовский государственный технический университет,
e-mail: energynano@yandex.ru

Новые технологии соединения различных деталей являются важной частью развития современного машиностроения. В ряде случаев, наиболее эффективным является клеевое соединение. Оно не требует механической обработки деталей и обеспечивает соединения, которые могут быть с многократным монтажом. Кроме высокой механической прочности клеевые соединения должны соответствовать требованиям высокой теплопроводности и электропроводности. Для получения эффективного клеевого композита могут быть использованы углеродные нанотрубки, которые вместе с дисперсным металлическим наполнителем могут повысить прочность и улучшить теплопроводность. Для повышения эффективности углеродных нанотрубок может быть использована механоактивация. Эффективная механоактивация может быть достигнута в случае применения высокоэнергетического воздействия, которое реализуется в аппаратах вихревого слоя.

Ключевые слова: клеевой композит, теплопроводность, механоактивация, углеродные нанотрубки..

Введение

Применение углеродных нанотрубок для модификации различных типов полимерных композитов является актуальной и эффективной технологией [1 - 5].

В полной мере для удовлетворения вышеуказанных свойств может быть использована технология многокомпонентных дисперсных добавок в структуру клеевого композита. [6] Добавки могут быть углеродными [7], металлическими [8], и с разными степенями дисперсности [9]. Для получения эффективного клеевого композитного состава, который может быть использован для склеивания металлических поверхностей могут быть использованы наночастицы TiO_2 [10].

К преимуществам клеевых соединений можно отнести следующие характеристики: клеи распределяют нагрузку равномерно по широкой площади, снижая концентрацию напряжений в местах соединения, клеи наносятся внутри стыка и почти незаметны внутри сборки, клеи образуют уплотнение, а также такое связующее может защитить соединение от коррозии, оно относительно легкое, более низкой стоимости и время изготовления, а также с улучшенной устойчивостью к повреждениям [11]. Следовательно, потребность в улучшении механических свойств клеевых соединений остается постоянной и является основной целью данного исследования.

Целью исследования является повышение эффективности клеевых композитов за счет введения в их структуру углеродных и металлических частиц.

Задачи исследования:

1. Разработка технологий получения клеевого композита на основе полиуретанового компаунда, углеродных нанотрубок и металлических частиц;
2. Исследование физико-механических свойств клеевого композита на основе полиуретанового компаунда, углеродных нанотрубок и металлических частиц.

Методики и материалы

Методика подготовки МУНТ перед механоактивацией

В данном исследовании проводилась модификация полиуретанового композита механоактивированными многослойными углеродными нанотрубками (МУНТ). В качестве материалов был использован МУНТ Таунит-М (г. Тамбов, ООО НаноТехЦентр), бронзовая пудра (БП, «Плазмотен», Москва, Россия) и полиуретановый компаунд «Силагерм 6030» (ООО «ПО «Технология-Пласт», Москва, Россия).

Перед механоактивацией, навеску МУНТ добавляли в 4 М H_2SO_4, с целью уменьшения влияния примесной электропроводности. После удаления примесей, которые были образованы в результате синтеза МУНТ (остатки катализатора), полученный наноматериал тщательно промывали в дистиллированной воде в течение 3 повторений для удаления оставшихся после синтеза частиц катализатора. Затем МУНТ сушили в вакуумном термошкафу при температуре 100 ºС для удаления влаги. В процессе высушивания масса МУНТ снижается в среднем на 5%.

Методика механокактивации МУНТ

Для механоактивации МУНТ, использован аппарат АВС (аппарат вихревого слоя), механическое воздействие которого, осуществляется благодаря перемещению тел помола (цилиндрической формы) в переменном электромагнитном поле частотой до 1 Тл.

Методика приготовления наномодифицированного полиуретанового компаунда с металлическими частицами и УНТ

Механоактивированные МУНТ и бронзовую пудру (БП) вносили в полиуретановый компаунд (Силагерм 6030). После добавления, полученный состав перемешивали в механической мешалке в течение10 мин. В емкость объемом 200 мл заливали полиуретановый компаунд (рис. 1), сначала компонент А, затем постепенно перемешивая, засыпали МУНТ. Далее проводили смешивание на механическом смесителе «WiseStir HT 120DX» и перемешивали при 500-1000 об/мин в течение 10 мин. В полученную смесь добавляли 10 г отвердителя – компонент (Б) и перемешивали, используя тот же алгоритм смешивания, как и в первом случае. [11]. Технология механоактивации и ее влияние на свойства модифицируемых материалов представлены в работах [12, 13]

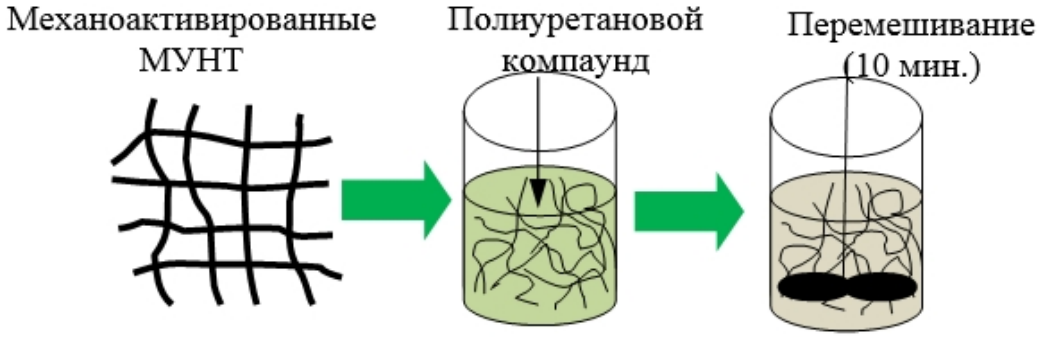


Рис. 1. Стадии подготовки МУНТ перед модифицированием полиуретанового компаунда.

Для измерения теплопроводности использовали многоканальный регистратор «Теплограф» (НПО ИНТЕРПРИБОР).

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлено исследование прочности клеевого соединения с МУНТ. Механоактивация улучшает параметры клеевого соединения за счет уменьшения размеров агломератов и более равномерного распределения МУНТ в матрице полимерного клеевого композита, а также за счет повышения смачиваемости МУНТ в матрице эластомера. Проведенные исследования позволили уточнить вопросы, связанные с влиянием механоактивации на свойства эластомеров модифицированных бинарной смесью МУНТ/БП.

Полученные результаты позволяют расширить понимание влияния принципов механоактивации на МУНТ заложенных в работах [11] с учетом такого компонента, как БП. При этом одним из дополнительных факторов улучшения свойств МУНТ при механоактивации может являться следствием гомогенного смешение МУНТ с такими материалами, как БП, что позволяет увеличить теплопроводность клеевого композита.

Таблица 1

Прочность клеевого соединения

Концентрация МУНТ (масс.%)	Прочность клеевого соединения (МПа)
	Механоактивированный МУНТ/БП
0	0,85±5%
1	0,85±5%
3	1,15±5%
6	0,7±5%

На рисунке 2 показан срез клеевого композита. Распределение МУНТ и БП в полиуретане имеет равномерный характер.

Рис. 2. Наномодифицированный полиуретановый компаунд с металлическими частицами и МУНТ

Исследование теплопроводности показывает, что увеличение теплопроводности происходит по мере увеличение концентрации БП и МУНТ. Для исходного полиуретана значение составляло 0,03 Вт/м°С. При введении 6 масс. % увеличение теплопроводность составило 0,042 Вт/м°С. Стоит также учитывать, что введение МУНТ в полимерный композит, также оказывает влияние и на значение электропроводности [14, 15].

Заключение

Разработана технология получения клеевого композита на основе полиуретанового компаунда, углеродных нанотрубок и металлических частиц. Проведено исследование физико-механических свойств клеевого композита на основе полиуретанового компаунда, углеродных нанотрубок и металлических частиц. Установлено, что для получения эффективного клеевого композита могут быть использованы углеродные нанотрубки, которые вместе с дисперсным металлическим наполнителем могут повысить прочность и улучшить теплопроводность. Для повышения эффективности углеродных нанотрубок может быть использована механоактивация. Эффективная механоактивация может быть достигнута в случае применения высокоэнергетического воздействия, которое реализуется в аппаратах вихревого слоя.

Список литературы

1. *Ha J.-H., Chu K., Park S.-H.* Electrical properties of the carbon-nanotube composites film under extreme temperature condition // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2019. – Vol. 19, iss. 3. – P. 1682–1685. – DOI: 10.1166/jnn.2019.16250.

2. Strength and fracture toughness of polyurethane elastomers modified with carbon nanotubes / E.R. Badamshina, R.V. Goldstein, K.B. Ustinov, Ya.I. Estrin // Physical Mesomechanics. – 2018. – Vol. 21, iss. 3. – P. 187–192. – DOI: 10.1134/S1029959918030013.

3. The effect of carbon nanotube orientation on erosive wear resistance of CNT-epoxy based composites / J. Chen, I.M. Hutchings, T. Deng, M.S.A. Bradley, K.K.K. Koziol // Carbon. – 2014. – Vol. 73. – P. 421–431. – DOI: 10.1016/j.carbon.2014.02.083.

4. *Farukh M., Singh A.P., Dhawan S.K.* Enhanced electromagnetic shielding behavior of multi-walled carbon nanotube entrenched poly (3,4-ethylenedioxythiophene) nanocomposites // Composites Science and Technology. – 2015. – Vol. 114. – P. 94–102. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2015.04.004.

5. Impact of synthesis temperature on morphology, rheology and electromagnetic interference shielding of CVD-grown carbon nanotube/polyvinylidene fluoride nanocomposites / S.A. Mirkhani M Arjmand S. Sadeghi, B. Krause, P. Pötschke, U. Sundararaj // Synthetic Metals. – 2017. – Vol. 230. – P. 39-50. – DOI: 10.1016/j.synthmet.2017.06.003.

6. Fracture behavior of adhesively bonded carbon fabric composite plates with nano materials filled polymer matrix under DCB, ENF and SLS tests / V.K. Srivastava, T. Gries, T. Quadflieg, B. Mohr, M. Kolloch, P. Kumara // Engineering Fracture Mechanics. – 2018. – Vol. 202. – P. 275–287. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.09.030.

7. Single-walled carbon nanotube-epoxy composites for structural and conductive aerospace adhesives / M.B. Jakubinek, B. Ashrafi, Y. Zhang, Y. Martinez-Rubi, C.T. Kingston, A. Johnston, B. Simard // Composites. Part B: Engineering. – 2015. – Vol. 69. – P. 87–93. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.09.022.

8. Ultra-low temperature curable nano-silver conductive adhesive for piezoelectric composite material / C. Yan Q. Liao, X. liZhou, L. Wang, C. Zhong, D, Zhang // Physica B: Condensed Matter. – 2018. – Vol. 529. – P. 9–15. – DOI: 10.1016/j.physb.2017.10.111.

9. *Saraç İ., Adin H., Temiz Ş.* Investigation of the effect of use of Nano-Al_2O_3, Nano-TiO_2 and Nano-SiO_2 powders on strength of single lap joints bonded with epoxy adhesive // Composites. Part B: Engineering. – 2019. – Vol. 166. – P. 472–482. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.02.007.

10. *Ghosh, P.K., Patel A., Kumar K.* Adhesive joining of copper using nano-filler composite adhesive // Polymer. – 2016. – Vol. 87 – P. 159–169. – DOI: 10.1016/j.polymer.2016.02.006.

11. *Щегольков А.В.* Применение наномодифицированных полиуретановых композитов для систем защиты от электромагнитных излучений // Технологии и материалы для

экстремальных условий (прогнозные исследования и инновационные разработки): материалы Всероссийской научной конференции, Звенигород, 10–14 дек. 2018 г. – МЦАИ РАН, 2018. – С. 236–241.

12. *Щегольков А.В.* Применение механоактивации углеродных нанотрубок при наномодифицировании эластомеров // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент: материалы 10 международной научно-инновационной молодёжной конференции, Тамбов, 24–26 окт. 2018 г. – Тамбов: ИП Чеснокова А.В, 2018. – С. 272–274.

13. Effect of addition of carbon nanotubes on electrical conductance and heat dissipation of elastomers at flow of direct current / A.V. Shchegolkov, V.S. Yagubov, Y.A. Khan, F.F. Komarov // Inorganic Materials: Applied Research. – 2020. – Vol. 11, iss. 5. – P. 1191–1198. – DOI: 10.1134/S2075113320050305.

14. Effect of Methods for Fabrication of Polymer Composites with Carbon Nanotubes on Conduction Processes / F.F. Komarov, A.G. Tkachev, A.V. Shchegolkov et al. // Technical Physics – 2021. – Vol. 91, iss. 3. – P. 461–469. – DOI: 10.1134/S2075113320050305.

15. *Щегольков А.В.* Сравнительный анализ тепловых эффектов в эластомерах, модифицированных МУНТ при постоянном электрическом напряжении // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2021. – № 1 (55). – С. 63–73. – DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-63-73.

HEAT-CONDUCTING ADHESIVES BASED ON POLYURETHANES MODIFIED WITH METAL PARTICLES AND CARBON NANOTUBES

Shchegolkov A.V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: energynano@yandex.ru
Hrobak A.V. Ph.D. student, Post-graduate Student, e-mail: nastiarx@yandex.ru

Tambov State Technical University, 106 Sovietskaya st., Tambov, Russian Federation

Abstract

New technologies for connecting various parts are an important part of the development of modern mechanical engineering. In some cases, the most effective is the adhesive joint. It does not require mechanical processing of parts and provides connections that can be re-installed. In addition to high mechanical strength, the adhesive joints must meet the requirements of high thermal and electrical conductivity. To obtain an effective adhesive composite, carbon nanotubes can be used, which together with a dispersed metal filler, can increase strength and improve thermal conductivity. Mechanical activation can be used to increase the efficiency of carbon nanotubes. Effective mechanical activation can be achieved in the case of high-energy impact, which is implemented in the devices of the vortex layer.

Keywords
adhesive composite, thermal conductivity, mechanical activation, carbon nanotubes.

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 списки 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 ВИНИТИ 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 изменяемости 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 magnetic 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 13C-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=hdac5 rtkb73ae013ofk4g8nrv1.

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 пройдите 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 окончанию 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 (*Инновационные 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); Аффилиация 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 непереводимых названий собственных имен и др. объектов, имеющих собственные названия; также не используется непереводимый 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 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 непереводимых названий собственных имен и др. объектов, имеющих собственные названия; также не используется непереводимый 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)**;

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 документов;

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 бибописании 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 связки, 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;

* 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.

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 бибописании должен быть указан полный объем издания, независимо от того, какие страницы издания были процитированы в тексте; исключение 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 бибописаний в целом. Ниже приведены примеры ссылок на различные виды публикаций.

Описание статьи из журналов:

Atapin V.G., Skeeba V.Yu. Chislennoe modelirovanie beskarkasnykh arochnykh pokrytii [Numerical simulation of frameless arched covers]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, 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 smazochno-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., Mullagalin 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 resursosberegayushchie 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 teotrii 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., Mamikoniants 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: Friktsionnye 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 удается 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_farmacevticheskaja_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:

Semenov 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 zhidkostei i gazov spomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroistv [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., e.a. *Sposob orientirovaniiapo 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 10.06.2021. Выход в свет 14.06.2021. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Тираж 20 экз. Уч.-изд. л. 37,2. Печ. л. 20,0. Изд. № 100. Заказ № 554.

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

ISSN 1994-6309 (Print)
ISSN 2541-819X (Online)

ОБРАБОТКА 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 № ФС77-80400 от 01 марта 2021 г.
Print ISSN: 1994-6309 Online ISSN: 2541-819X
Индекс журнала в каталоге агентства «Роспечать» – 70590

НОВОСИБИРСК