

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Том 21, Номер 1

ЯНВАРЬ – МАРТ 2019

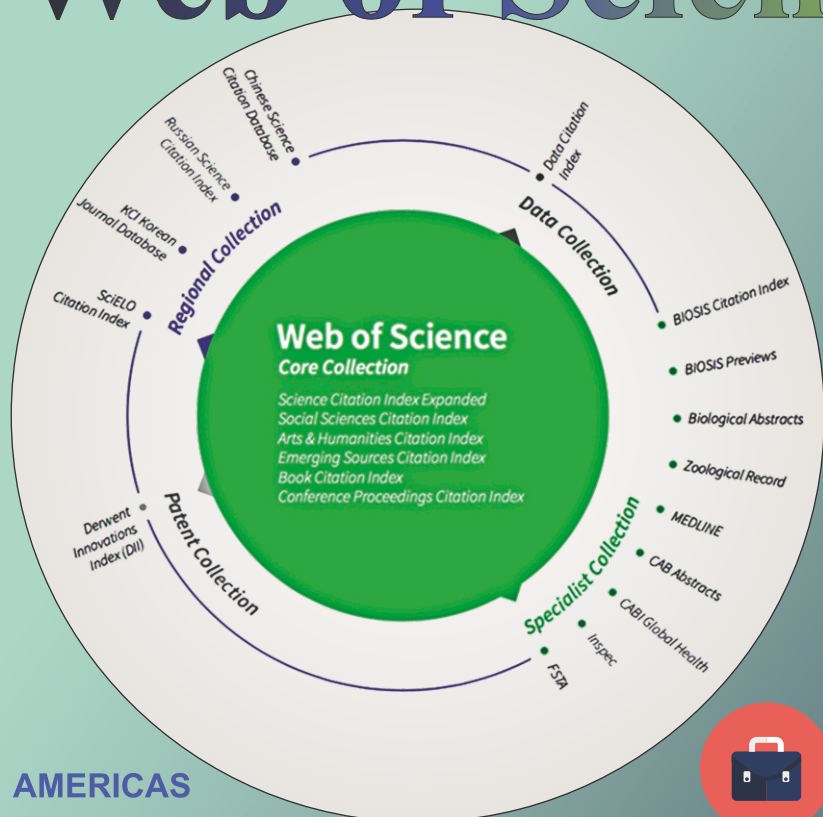
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

**ТЕХНОЛОГИЯ
ОБОРУДОВАНИЕ
ИНСТРУМЕНТЫ**

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

НОВОСИБИРСК

ПЛАТФОРМА Web of Science



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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Том 21 № 1 2019 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

Пустовой Николай Васильевич – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, член Национального комитета по теоретической и прикладной механике, президент 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, проректор по научно-педагогической работе Донбасской государственной машиностроительной академии, 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, **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, **Лобанов Д.В.**, доктор техн. наук, доцент, ЧГУ, г. Чебоксары, **Макаров А.В.**, доктор техн. наук, с.н.с., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург, **Овчаренко А.Г.**, доктор техн. наук, профессор, БТИ АлтГТУ, г. Бийск, **Рахимянов Х.М.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Сараев Ю.Н.**, доктор техн. наук, профессор, ИФПМ СО РАН, г. Томск, **Янюшкин А.С.**, доктор техн. наук, профессор, ЧГУ, г. Чебоксары

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

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».

Полный текст журнала «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» теперь 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.

СОУЧРЕДИТЕЛИ

ОАО НПТ и ЭИ «Оргстанкинпром»
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»
ООО НПКФ «Машсервисприбор»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Батаев Анатолий Андреевич – профессор,
доктор технических наук,
ректор НГТУ

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Иванцовский Владимир Владимирович – доцент,
доктор технических наук.

Скиба Вадим Юрьевич – доцент, кандидат технических наук

Ложкина Елена Алексеевна – редактор перевода текста
на английский язык,
кандидат технических наук

*Перепечатка материалов из журнала «Обработка металлов» возможна при
обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка
на журнал при перепечатке обязательна.*

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

Журнал награжден в 2005 г. Большой Золотой Медалью Сибирской Ярмарки за освещение новых технологий, инструмента, оборудования для обработки металлов

Журнал зарегистрирован 05.04.2006 г. Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-23961

Индекс: **70590** («РОСПЕЧАТЬ»)

Адрес редакции:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, к. 137ВЦ, Скиба В.Ю.

Тел. +7 (383) 346-17-75

Сайт журнала http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallor

E-mail: metal_working@mail.ru; metal_working@corp.nstu.ru

Цена свободная

16+

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ

Попов В.Ю., Рычков Д.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Лосев Е.Д., Селин Н.В. Исследование качества поверхности инструмента из быстрорежущей стали после комбинированной электроалмазной обработки.....	6
Титов Ю.В., Белан Д.Ю., Тодер Г.Б., Отраднова А.О. Повышение надежности работы тяговых электродвигателей локомотивов за счет применения электроискровой обработки коллекторных пластин.....	16
Борисов М.А., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Гибридная технология электрохимической обработки сложнопрофильных изделий.....	25
Братан С.М., Харченко А.О., Владецкая Е.А., Харченко А.А. Анализ и синтез системы виброизоляции шлифовального станка с учетом эксплуатационной надежности ее элементов.....	35

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

Василега Д.С., Киреев В.В., Зырянов В.А. Моделирование методом конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния в сменных многогранных пластинах червячной фрезы.....	50
Атапин В.Г. Улучшение технических характеристик многоцелевых станков при проектировании.....	61

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Габец Д.А., Марков А.М. Исследование влияния легирующих элементов на структуру и свойства серых чугунов, работающих в условиях ударно-фрикционного износа.....	70
Гольшев А.А., Оришич А.М. Исследование влияния режимов фокусировки лазерного излучения на геометрические и механические свойства металлокерамических треков.....	82
Коноваленко И.С., Шилько Е.В., Овчаренко В.Е., Псахье С.Г. Исследование структурных факторов, обеспечивающих повышение механических свойств поверхностных слоев, модифицированных импульсным электронно-пучковым облучением.....	93
Ан И-Кан, Вольф Э.Л., Сараев Ю.Н. Физико-механические аспекты абразивного изнашивания сталей в условиях охлажденной воздушной среды.....	108

МАТЕРИАЛЫ РЕДАКЦИИ

Рекомендации по написанию научной статьи	122
Подготовка аннотации	126
Правила для авторов	129

Корректор *Л.Н. Ветчакова*
 Художник-дизайнер *А.В. Ладыжская*
 Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
 Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 12.03.2019. Выход в свет 15.03.2019. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
 Усл. печ.л. 17,0. Уч.-изд. л. 31,62. Изд. № 25. Заказ 539. Тираж 300 экз.

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

BRABOTKA OMETALLOV

METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Volume 21 No.1 2019 SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

Vladimir V. Ivancivsky, D.Sc. (Engineering), Associate Professor,
Department of Industrial Machinery Design,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

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

Editor of the English translation:

Elena A. Lozhkina, Ph.D. (Engineering),
Department of Material Science in Mechanical Engineering,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

The journal is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year



Data on the journal are published in
«Ulrich's Periodical Directory»

Journal “Obrabotka Metallov” (“Metal Working and Material Science”) has been Indexed in Clarivate Analytics Services.



We sincerely happy to announce that Journal “Obrabotka Metallov” (“Metal Working and Material Science”), ISSN 1994-6309 / E-ISSN 2541-819X is selected for coverage in Clarivate Analytics (formerly Thomson Reuters) products and services started from July 10, 2017. Beginning with No. 1 (74) 2017, this publication will be indexed and abstracted in: Emerging Sources Citation Index.



Journal “Obrabotka Metallov” (“Metal Working & Material Science”) has entered into an electronic licensing relationship with EBSCO Publishing, the world's leading aggregator of full text journals, magazines and eBooks. The full text of JOURNAL can be found in the EBSCOhost™ databases.

📍 Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,
Novosibirsk, 630073, Russia

☎ Tel.: +7 (383) 346-17-75

🌐 http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

✉ E-mail: metal_working@mail.ru; metal_working@corp.nstu.ru

**EDITORIAL COUNCIL
CHAIRMAN:**

Nikolai V. Pustovoy, D.Sc. (Engineering), Professor,
President, Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

MEMBERS:

The Federative Republic of Brazil:

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

The Federal Republic of Germany:

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

Florian Nürnberger, Dr.-Ing.,
Chief Engineer and Head of the Department “Technology of Materials”,
Leibniz Universität Hannover, *Garbsen*;

Thomas Hassel, Dr.-Ing.,
Head of Underwater Technology Center Hanover,
Leibniz Universität 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,
Vice Rector for Research and Academic Affairs,
Donbass State Engineering Academy, *Kramatorsk*

The Russian Federation:

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

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

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

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

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

Aleksandr N. Gerasenko, Director,
Scientific and Production company “Mashservispribor”, *Novosibirsk*;

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*;

Dmitry V. Lobanov, D.Sc. (Engineering), Associate Professor,
I.N. Ulianov Chuvash State University, *Cheboksary*;

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

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

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

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

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

CONTENTS

TECHNOLOGY

Popov V.Yu., Rychkov D.A., Arkhipov P.V., Kuznetsov A.M., Losev E.D., Selin N.V. The Study of the Surface Quality of High-Speed Steel Tool after the Combined Electric Diamond Grinding.....	6
Titov Yu.V., Belan D.Yu., Toder G.B., Otradnova A.A. Improving the Reliability of Locomotive Traction Motors due to the use of Electrical Discharge Machining of Collector Plates.....	16
Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Hybrid Technology of Electrochemical Processing of Complex Profiles.....	25
Bratan S.M., Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A., Kharchenko A.A. Analysis and Synthesis of Vibration Isolation System of a Grinding Machine with Account of the Operational Reliability of its Elements.....	35

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

Vasilega D.S., Kireev V.V., Zyryanov V.A. Modelling by a Method of Finite Elements for Determination of Stress-Deformed State in Retrofittable Hob Cutter with Indexable Inserts.....	50
Atapin V.G. Improving the Technical Characteristics of Machining Center at the Design Stage.....	61

MATERIAL SCIENCE

Gabets D.A., Markov A. M. Study of the Influence of Alloying Elements on the Structure and Properties of Gray Cast Iron Operating under Conditions of Shock-Friction Wear.....	70
Golyshev A.A., Orishich A.M. Study of the Laser Radiation Focusing Modes Effect on Geometrical and Mechanical Properties of Metal-Ceramic Tracks.....	82
Konovalenko I.S., Shilko E.V., Ovcharenko V.E., Psakhie S.G. Investigation of Structural Factors that Increase the Mechanical Properties of Surface Layers Modified by Pulsed Electro-Beam Irradiation.....	93
An I-Kan, Wolf E.L., Saraev Yu.N. Physical and Mechanical Aspects of Abrasive Wear of Steels in a Cooled Air Environment.....	108

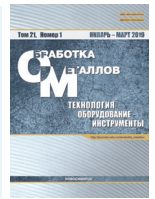
EDITORIAL MATERIALS

Guidelines for Writing a Scientific Paper	122
Abstract requirements	126
Rules for authors	129



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Исследование качества поверхности инструмента из быстрорежущей стали после комбинированной электроалмазной обработки

Вячеслав Попов^{a, *}, Даниил Рычков^b, Павел Архипов^c,
 Алексей Кузнецов^d, Егор Лосев^e, Николай Селин^f

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, г. Братск, 665709, Россия

^a <http://orcid.org/0000-0001-6299-9161>, berkutoff@rambler.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0002-9323-7693>, dielektrik84@mail.ru,
^c <http://orcid.org/0000-0003-0390-8367>, pavded@yandex.ru, ^d <http://orcid.org/0000-0001-7095-3075>, predalex@yandex.ru,
^e <http://orcid.org/0000-0002-1530-3739>, _elk_@mail.ru, ^f <http://orcid.org/0000-0001-5041-826X>, selin138@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.923.6

История статьи:

Поступила: 13 сентября 2018
 Рецензирование: 28 ноября 2018
 Принята к печати: 10 декабря 2018
 Доступно онлайн: 15 марта 2019

Ключевые слова:

Р6М5
 Быстрорежущая сталь
 Металлорежущий инструмент
 Качество поверхности
 Алмазный шлифовальный круг
 Комбинированная электроалмазная обработка

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение алмазных шлифовальных кругов на металлической связке для шлифования быстрорежущих сталей большинством литературных источников рекомендовано с помощью электрофизических, электрохимических или комбинированных методов обработки. Одновременно рекомендуется ограничить область применения окончательным круглым шлифованием в силу появления на обработанной поверхности дефектного слоя либо снизить технологические режимы обработки. К его сигнальным признакам относятся систематические сколы вдоль режущей кромки и микросколы на передней поверхности образцов, размеры карбидных частиц, отдельные кратеры или лунки на передней поверхности, снижение твердости, увеличение высоты микронеровностей профиля. Статья посвящена определению таких технологических режимов комбинированной электроалмазной обработки инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, при шлифовании на которых отсутствовали бы сигнальные признаки дефектного слоя. Если решить эту задачу, то возможно расширить область применения алмазных шлифовальных кругов на металлической связке при обработке инструментальных сталей. Предмет исследования: пластины из быстрорежущей стали для металлорежущего инструмента; объект исследования: технологический процесс комбинированной электроалмазной обработки. **Цель работы:** изучение влияния технологических режимов комбинированной электроалмазной обработки на качество поверхностного слоя инструмента из быстрорежущей стали. **Методы исследования.** Операция шлифования проводилась на универсально-заточном станке модели ЗД642Е, модернизированном под технологию комбинированной электроалмазной обработки. Применялся шлифовальный алмазный чашечный круг на металлической связке: АС6 80/63 М1 100 %. Электрические параметры исследовались в диапазоне: $i_{np} = 0,17...0,25 \text{ A/cm}^2$; $i_{tr} = 3,125...9,375 \text{ A/cm}^2$ соответственно. Механические параметры исследовались в диапазоне: $V = 17...35 \text{ м/с}$; $t = 0,01...0,03 \text{ мм/дв.ход}$; $S = 1,5 \text{ м/мин}$. Шлифование велось с применением электролита: $\text{NaNO}_3 - 3 \%$, $\text{NaNO}_2 - 1 \%$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 - 0,5 \%$, остальное вода. Микроструктурные исследования проводили на микрошлифах образцов после травления. Качество поверхности оценивали с помощью растровой электронной микроскопии (Carl Zeiss EVO50 XVP); методом световой микроскопии (МЕТАМ ЛВ-42); шероховатость определялась с помощью профилограф-профилометра (Абрис-ПМ7); твердость HRC определялась с помощью твердомера Роквелла (600 MRD). **Результаты и обсуждение.** Установлено, что наилучшим сочетанием технологических режимов, при обработке на которых отсутствуют признаки дефектного слоя и сохраняется высокое качество металлорежущего инструмента из быстрорежущей стали, следует считать следующие: $V = 35 \text{ м/с}$; $S = 1,5 \text{ м/мин}$; $t = 0,02 \text{ мм/дв.ход}$; $i_{np} = 0,25 \text{ A/cm}^2$; $i_{tr} = 6,25 \text{ A/cm}^2$. Выявлено, что при обработке на рекомендуемых режимах режущая кромка ровная, с неглубокими зазубринами, размер карбидных частиц составляет в среднем 2...5 мкм. Установленные режимы позволяют получить шероховатость передней поверхности $R_a = 0,070 \text{ мкм}$. Обнаружено, что полученная твердость на 6 % превышает исходную твердость и составляет 67...70 HRC .

Для цитирования: Исследование качества поверхности инструмента из быстрорежущей стали после комбинированной электроалмазной обработки / В.Ю. Попов, Д.А. Рычков, П.В. Архипов, А.М. Кузнецов, Е.Д. Лосев, Н.В. Селин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 6–15. doi: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-6-15.

*Адрес для переписки

Попов Вячеслав Юрьевич, к.т.н., доцент
 Братский государственный университет
 ул. Макаренко, 40,
 665702, г. Братск, Россия
 Тел.: 8 (950) 107-20-16, e-mail: berkutoff@rambler.ru

Введение

Качество обработанной поверхности металлорежущего инструмента включает в себя целый комплекс совокупных характеристик, к которым

относятся физико-механические свойства материала, макро- и микрогеометрия поверхности, состояние режущих кромок и поверхностей инструмента. Наличие любых дефектов, макро- и микронеровностей, микротрещин, растравливания химических элементов под действием электролитов приводит к снижению работоспособности металлорежущего инструмента, снижению периода его стойкости и возникновению брака в ответственных изделиях машиностроения. Технология комбинированной электроалмазной обработки основана на совмещении процессов электрохимического растворения обрабатываемой заготовки под воздействием электрического тока в среде электролита и механического съема припуска алмазным кругом на металлической связке. При прохождении постоянного электрического тока через раствор электролита в результате окислительно-восстановительной реакции происходит растворение анода. Дополнительно в технологии реализована активная правка круга, которую выполняет правящий катод, способствующий его работе в режиме самозатачивания [1].

Алмазные шлифовальные круги на металлической связке в процессе работы интенсивно засаливаются, поэтому в литературе их рекомендуется применять для комбинированных методов обработки с использованием непрерывной электрохимической правки круга. Засаливание – это непрерывный процесс адгезионно-диффузионного засорения абразивного слоя шлифовального инструмента элементами обрабатываемого материала, влекущий за собой потерю его производительности и режущей способности [2, 3]. Поэтому область применения алмазных кругов на металлической связке ограничена финишным шлифованием [1, 4].

В современной промышленности весьма широко применяются быстрорежущие стали. Это объясняется тем, что изготовление мелкого сложнопрофильного инструмента – сверла, метчики, концевые фрезы из твердых и сверхтвердых инструментальных материалов – экономически нецелесообразно [4]. На сегодняшний день его изготавливают из быстрорежущей стали.

При затачивании металлорежущего инструмента для исключения появления на его поверхности дефектного слоя необходимо стремиться к минимизации развития такого процесса, как засаливание. В связи с этим вопрос качественного

затачивания режущего инструмента является актуальным.

В работах [5–11], посвященных изучению возникновения дефектного слоя после обработки быстрорежущих сталей, не наблюдается единого мнения исследователей по поводу его структуры. Одни исследователи считают, что он состоит из безыгольчатого мартенсита, другие склоняются к тому, что он состоит из аустенита, третьи полагают, что это структура, обогащенная кислородом или азотом. Но все подтверждают, чтобы такой слой возник, необходимо одновременное воздействие высокой температуры и давления в зоне контакта. В монографии [1], имеющей более глубокую структуру исследований в области обработки материалов, А.С. Янющкин показал, что в результате подбора механических и электрохимических режимов обработки возможно минимизировать величину дефектного слоя на обработанной поверхности.

К сигнальным признакам дефектов относятся: следы пластической деформации, характерные для адгезионного взаимодействия, – систематические сколы вдоль режущей кромки и микросколы на передней поверхности образцов [1, 2]; следы рекристаллизации элементов, входящих в состав быстрорежущей стали, характерные при росте контактной температуры в результате адгезионно-диффузионного взаимодействия – размеры карбидных частиц [1, 2, 9, 11–14]; следы воздействия локальных эрозионных процессов, характерные для электроэрозионной обработки – отдельные кратеры или лунки на передней поверхности образцов; следы воздействия электрохимических процессов, характерные для электрохимической обработки – снижение твердости передней поверхности образцов [1, 2, 15] в результате электрохимического растворения припуска; увеличение высоты микронеровностей профиля передней поверхности образцов в результате увеличения электрических и механических значений технологических режимов обработки [1, 2, 12, 16].

Следует признать, если решить задачу обеспечения качества поверхности инструмента из быстрорежущей стали после комбинированной электроалмазной обработки, то станет возможным расширить применяемость алмазных шлифовальных кругов на металлической связке при обработке инструментальных сталей. Такое

решение позволит в полной мере реализовать потенциал алмазных кругов и найдет эффективное и экономически выгодное внедрение в производство.

Предмет исследования представляют пластины из быстрорежущей стали для металло-режущего инструмента, объект исследования – технологический процесс комбинированной электроалмазной обработки.

Целью данной работы является изучение влияния технологических режимов комбинированной электроалмазной обработки на качество поверхностного слоя инструмента из быстрорежущей стали.

Методика исследований

В качестве объекта исследования выбрана закаленная быстрорежущая сталь Р6М5, использованы образцы с размерами поверхности шлифования 8×26 мм, площадь поверхности, по которой проводилось шлифование $F = 2,08 \text{ см}^2$.

Микроструктурные исследования проводили на микрошлифах образцов после травления. Перед травлением образцы полировались по передней поверхности с использованием алмазных паст разной дисперсности. Чтобы удалить частицы предыдущего абразивного материала при переходе с большой дисперсности на мелкую, образец тщательно промывался водой и слабым раствором спирта. После полирования исследуемая поверхность, как правило, имела зеркальный блеск без визуального подтверждения абразивных царапин.

Состав реактива для травления образцов: соляная кислота – 100 мл; серноокислая медь – 20 г; вода 100 мл. Травление проводилось с погружением образца в реактив на 1–2 мин с последующей его промывкой теплой водой и спиртом. В некоторых случаях применялось многократное травление с промежуточной полировкой.

Операция шлифования проводилась на универсально-заточном станке, модели 3Д642Е, модернизированном под технологию комбинированной электроалмазной обработки – разновидности электрохимического шлифования с одновременной активной правкой алмазного круга. Применялся шлифовальный алмазный чашечный круг на металлической связке: АС6 80/63 М1 100 %, $D = 125$ мм, $b = 15$ мм.

Основное внимание при обработке уделялось поиску технологических режимов, позволяющих минимизировать дефекты на режущей кромке и на поверхности инструмента из быстрорежущей стали, поскольку в зависимости от режимов обработки доля анодного растворения в общем сьеме припуска может находиться в пределах от 25 до 90 %.

С этой целью варьировались следующие параметры комбинированной электроалмазной обработки:

– электрические параметры, состоящие из плотности тока правки круга и плотности тока растравливания обрабатываемой поверхности, исследовались в диапазоне $i_{\text{пр}} = 0,17 \dots 0,25 \text{ А/см}^2$; $i_{\text{тр}} = 3,125 \dots 9,375 \text{ А/см}^2$ соответственно. Диапазоны варьирования выбраны исходя из того, что если плотность тока правки круга ниже $0,17 \text{ А/см}^2$, то не удастся заблокировать процесс его засаливания. Низкая плотность тока в цепи травления является нецелесообразной, поскольку фактически шлифование происходит без разупрочнения. В то же время с увеличением плотностей тока ($i_{\text{пр}} > 0,322 \text{ А/см}^2$; $i_{\text{тр}} > 9,375 \text{ А/см}^2$) возникают предпосылки для развития электроэрозионного процесса, вызывающего увеличение удельного расхода алмазов;

– механические параметры, состоящие из скорости вращения круга, продольной и поперечной подачи, исследовались в диапазоне $V = 17\text{--}35 \text{ м/с}$; $t = 0,01 \dots 0,03 \text{ мм/дв. ход}$; $S = 1,5 \text{ м/мин}$. С увеличением значений механических параметров ($V > 51 \text{ м/с}$; $t > 0,03 \text{ мм/дв. ход}$; $S > 2 \text{ м/мин}$) на обработанной поверхности появляются макродефекты, снижается работоспособность металлорежущего инструмента, снижается период его стойкости [1–5, 16–19]. Варьирование продольной подачи в настоящей работе не исследовалось, поскольку ранее установлено рациональное ее значение для быстрорежущей стали [1, 2, 21].

Шлифование велось с применением электролита следующего состава: азотнокислый натрий NaNO_3 – 3 %; азотистокислый натрий NaNO_2 – 1 %; углекислый натрий Na_2CO_3 – 0,5 %, остальное – вода.

Качество поверхности инструмента из быстрорежущей стали после комбинированной электроалмазной обработки оценивали с помощью растровой электронной микроскопии (Сarl

Zeiss EVO50 XVP) и методом световой микроскопии (МЕТАМ ЛВ-42); шероховатость R_a определялась с помощью профилограф-профилометра (Абрис-ПМ7), ее средняя величина указана в соответствующих подрисуночных подписях; твердость HRC определялась с помощью твердомера Роквелла (600 MRD), ее величина также указана в подрисуночных подписях.

Результаты и их обсуждение

В соответствии с целью данного исследования необходимо определить технологические режимы комбинированной электроалмазной обработки инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, при шлифовании на которых отсутствовали бы признаки дефектного слоя. К ним относятся: следы пластической деформации, характерные для адгезионного взаимодействия, – систематические сколы вдоль режущей кромки и микросколы на передней поверхности образцов; следы рекристаллизации элементов, входящих в состав быстрорежущей стали, характерные при росте контактной температуры в результате адгезионно-диффузионного взаимодействия, – размеры карбидных частиц; следы воздействия локальных эрозионных процессов, характерные для электроэрозионной обработки, – отдельные кратеры или лунки на передней поверхности образцов; следы воздействия электрохимических процессов, характерные для электрохимической обработки, – снижение твердости передней поверхности образцов в результате электрохимического растворения припуска; увеличение высоты микронеровностей профиля передней поверхности образцов в результате увеличения электрических и механических значений технологических режимов обработки.

Анализ результатов исследований показал, что при плотности тока правки, равной $0,17 \text{ A/cm}^2$ (рис. 1, а), шероховатость обработанной поверхности составляет $0,097 \text{ мкм}$ при твердости $58...60 \text{ HRC}$, в то время как быстрорежущая сталь в закаленном состоянии имеет твердость $63...66 \text{ HRC}$. Выявлено [2, 20], что ее снижение на 12% вызвано постепенным засаливанием режущей поверхности круга. Это связано с тем, что образование площадок засаливания на режущей поверхности круга приводит к увеличению силы резания и температуры в зоне обработки, оказы-

вающих влияние на твердость быстрорежущей стали. Состояние режущей кромки по внешнему виду дефектно – она неровная. На передней поверхности наблюдается рост первичных карбидов M_6C , вызванный ростом температуры в зоне резания [20] из-за трения частично засаленной поверхности круга. Их размер составляет в среднем $2...8 \text{ мкм}$, в то время как изначальный размер карбидных частиц до обработки составляет, в среднем $2...5 \text{ мкм}$.

При плотности тока растравливания, равной $9,375 \text{ A/cm}^2$ (рис. 1, б), шероховатость обработанной поверхности составляет $0,136 \text{ мкм}$, при твердости $54...56 \text{ HRC}$. Выявлено [21], что ее снижение на 18% от исходной твердости происходит в результате электрохимического разупрочнения обрабатываемой поверхности при прохождении электрического тока через электролит. Такое снижение объясняется ослаблением связи химических элементов поверхности в результате растравливания. Поэтому мы считаем значение $i_{\text{тр}} = 9,375 \text{ A/cm}^2$ высоким, максимально допустимым электрическим параметром при комбинированной электроалмазной обработке. Здесь размеры карбидных частиц составляют в среднем $2...5 \text{ мкм}$. Несмотря на то что рост отдельных частиц не зафиксирован, они скапливаются в виде белой полосы вдоль режущей кромки (рис. 1–3). Это является дефектом, поскольку приводит к структурной неоднородности поверхностного слоя.

С увеличением глубины резания от $0,01 \text{ мм/дв.ход}$ (рис. 2, а) до $0,03 \text{ мм/дв.ход}$ (рис. 2, б) увеличивается глубина внедрения алмазных зерен в поверхность, что приводит к росту высоты микронеровностей профиля передней поверхности образцов от $0,061$ до $0,175 \text{ мкм}$. Зафиксирован рост твердости с 56 до 65 HRC . Выявлено, что при малом значении глубины резания, равным $0,01 \text{ мм/дв.ход}$, растравленный слой глубиной порядка $0,02...0,025 \text{ мм}$ не успевает полностью сошлифоваться. В микроструктуре передней поверхности инструмента из быстрорежущей стали видны карбидные частицы, вытянутые в овалы (показаны стрелками). Их размер составляет в среднем $3...4 \text{ мкм}$. С увеличением глубины резания до $0,03 \text{ мм/дв.ход}$ дефектная поверхность полностью удаляется в результате электрохимического растворения, однако происходит рост суммарной силы резания, что приводит к сколам режущей кромки.

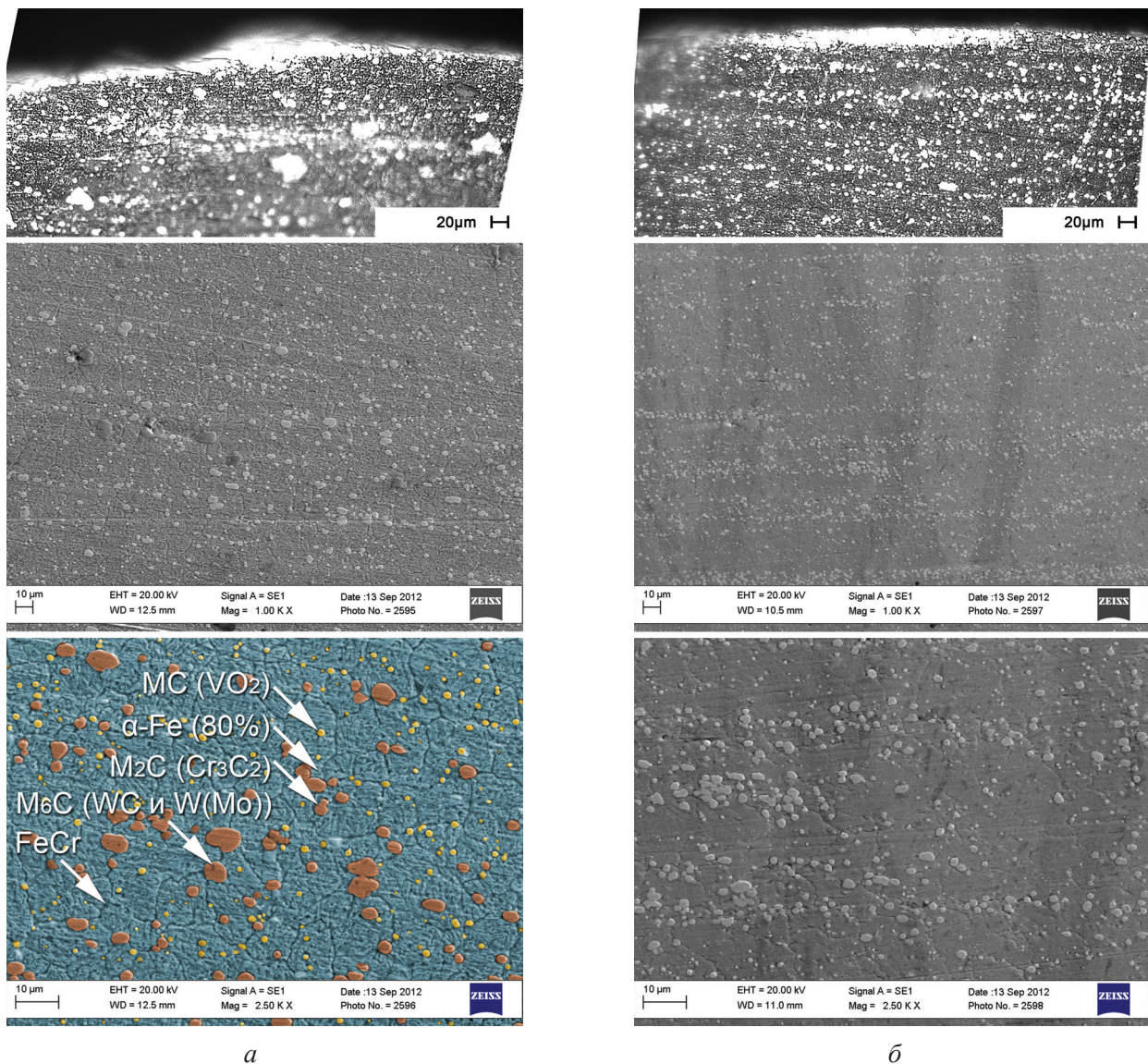


Рис. 1. Состояние поверхности после комбинированной электроалмазной обработки:

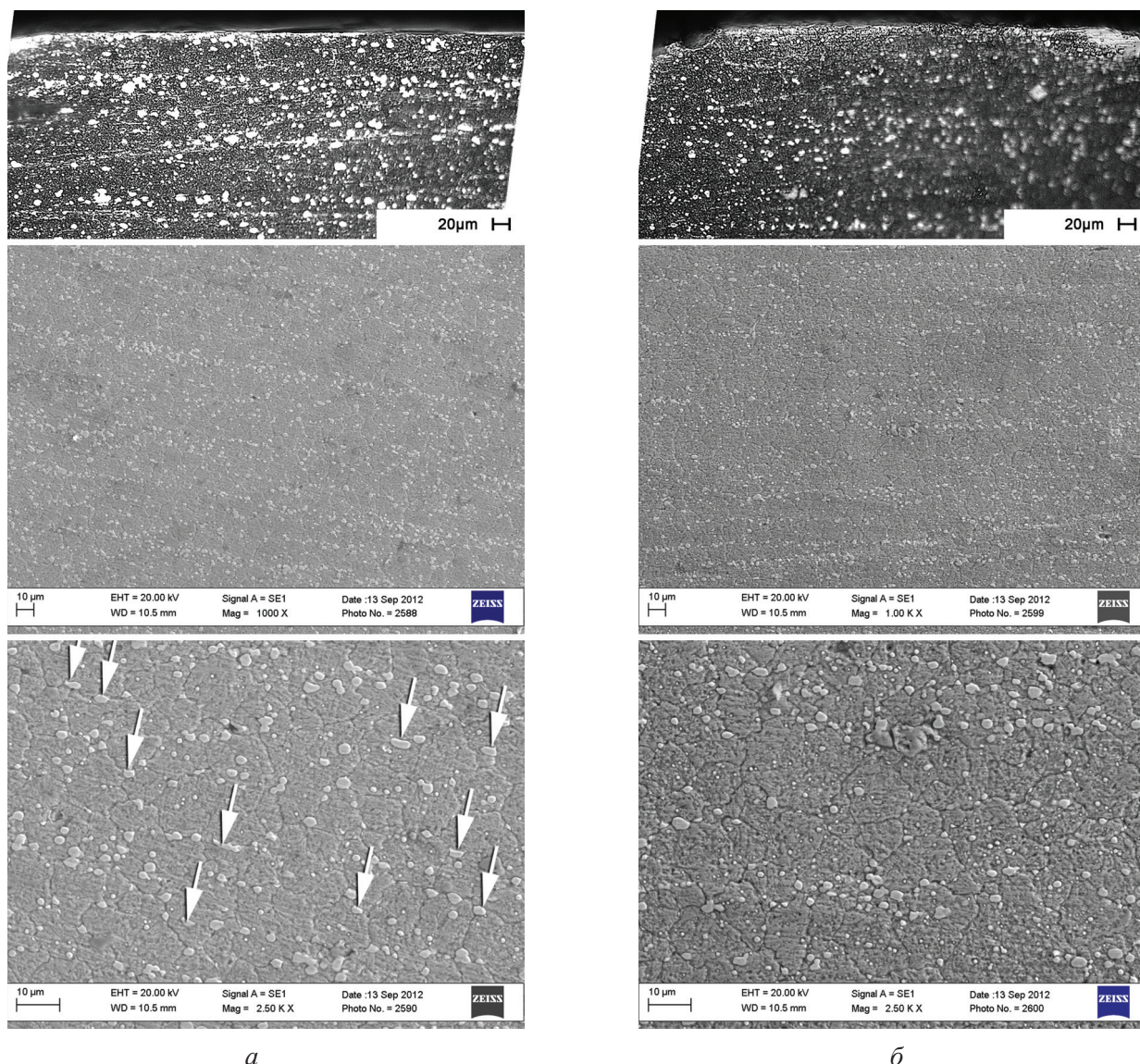
a – $V = 35$ м/с; $S = 1,5$ м/мин; $t = 0,02$ мм/дв. ход; $i_{np} = 0,17$ А/см²; $i_{tp} = 3,125$ А/см²; $R_a = 0,097$ мкм; 58...60 HRC;
б – $V = 35$ м/с; $S = 1,5$ м/мин; $t = 0,02$ мм/дв. ход; $i_{np} = 0,25$ А/см²; $i_{tp} = 9,375$ А/см²; $R_a = 0,136$ мкм; 54...56 HRC

Fig. 1. Microstructure of the sample surface after combined electric diamond grinding:

a – $V = 35$ м/с; $S = 1,5$ м/мин; $t = 0,02$ мм/дв. ст; $i_{cd} = 0,17$ А/см²; $i_{ct} = 3,125$ А/см²; $R_a = 0,097$ мкм; 58...60 HRC;
б – $V = 35$ м/с; $S = 1,5$ м/мин; $t = 0,02$ мм/дв. ст; $i_{cd} = 0,25$ А/см²; $i_{ct} = 9,375$ А/см²; $R_a = 0,136$ мкм; 54...56 HRC

При малой скорости вращения шлифовального круга, равной 17 м/с (рис. 3, *a*), шероховатость обработанной поверхности составляет 0,141 мкм при твердости 60...63 HRC. Так как на малой скорости увеличивается время воздействия алмазных зерен круга на шлифуемую поверхность, увеличивается и ее шероховатость. В микроструктуре передней поверхности инструмента из быстрорежущей стали выявлены увеличенные в среднем на 40 % отдельные карбидные частицы, режущая кромка неровная, с вырывами.

Уменьшение мгновенного сечения среза на скорости круга, равной 35 м/с (рис. 3, *б*), снижает шероховатость поверхности до 0,070 мкм. При возросшей скорости уменьшается мгновенное сечение среза, снижается вероятность появления прижогов. В совокупности с небольшой величиной тока правки, равной 0,17 А/см², это позволит уменьшить шероховатость обработанной поверхности в среднем на 30...40 % и повысить ее твердость до 67...70 HRC без ущерба для режущей кромки, что предотвратит появление дефектного слоя.



а

б

Рис. 2. Состояние поверхности после комбинированной электроалмазной обработки:

а – $V = 35$ м/с; $S = 1,5$ м/мин; $t = 0,01$ мм/дв. ход; $i_{пп} = 0,25$ А/см²; $i_{тп} = 6,25$ А/см²; $R_a = 0,061$ мкм; 56...58 HRC;
 б – $V = 35$ м/с; $S = 1,5$ м/мин; $t = 0,03$ мм/дв. ход; $i_{пп} = 0,25$ А/см²; $i_{тп} = 6,25$ А/см²; $R_a = 0,175$ мкм; 65 HRC

Fig. 2. Microstructure of the sample surface after combined electric diamond grinding:

а – $V = 35$ м/с; $S = 1.5$ м/мин; $t = 0.01$ мм/doub. st; $i_{ed} = 0.25$ А/см²; $i_{et} = 6.25$ А/см²; $R_a = 0.061$ μm; 56...58 HRC;
 б – $V = 35$ м/с; $S = 1.5$ м/мин; $t = 0.03$ мм/doub. st; $i_{ed} = 0.25$ А/см²; $i_{et} = 6.25$ А/см²; $R_a = 0.175$ μm; 65 HRC

Заклучение

Исследование влияния технологических режимов комбинированной электроалмазной обработки на характер изменений поверхностного слоя инструмента из быстрорежущей стали позволило сформулировать следующие выводы.

1. Наилучшим сочетанием режимов, при обработке на которых отсутствуют сигнальные признаки дефектного слоя и сохраняется высокое качество металлорежущего инструмента из быстрорежущей стали, следует считать: $V = 35$ м/с;

$S = 1,5$ м/мин; $t = 0,02$ мм/дв. ход; $i_{пп} = 0,25$ А/см²; $i_{тп} = 6,25$ А/см².

2. Отмечено, что при обработке на рекомендуемых нами рациональных режимах дефекты на обработанной поверхности минимальны, режущая кромка имеет сколы порядка 3...5 мкм, размер карбидных частиц составляет, в среднем 2...5 мкм. Шероховатость передней поверхности в среднем на 30...40 % меньше и составляет 0,070 мкм. Достижимая при этом твердость 67...70 HRC на 6 % превышает исходную, так как обрабатываемая поверхность ослабляется

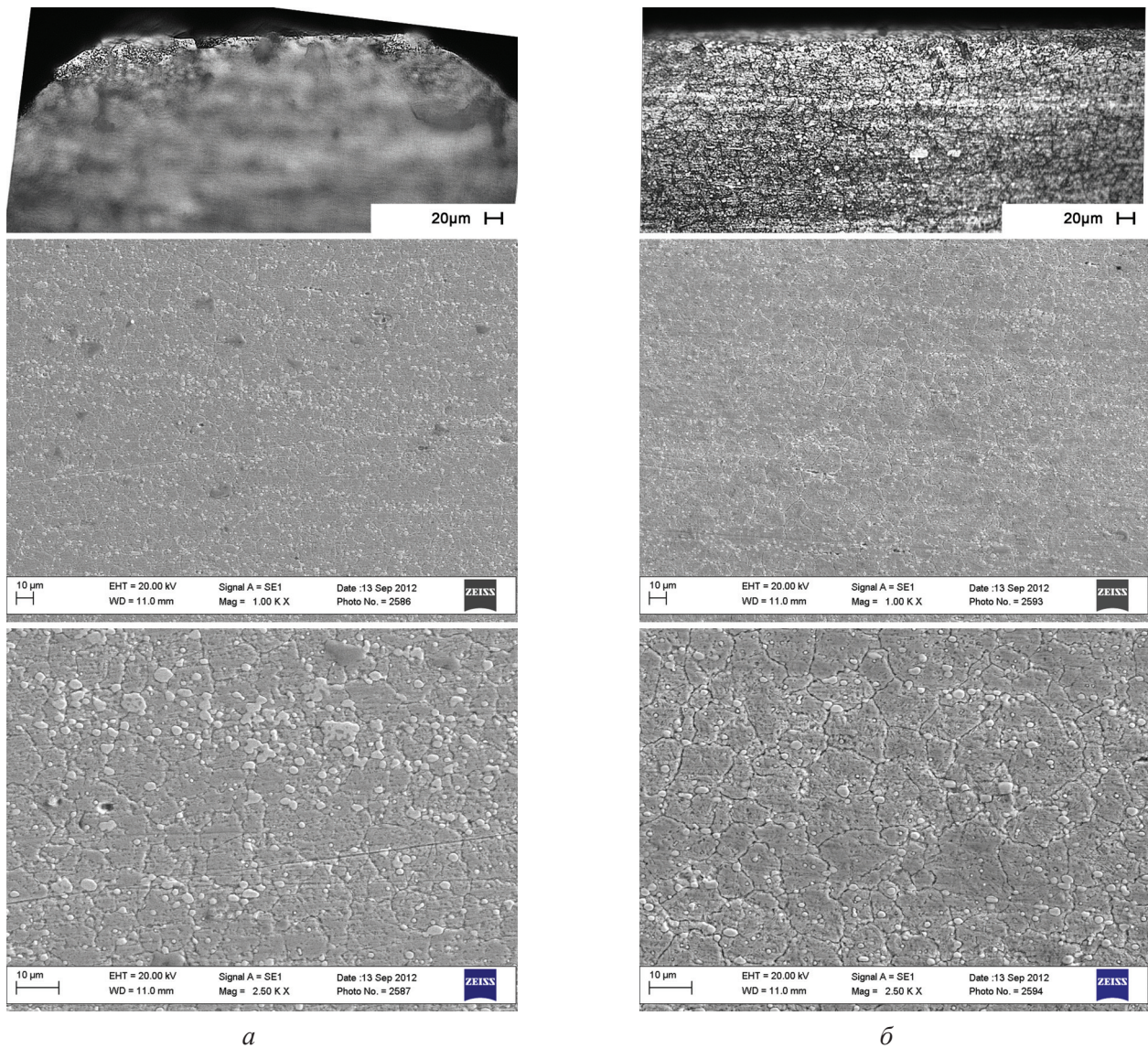


Рис. 3. Состояние поверхности после комбинированной электроалмазной обработки:

a – $V = 17$ м/с; $S = 1,5$ м/мин; $t = 0,02$ мм/дв. ход; $i_{пп} = 0,25$ А/см²; $i_{тп} = 6,25$ А/см²; $R_a = 0,141$ мкм; 60...63 HRC;
б – $V = 35$ м/с; $S = 1,5$ м/мин; $t = 0,02$ мм/дв. ход; $i_{пп} = 0,17$ А/см²; $i_{тп} = 6,25$ А/см²; $R_a = 0,070$ мкм; 67...70 HRC

Fig. 3. Microstructure of the sample surface after combined electric diamond grinding:

a – $V = 17$ m/s; $S = 1.5$ m/min; $t = 0.02$ mm/doub.st; $i_{cd} = 0.25$ A/cm²; $i_{et} = 6.25$ A/cm²; $R_a = 0.141$ µm; 60...63 HRC;
б – $V = 35$ m/s; $S = 1.5$ m/min; $t = 0.02$ mm/doub.st; $i_{cd} = 0.17$ A/cm²; $i_{et} = 6.25$ A/cm²; $R_a = 0.070$ µm; 67...70 HRC

электрохимическим процессом и без усилий срезаются самозатачиваемыми в результате непрерывной правки круга алмазными зернами, которые вызывают напряжения сжатия в поверхностном слое.

Список литературы

1. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 230 с. – ISBN 5-94275-092-0.
2. Popov V.Y., Yanyushkin A.S. Adhesion-diffusion interaction of contact surfaces with the treatment

diamond grinding wheels // Eastern European Scientific Journal. – 2014. – N 2. – P. 301–310. – doi: 10.12851/EESJ201404ART46.

3. Badger J., Murphy S., O'Donnell G.E. Loading in grinding: chemical reactions in steels and stainless steels // Advanced Materials Research. – 2010. – Vol. 126–128. – P. 597–602. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.126-128.597.

4. Handbook of machining with grinding wheels / I.D. Marinescu, M.P. Hitchiner, E. Uhlmann, W.B. Rowe, I. Inasaki. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 724 p. – ISBN: 978-1482206685.



5. Grzesik W., Kruszynski B., Ruszaj A. Surface integrity of machined surfaces // Surface integrity in machining / ed. by J. Davim. – London: Springer, 2010. – P. 143–179.

6. The impact of grinding on surface integrity of powder-metallurgy high-speed steel (S390) / S.H. Mu, S.L. Cao, X.L. Zhang, Z. Xiang, X. Mao // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 442. – P. 52–57. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.442.52.

7. Influence of pulsed magnetic treatment on microstructures and mechanical properties of M42 high speed steel tool / L. Ma, Z. Liang, X. Wang, W. Zhao, L. Jiao, Z. Liu // Acta Metall. – 2015. – Vol. 51 (3). – P. 307–314. – doi: 10.11900/0412.1961.2014.00295.

8. Chaus A.S. Structural and phase changes in carbides of the high-speed steel upon heat treatment // The Physics of Metals and Metallography. – 2016. – Vol. 117 (7). – P. 684–692. – doi: 10.1134/S0031918X16070048.

9. Morphology and microstructure of M_2C carbide formed at different cooling rates in AISI M2 high speed steel / X.F. Zhou, F. Fang, F. Li, J.Q. Jiang // Journal of Materials Science. – 2011. – Vol. 46 (5). – P. 1196–1202. – doi: 10.1007/s10853-010-4895-4.

10. Microstructural characterization of carbides in a cast high-speed steel using different metallographic techniques / S. Gümüş, S.H. Atapek, S. Polat, E. Erisir, A. Alkan // Praktische Metallographie. – 2012. – Vol. 49 (12). – P. 767–781. – doi: 10.3139/147.110202.

11. Particularities of grinding high speed steel punching tools / P. Krajnik, R. Drazumeric, J. Badger, J. Kopac, C. Nicolescu // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 325. – P. 177–182. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.325.177.

12. Lao Q.C., Shang Z.Y. Experimental study on cooling-air grinding of high speed steel // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 288. – P. 308–312. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.288.308.

13. Morphology, microstructure and decomposition behavior of M_2C carbides in high speed steel / X. Zhou, D. Liu, W.-l. Zhu, F. Fang, Y.-y. Tu, J.-g. Jiang // Journal of Iron and Steel Research. – 2017. – Vol. 24 (1). – P. 43–49. – doi: 10.1016/S1006-706X(17)30007-9.

14. Phase transformation study of a high speed steel powder by high temperature X-ray diffraction / M. Wiessner, M. Leisch, H. Emminger, A. Kulmburg // Materials Characterization. – 2008. – Vol. 59 (7). – P. 937–943. – doi: 10.1016/j.matchar.2007.08.002.

15. Bosheh S.S., Mativenga P. White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2006. – Vol. 46 (2). – P. 225–233. – doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.04.009.

16. Simulation study on high-speed grinding with single CBN grain / J. Zhang, Q. Wang, J. Guo, Y. Wang // Diamond and Abrasives Engineering. – 2017. – Vol. 37 (4). – P. 1–5. – doi: 10.13394/j.cnki.jgszz.2017.4.0001.

17. Ungureanu C., Ibănescu R. Experimental investigation on AECM of high speed steel // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 657. – P. 221–225. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.657.221.

18. Vijayan K., Gouthaman N., Rathinam T. A study on the parameters in hard turning of high speed steel // International Journal of Materials Forming and Machining Processes. – 2018. – Vol. 5 (2). – P. 1–12. – doi: 10.4018/IJMFMP.2018070101.

19. 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.

20. 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/mateconf/201712901002.

21. Медведева О.И., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Влияние параметров электроалмазного шлифования твердых сплавов на величину растворенного слоя // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 3 (64). – С. 68–75.

Конфликт интересов

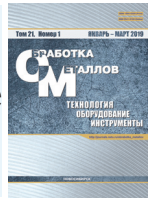
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



The Study of the Surface Quality of High-Speed Steel Tool after the Combined Electric Diamond Grinding

Vyacheslav Popov^{a,*}, Daniil Rychkov^b, Pavel Arkhipov^c,
Alexey Kuznetsov^d, Egor Losev^e, Nikolay Selin^f

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

^a <http://orcid.org/0000-0001-6299-9161>, berkutoff@rambler.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0002-9323-7693>, dielektrik84@mail.ru,
^c <http://orcid.org/0000-0003-0390-8367>, pavded@yandex.ru, ^d <http://orcid.org/0000-0001-7095-3075>, predalex@yandex.ru,
^e <http://orcid.org/0000-0002-1530-3739>, _elk_@mail.ru, ^f <http://orcid.org/0000-0001-5041-826X>, selin138@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13 September 2018

Revised: 28 November 2018

Accepted: 10 December 2018

Available online: 15 March 2019

Keywords:

M2
 High-speed steel
 Metal cutting tools
 Surface quality
 Diamond grinding wheels
 Combined electric diamond grinding

ABSTRACT

Purpose. The use of diamond grinding wheels on a metal bond for grinding high-speed steels is recommended by most literature sources using electrophysical, electrochemical, or combined processing methods. At the same time, it is recommended to limit the field of application to the final circular grinding, due to the appearance of a defective layer on the processed surface. Its signal features include systematic chips along the cutting edge and microchips on the front surface of the samples, the size of carbide particles, individual craters or holes in the front surface, a decrease in hardness and an increase in the height of asperity profile. This paper is devoted to the determination of such technological regimes of the combined electric diamond processing of tools made of high-speed steel M2, when grinding, on which there would be no signal signs of the defect layer. The solution to this problem will allow expanding the scope of application of diamond grinding wheels on a metal bond when processing tool steels. The subject of research is the condition of the surface and cutting edge of high-speed plates of metal-cutting tools, depending on the technological modes of the combined electric diamond grinding (CEDG). The purpose of the work is to study the influence of the technological modes of CEDG on the nature of changes to the surface layer of high-speed steel tools. **Materials and methods.** The grinding operation is carried out on a universal sharpening machine, model 3D642E, modernized under the technology of CEDG. The following grinding diamond cup on a metal bond is used: AC6 80/63 M1 100%. The electrical parameters, studied in this range, are: $i_{pr} = 0.17 \dots 0.25$ A/cm²; $i_{tr} = 3.125 \dots 9.375$ A/cm², respectively. Mechanical parameters, studied in this range, are: $V = 17 \dots 35$ m/s; $t = 0.01 \dots 0.03$ mm/doub.st; $S = 1.5$ m/min. Grinding is performed using standard electrolyte: NaNO₃ – 3 %, NaNO₂ – 1 %, Na₂CO₃ – 0.5 %, and the rest is water. Microstructural studies are performed on microsections of the samples after etching. The surface quality is studied using scanning electron microscopy (Carl Zeiss EVO50 XVP); light microscopy (METAM LV-42); roughness is determined using a profilograph-profilometer (Abris-PM7); HRC hardness is determined using a hardness tester (600 MRD). **Results and discussion.** It has been established that the best combination of technological modes, which guarantee the absence of signal signs of a defective layer and the high quality of metal-cutting tools made of high-speed steel is maintained, are the following: $V = 35$ m/s; $S = 1.5$ m/min; $t = 0.02$ mm/doub.st; $i_{pr} = 0.25$ A/cm²; $i_{tr} = 6.25$ A/cm². It is found that when processing in the recommended modes, the cutting edge is even with shallow notches, the size of carbide particles is, on average, 2...5 μm. The established modes make it possible to obtain a roughness of the front surface $R_a = 0.070$ μm. It is found that the obtained hardness is 6 % higher than the initial hardness and is 67...70 HRC.

For citation: Popov V.Yu., Rychkov D.A., Arkhipov P.V., Kuznetsov A.M., Losev E.D., Selin N.V. The study of the surface quality of high-speed steel tool after the combined electric diamond grinding. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 6–15. doi: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-6-15. (In Russian).

References

1. Yanyushkin A.S., Shorkin V.S. *Kontaktnye protsessy pri elektroalmaznom shlifovanii* [Contact processes in electro-diamond grinding]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2004. 230 c. ISBN 5-94275-092-0.

* Corresponding author

Popov Vyacheslav Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Bratsk State University,
 40 Makarenko st.,
 665709, Bratsk, Russian Federation
 Tel.: 8 (950) 107-20-16, e-mail: berkutoff@rambler.ru



2. Popov V.Y., Yanyushkin A.S. Adhesion-diffusion interaction of contact surfaces with the treatment diamond grinding wheels. *Eastern European Scientific Journal*, 2014, no. 2, pp. 301–310. doi: 10.12851/EESJ201404ART46.
3. Badger J., Murphy S., O'Donnell G.E. Loading in grinding: chemical reactions in steels and stainless steels. *Advanced Materials Research*, 2010, no. 126–128, pp. 597–602. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.126-128.597.
4. Marinescu I.D., Hitchiner M.P., Uhlmann E., Rowe W.B., Inasaki. *Handbook of machining with grinding wheels*. Boca Raton, CRC Press, 2016. 724 p. ISBN 978-1482206685.
5. Grzesik W., Kruszynski B., Ruszaj A. surface integrity of machined surfaces. *Surface integrity in machining*. Ed. by J. Davim. London, Springer, 2010, pp. 143–179.
6. Mu S.H., Cao S.L., Zhang X.L., Xiang Z., Mao X. The impact of grinding on surface integrity of powder-metallurgy high-speed steel (S390). *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 442, pp. 52–57. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.442.52.
7. Ma L., Liang Z., Wang X., Zhao W., Jiao L., Liu Z. Influence of pulsed magnetic treatment on microstructures and mechanical properties of M42 high speed steel tool. *Acta Metall*, 2015, vol. 51 (3), pp. 307–314. doi: 10.11900/0412.1961.2014.00295.
8. Chaus A.S. Structural and phase changes in carbides of the high-speed steel upon heat treatment. *The Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117 (7), pp. 684–692. doi: 10.1134/S0031918X16070048.
9. Zhou X.F., Fang F., Li F., Jiang J.Q. Morphology and microstructure of M_7C_3 carbide formed at different cooling rates in AISI M2 high speed steel. *Journal of Materials Science*, 2011, vol. 46 (5), pp. 1196–1202. doi: 10.1007/s10853-010-4895-4.
10. Gümüş S., Atapek S.H., Polat S., Erisir E., Alkan A. Microstructural characterization of carbides in a cast high-speed steel using different metallographic techniques. *Praktische Metallographie*, 2012, vol. 49 (12), pp. 767–781. doi: 10.3139/147.110202.
11. Krajnik P., Drazumeric R., Badger J., Kopac J., Nicolescu C. Particularities of grinding high speed steel punching tools. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 325, pp. 177–182. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.325.177.
12. Lao Q.C., Shang Z.Y. Experimental study on cooling-air grinding of high speed steel. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 288, pp. 308–312. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.288.308.
13. Zhou X., Liu D., Zhu W.-l., Fang F., Tu Y.-y., Jiang J.-q. Morphology, microstructure and decomposition behavior of M_7C_3 carbides in high speed steel. *Journal of Iron and Steel Research*, 2017, vol. 24 (1), pp. 43–49. doi: 10.1016/S1006-706X(17)30007-9.
14. Wiessner M., Leisch M., Emminger H., Kulmburg A. Phase transformation study of a high speed steel powder by high temperature X-ray diffraction. *Materials Characterization*, 2008, vol. 59 (7), pp. 937–943. doi: 10.1016/j.matchar.2007.08.002.
15. Bosheh S.S., Mativenga P. White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, vol. 46 (2), pp. 225–233. doi: 10.1016/j.ijmactools.2005.04.009.
16. Zhang J., Wang Q., Guo J., Wang Y. Simulation study on high-speed grinding with single CBN grain. *Diamond and Abrasives Engineering*, 2017, vol. 37 (4), pp. 1–5. doi: 10.13394/j.cnki.jgszz.2017.4.0001.
17. Ungureanu C., Ibănescu R. Experimental investigation on AECM of high speed steel. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 657, pp. 221–225. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.657.221.
18. Vijayan K., Gouthaman N., Rathinam T. A study on the parameters in hard turning of high speed steel. *International Journal of Materials Forming and Machining Processes*, 2018, vol. 5 (2), pp. 1–12. doi: 10.4018/IJMFMP.2018070101.
19. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Skeebe V.Yu., Gartfelder V.A., Sekletina L.S. Povyshenie effektivnosti almaznogo instrumenta na metallicheskoj svyazke pri shlifovanii vysokoprochnykh materialov [Enhancing the effectiveness of the diamond metal bond instrument when grinding high-strength materials]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017, no. 3 (76), pp. 17–27. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-17-27.
20. 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/mateconf/201712901002.
21. Medvedeva O.I., Yanyushkin A.S., Popov V.Yu. Vliyanie parametrov elektroalmaznogo shlifovaniya tverdykh splavov na velichinu rastvorenogo sloya [An influence of hard alloys electro-diamond grinding parameters on the amount of dissolved material]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2014, no. 3 (64), pp. 68–75.

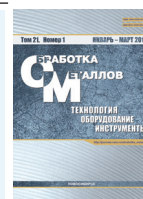
Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Повышение надежности работы тяговых электродвигателей локомотивов за счет применения электроискровой обработки коллекторных пластин

Юрий Титов^{1, а, *}, Дмитрий Белан^{2, б}, Георгий Тодер^{2, в}, Анна Отраднова^{2, д}

¹ Омский государственный технический университет, пр. Мира, 11, г. Омск, 644050, Россия

² Омский государственный университет путей сообщения, пр. К. Маркса, 35, г. Омск, 644046, Россия

^а <http://orcid.org/0000-0002-6454-8310>, tyrin-88@mail.ru, ^б <http://orcid.org/0000-0002-7168-103X>, Baltazar.13@mail.ru,

^в <http://orcid.org/0000-0001-5000-7137>, georgyt@mail.ru, ^д <https://orcid.org/0000-0001-7801-753X>, anna3812_88@mail.ru,

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 629.423.31

История статьи:

Поступила: 21 октября 2018

Рецензирование: 15 января 2019

Принята к печати: 29 января 2019

Доступно онлайн: 15 марта 2019

Ключевые слова:

Тяговый электродвигатель

Коллектор

Генератор импульсов

Углерод

Электроискровая обработка

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из важнейших задач локомотиворемонтного производства российских железных дорог является повышение срока службы подвижного состава: локомотивов и вагонов. В данной статье рассматривается применение новой методики ремонта коллекторно-щеточного узла электровоза, что позволит улучшить коммутационные характеристики, повысить надежность работы тяговых электродвигателей (ТЭД) и увеличить время эксплуатации всего электровоза в целом. **Целью работы** является повышение надежности работы и ресурса ТЭД-электровозов. **Методы исследования.** Для снижения коэффициента трения между пластинами коллектора и щетками и повышения срока службы коллекторно-щеточного узла предлагается выполнять науглероживание поверхностного слоя медных пластин коллектора методом электроискровой обработки (ЭИО). Метод электроискровой обработки, по сравнению с традиционными механическими методами ремонта тяговых электродвигателей, является более предпочтительным, так как позволяет повысить износостойкость контактной поверхности коллекторных пластин, что обеспечивает требуемые эксплуатационные свойства и повышает надежность работы коллекторно-щеточного узла. **Результаты.** В статье предложен технологический процесс выполнения ремонта коллектора электродвигателя, отличающийся применением электроискровой обработки с формированием углеродистого поверхностного слоя на контактной поверхности коллектора. Представлено устройство для формирования углеродистого слоя на рабочей поверхности коллектора тяговых электродвигателей посредством электроискровой обработки. Даны результаты атомно-эмиссионного спектрального анализа науглероженного медного образца, которые показали, что доля углерода в науглероженном медном образце повысилась на 0,1 % по сравнению с медной пластиной, не подвергавшейся электроискровой обработке. Представлена оценочная модель зависимости глубины композиционного слоя от напряжения, подаваемого на электроды. **Обсуждение.** Представленная в статье оценочная модель позволяет: 1) произвести предварительный оценочный расчет зависимости глубины и толщины слоев, образующих композиционную структуру поверхности, подвергшейся ЭИО, от подаваемого на электроды напряжения; 2) на основании этого расчета провести экспериментальную ЭИО поверхности коллектора ТЭД с регулированием толщины и глубины слоев посредством описанной методики; 3) экспериментально определить режимы обработки для исследуемых образцов.

Для цитирования: Повышение надежности работы тяговых электродвигателей локомотивов за счет применения электроискровой обработки коллекторных пластин / Ю.В. Титов, Д.Ю. Белан, Г.Б. Тодер, А.О. Отраднова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 16–24. – doi:10.17212/1994-6309-2019-21.1-16-24.

Введение

Одна из важнейших проблем современных российских железных дорог – повышение эффективности локомотиворемонтного производства [1–3]. Применение прогрессивных техно-

логий технического обслуживания и ремонта локомотивов позволит в некоторой степени решить эту проблему.

Поэтому разработка и внедрение новых способов ремонта оборудования, результатом применения которых стало бы значительное увеличение срока эксплуатации подвижного состава: электровозов, тепловозов, вагонов – актуальная задача локомотивного хозяйства. Тяговый электродвигатель (ТЭД) – одна из самых важных

*Адрес для переписки

Титов Юрий Владимирович, ассистент

Омский государственный технический университет

пр. Мира, 11, 644050, г. Омск, Россия

Тел.: +7 (913) 681-56-64, e-mail: tyrin-88@mail.ru

частей электровоза. Надежность работы двигателя в основном связана с исправностью коллекторно-щеточного узла (КЩУ) [4]. Физическим и химическим воздействиям и разнообразным разрушениям в большей степени подвержен коллектор ТЭД. Поэтому поверхность коллектора является наиболее уязвимым звеном КЩУ. Состояние ТЭД, как и других электрических машин постоянного тока (ЭМПТ), определяется при визуальном контроле контактной поверхности щеток и коллектора.

Коллектор ТЭД, находящийся в идеальных условиях эксплуатации, должен иметь на контактной поверхности коллекторных пластин с электрографитными щетками гляцевую пленку (политуру) повышенной твердости, которая значительно снижает износ коллекторных пластин и повышает коммутационную устойчивость ЭМПТ [4]. Разрушение политуры приводит к повышенному износу коллектора, а следовательно, к ухудшению коммутационных свойств ЭМПТ и, как следствие, необходимости осуществления ремонта КЩУ. Замена всего КЩУ происходит согласно технологическому процессу (ТП) ремонта только при достижении минимальных допустимых конструкционных размеров, ниже которых эксплуатация данного узла запрещена. В противном случае в отсутствие иных неисправностей замена экономически неэффективна, так как остальные детали КЩУ имеют значительно больший ресурс работы. Поэтому при ремонте ТЭД, как правило, осуществляются определяемые по ТП виды ремонта электровоза в заданном объеме. Осуществляемая механическая обработка коллектора направлена на восстановление требуемых эксплуатационных и технологических параметров ЭМПТ: шероховатость контактной поверхности коллектора – не более 3,2 мкм; эксцентриситет – не более 8 мкм; биение – не более 0,08 мм.

Большинство применяемых при ремонте КЩУ механических, электрофизических и электрохимических, физико-химических методов разработаны на основе современных достижений науки и техники [5–21]. Самым распространенным способом ремонта коллекторных пластин остается механическая обработка поверхности, имеющая ряд существенных недостатков: уменьшение диаметрального размера коллектора, износ режущего инструмента,

высокая шероховатость поверхностей (более 3,2 мкм).

Таким образом, целью данной работы является повышение надежности работы и ресурса ЭМПТ, и в частности ТЭД-электровозов. Для достижения поставленной цели необходимо провести анализ существующего технологического процесса ремонта и обосновать эффективность совершенствования технологии ремонта ТЭД за счет внедрения дополнительной операции ЭИО.

Методика исследований

Современные методы формообразования поверхностей при изготовлении деталей основаны на различных физико-химических процессах и частично могут быть лишены недостатков, присущих обработке резанием, но при ремонте коллекторов ТЭД их не применяют главным образом по причине несоответствия нормативной документации.

Известным фактом является то, что коэффициент трения между графитовыми поверхностями в несколько раз меньше, чем между медной и графитовой поверхностью [16]. Поэтому повышение содержания углерода в поверхностном слое коллекторных пластин (которые выполняются из меди) может продлить срок службы КЩУ за счет снижения силы трения в этом узле. Повысить содержание углерода возможно за счет нанесения углеродистых покрытий.

Для обработки коллекторов ТЭД наиболее перспективным электрофизическим методом считается метод, относящийся к группе электроэрозионных методов электроискровой обработки (ЭИО), в котором применяется угольный анод. Принцип метода ЭИО заключается в переносе вещества угольного электрода (анода) на поверхность медных пластин коллектора (катода) во время электрических разрядов [17, 19, 20]. Основные преимущества метода ЭИО следующие:

- практически точечное покрытие заготовки (радиусом менее миллиметра);
- перенос большого количества вещества в нужную область обрабатываемой поверхности (60...80 %);
- отсутствие необходимости специальной защиты необрабатываемой поверхности заготовки.

Таким образом, метод ЭИО можно применять в целях повышения содержания углерода в поверхностном слое медных пластин коллектора.

Для учета ТП ремонта ЭМПТ предлагается, наряду с операциями сборки и разборки, реализовать следующий порядок выполнения операций.

1. Обточить коллектор на специализированном токарном станке.

2. Осуществить продорожку коллекторных пластин.

3. ЭИО с формированием углеродистого поверхностного слоя на катоде, которым служит коллекторная пластина.

4. Отделочные операции.

В процессе ЭИО к катоду подводится угольный анод, на последний от генератора импульс подается напряжение 1500...3000 В. Частота сигналов составляет 100 Гц. Подводя анод к пластине, мы можем наблюдать прямой полярный эффект [18]: короткий искровой разряд вблизи пластины, продолжительность которого $10^{-6} \dots 10^{-3}$ с, а также съём и перенос на пластину некоторого объема графита. Таким образом, микрочастицы угольного электрода внедряются в поверхность обрабатываемой пластины, в результате чего уменьшится коэффициент трения между пластинами и щетками. Кроме того, материал электрода практически не разрушается под действием разрядов, поэтому его можно эффективно использовать, многократно повторяя разряд при перемещении анода вдоль пластины.

ЭИО медных коллекторных пластин позволит сформировать на обработанной поверхности композиционный слой с улучшенными физико-химическими и механическими свойствами.

Оценка и сравнение полученных после ЭИО свойств поверхностного слоя пластины была осуществлена в результате эксперимента с медным образцом марки М2 на установке с позиционированием электродов относительно поверхности коллектора электрической машины [9, 18].

Результаты и их обсуждение

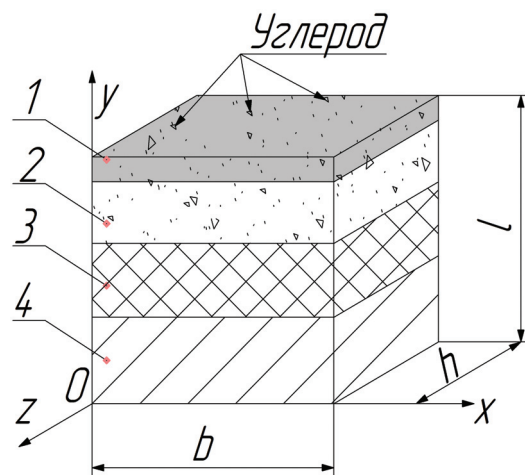
После выполнения ЭИО медного образца установлено, что значение шероховатости обработанной поверхности достигает показателя R_a 0,3 мкм при регламентированной ТП ремонта 1,6 мкм. Таким образом, внедрение дополнительной операции ЭИО в ТП и сокращение базовых отделочных операций (исключение шлифования

и снижение времени на полирование) позволит сократить технологический процесс ремонта ТЭД и улучшить качество поверхности коллектора ЭМПТ (шероховатость поверхности не более 1,6 мкм).

Анализ полученных данных новой композиционной структуры показал, что глубина внедрения углерода в медный образец коллекторной пластины ТЭД ГЛ-2К1 составила порядка 3...4 мкм. Данные измерения производились на микроскопе JSM-5700 для микроструктурного анализа металлов и сплавов.

Определение содержания углерода в медном образце после выполнения ЭИО производилось с помощью атомно-эмиссионного спектрального анализа. Результаты исследований показали, что массовая доля углерода в образце увеличилась на 0,1 %.

Поскольку в области обработки выделяется значительная тепловая энергия, обработанная поверхность приобретает новую структуру, которую можно считать (в соответствии с экспериментальными данными) композиционной. Эта структура образована несколькими расположенными одна под другой зонами (слоями): 1) верхней; 2) диффузионной; 3) зоной, подвергшейся термическому воздействию (см. рисунок).



Структура контактной области коллекторной пластины ТЭД, подвергшейся ЭИО.

Зоны:

1 – верхняя; 2 – диффузионная; 3 – термического влияния; 4 – не подвергшееся изменениям вещество

The structure of contact element of the traction motor collector plate subjected to electrical discharge machining:

1 – top layer; 2 – diffusion zone; 3 – zone of thermal influence; 4 – base metal

Нормальное функционирование ЭМПТ обеспечивается при шероховатости коллекторной пластины не более 0,8 мкм, одинаковой толщине сформированного композиционного слоя и равномерном распределении углерода в этом слое. Зная зависимость толщины композиционного слоя от различных параметров ЭИО, можно посредством регулировки этих параметров с помощью предложенной установки [7] обеспечивать постоянство толщины слоя вдоль всей поверхности.

Одним из параметров ЭИО, который можно регулировать, является напряжение между электродами. С целью определения зависимости глубины композиционного слоя l_1 от напряжения между электродами U предлагается следующая физическая модель.

Так как подаваемый на электроды импульс имеет прямоугольную форму, напряжение электрического поля между электродами будем считать постоянным, но резко возрастающим в начале и резко убывающим в конце движения. При постоянной скорости движения анода относительно катода v_A с течением времени расстояние между анодом и заготовкой линейно убывает, а напряженность электрического поля между катодом и анодом линейно возрастает.

Внешнее электрическое поле между электродами индуцирует ток электронов катода из приповерхностных слоев к поверхности в узкой области вблизи обрабатываемого участка поверхности. Следовательно, избыточные электроны создают в поверхностном слое меди переменное электрическое поле, стремящееся скомпенсировать внешнее поле между катодом и анодом, модуль напряженности которого пропорционален модулю напряженности внешнего поля, с одной стороны, и поверхностной плотности заряда, сформированного электронами поверхностного слоя, – с другой. Поэтому поверхностная плотность заряда, концентрация электронов и связанная с концентрацией через подвижность удельная проводимость вблизи обрабатываемого участка заготовки также линейно возрастают с приближением анода.

Пусть δ – очень малое время, в течение которого внешнее поле выключается, напряженность результирующего электрического поля в обрабатываемой области катода резко обращается в нуль, и электрический ток в области контакта прекращается. Тогда, согласно зако-

нам Джоуля–Ленца и Ома в дифференциальной форме, количество теплоты, выделившееся при прохождении импульсного тока, прямо пропорционально U^3 между электродами, обратно пропорционально v_A^3 сближения электродов и δ^2 продолжительности прекращения тока:

$$Q \sim \frac{\varepsilon_0 U^3}{v_A^3 \varepsilon^2}, \quad (1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума), а коэффициент пропорциональности зависит от свойств меди и формы области протекания тока.

Количество теплоты, которое выделяется в результате прохождения тока, расходуется: 1) на нагревание приконтактной области поверхности заготовки, структура которой изменяется в результате обработки, – верхнего слоя, диффузионной зоны и зоны термического влияния; 2) на плавление внутренней части этой области – верхнего слоя и диффузионной зоны:

$$Q' = \eta Q. \quad (2)$$

Коэффициент $\eta < 1$ учитывает потери теплоты на нагревание окружающей среды – воздуха и областей коллекторной пластины, в которых после воздействия импульсного тока изменения структуры несущественны или отсутствуют.

Пусть c_m – удельная теплоемкость; λ – удельная теплота плавления; ρ – плотность меди; $\Delta T = T' - T$ – повышение температуры рассматриваемой зоны; T' – температура плавления меди (при этом принимается допущение, что температура в зоне термического влияния в отличие от зоны, не подвергшейся влиянию, достигает температуры плавления с учетом возможного перегрева и измеряется экспериментально); T – начальная температура меди (температура окружающей среды); l_3 – максимальная глубина зоны термического влияния; l_2 – максимальная глубина диффузионной зоны. Считается приближенно, что зона влияния процесса обработки состоит из нескольких сферических или цилиндрических слоев различной толщины с различными физико-химическими свойствами. Обозначим измеряемое в эксперименте отношение $l_3 / l_2 = \kappa < 1$. Тогда, учитывая выражения (1) и (2), получим соотношение для максимальной глубины диффузионной зоны и максимальной глубины зоны термического влияния:

$$l_3 = \gamma \frac{U}{v_A} \left[\frac{\varepsilon_0}{\left(\frac{c_m \Delta T}{\kappa^3} + \lambda \right) \rho} \right]^{1/3}; \quad (3)$$

$$l_2 = l_3 / \kappa = \gamma \frac{U}{\kappa v_A} \left[\frac{\varepsilon_0}{\left(\frac{c_m \Delta T}{\kappa^3} + \lambda \right) \rho} \right]^{1/3}, \quad (4)$$

где определяемый экспериментально коэффициент γ описывает свойства заготовки и установки, в частности, зависит от формы слоя, подвергнутого влиянию при обработке, размеров области, в которой протекает ток, подвижности электронов заготовки, времени, в течение которого прерывается ток, величины тепловых потерь.

Формулы (3) и (4) в рамках описанной модели выражают теоретическую зависимость максимальной глубины получаемых в результате ЭИО диффузионной зоны и зоны термического влияния от величины подаваемого на электроды напряжения, скорости анода (или времени протекания тока).

В результате сопоставления результатов экспериментов с результатами расчетов по выведенным зависимостям (формулы (3) и (4)) установлено, что расхождение между ними не превышало относительной погрешности $\pm 5\%$. Измерения максимальной глубины диффузионной зоны и максимальной глубины зоны термического влияния производились на микроскопе JSM-5700 для микроструктурного анализа металлов и сплавов.

Выводы

Описанный в работе метод ЭИО поверхности эффективнее применяемых в настоящее время в подавляющем большинстве локомотивных ремонтных депо механических методов ремонта ТЭД, так как включает в себя повышение износостойкости поверхности коллекторных пластин ЭМПТ, а следовательно, позволяет получить требуемые эксплуатационные свойства поверхностного слоя и повысить надежность работы КЩУ, о чем свидетельствуют полученные результаты атомно-эмиссионного спектрального анализа медного образца, подвергнутого ЭИО.

За счет применения ЭИО в поверхностный слой коллекторных пластин можно внедрить графит, что улучшит коммутационные свойства, а следовательно, повысит ресурс работы ТЭД и

увеличит эксплуатационную надежность локомотивов в целом.

В статье проведен анализ существующего технологического процесса ремонта, обосновано внедрение дополнительной операции электроискрового легирования в ТП ремонта коллектора ТЭД с дальнейшим применением отделочных операций при необходимости. Сокращение в ТП отделочных операций и применение операции ЭИО позволит уменьшить затрачиваемое время ремонта ТЭД и снизить шероховатость контактной поверхности коллектора ЭМПТ до величины менее R_a 1,6 мкм.

Представленная в работе оценочная теоретическая модель позволяет: 1) произвести предварительный расчет глубины и толщины слоев, образующих композиционную структуру поверхности, подвергнутой ЭИО, при известном подаваемом на электроды напряжении; 2) на основе полученных результатов, провести экспериментальную ЭИО поверхности коллектора ТЭД с регулированием толщины и глубины слоев посредством описанной методики; 3) экспериментально определить значения параметров модели (коэффициентов κ и γ) для исследуемых образцов.

Список литературы

1. Распоряжение президента ОАО «РЖД» от 17.01.2005 № 3р «О системе технического обслуживания и ремонта локомотивов». – М.: ОАО «РЖД», 2005. – 8 с.
2. Распоряжение президента ОАО «РЖД» от 13.01.2006 № 181 «Дополнительные меры по повышению уровня обеспечения безопасности движения в локомотивном хозяйстве железных дорог ОАО «РЖД». – М.: ОАО «РЖД», 2006. – 7 с.
3. Поручение первого вице-президента ОАО «РЖД» от 26.08.2010 № П-ВМ-120 «Об оптимизации структуры и повышении эффективности локомотиворемонтного комплекса». – М.: ОАО «РЖД», 2010. – 6 с.
4. Авилов В.Д., Петров П.Г., Моисеенок Е.М. К вопросу о повышении коммутационной устойчивости коллекторных электрических машин постоянного тока [Электронный ресурс] // Известия Транссиба. – 2010. – № 2 (2). – С. 2–6. – URL: [http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2010-2\(2\).pdf](http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2010-2(2).pdf) (дата обращения: 01.02.2019).
5. Степанов Ю.С., Сотников В.И., Ткаченко А.Н. Экспериментальное исследование процесса комбинированной обработки точением и алмазным выгла-



живанием торцовых поверхностей деталей из меди [Электронный ресурс] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 8. – С. 43–48. – URL: http://www.mashin.ru/files/2012/utp8_12.pdf (дата обращения: 01.02.2019).

6. Трибологические характеристики покрытий, полученных электроискровым легированием с последующим лазерным упрочнением / Е.Э. Фельдштейн, М.А. Кардаполова, Р. Гайда, Б. Хородыски, О.В. Кавальчук // Трение и износ. – 2013. – Т. 34, № 2. – С. 175–180.

7. Влияние добавок нанодисперсного алмаза на свойства композиционного материала на основе бронзы / М.Н. Сафонова, П.П. Тарасов, А.С. Сыромятникова, А.А. Федотов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – № 5 (695). – С. 3–6.

8. Коэффициенты трения покоя и скольжения для пар наиболее распространенных материалов [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/Frication/FrictionToVariousPairs> (дата обращения: 01.02.2019).

9. Патент 137639 Российская Федерация, МПК Н 01 R 43/06 (2006.01). Установка для электроискровой обработки с позиционированием электродов относительно поверхности коллектора электрической машины / А.А. Кузнецов, Д.Ю. Белан, А.О. Отраднова, Т.В. Отраднова, И.В. Отраднова. – № 2013132790/07; заявл. 15.07.2013; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5.

10. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. Т. 1. Обработка материалов с применением инструмента / под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высшая школа, 1983. – 247 с.

11. *Sandeep K.* Current research trends in electrical discharge machining: a review [Electronic resource] // Research Journal of Engineering Sciences. – 2013. – Vol. 2 (2) – P. 56–60. – URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/93e1/7a1521161a361dc1600aa61618166f8de5e7.pdf> (accessed 01.02.2019).

12. *Nishiwaki N., Hori S., Natsu W.* Detection of electric discharge machining state by using ultrasonic technique [Electronic resource] // 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, 25–28 October 2008. – Shanghai: Shanghai Exhibition Center, 2008. – P. 1–6. – URL: <https://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/128.pdf> (accessed: 01.02.2019).

13. Nonlinear servomotor in single pulse simulation of electrical discharge machining system modeling [Electronic resource] / H. Lee, A. Yahya, N.H. Khamis, S. Samion // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2016. – Vol. 1,

N 2. – P. 319–328. – URL: https://www.researchgate.net/publication/299433312_Nonlinear_Servomotor_in_Single_Pulse_Simulation_of_Electrical_Discharge_Machining_System_Modeling (accessed: 01.02.2019).

14. *Equbal A., Sood A.K.* Electrical discharge machining: an overview on various areas of research [Electronic resource] // Journal of Manufacturing and Industrial Engineering (MIE). – 2014. – Vol. 13, N 1–2. – P. 1–6. – URL: <http://www.qip-journal.eu/index.php/MIE/article/view/339> (accessed: 01.02.2019).

15. *Choudhary A.K., Chhabra K.K.* Effect of control parameters in electrical discharge machining – a review [Electronic resource] // International Journal of R&D in Engineering Science and Management. – 2014. – Vol. 1, N 3. – P. 72–76. – URL: http://www.rndpublications.com/wp-content/uploads/2014/10/Paper_1oct.pdf (accessed: 01.02.2019).

16. *Gupta S., Singh G.* A review on fabrication of copper graphite composite material & its mechanical properties [Electronic resource] // International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education. – 2017. – Vol. 3, iss. 3. – P. 537–543. – URL: <http://www.ijariie.com/PastIssueSelected.aspx?VolumeId=18> (accessed: 01.02.2019).

17. *Ojha K., Garg R.K., Singh K.K.* MRR improvement in sinking electrical discharge machining: a review [Electronic resource] // Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. – 2010. – Vol. 9, N 8. – P. 709–739. – URL: http://file.scirp.org/pdf/JMMCE20100800004_52519296.pdf (accessed: 01.02.2019).

18. *Hsu W.-H., Chien W.-T.* Effect of electrical discharge machining on stress concentration in titanium alloy holes // Materials. – 2016. – Vol. 9, iss. 12. – doi: 10.3390/ma9120957.

19. *Reddy C.B., Reddy G.J., Reddy C.E.* Growth of electrical discharge machining and its applications – a review [Electronic resource] // International Journal of Engineering Research and Development. – 2012. – Vol. 4, iss. 12. – P. 13–22. – URL: <http://www.ijerd.com/paper/vol4-issue12/C04121322.pdf> (accessed: 01.02.2019).

20. *Singh A., Grover N.K., Sharma R.* Recent advancement in electric discharge machining, a review [Electronic resource] // International Journal of Modern Engineering Research. – 2012. – Vol. 2, iss. 5. – P. 3815–3821. – URL: http://www.ijmer.com/papers/Vol2_Issue5/EN2538153821.pdf (accessed: 01.02.2019).

21. *Banu A., Ali M.Y.* Electrical discharge machining (EDM): a review // International Journal of Engineering Materials and Manufacture. – 2016. – N 1 (1). – P. 3–10. – doi: 10.26776/ijemm.01.01.2016.02.

Конфликт интересов

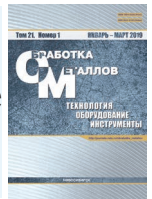
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Improving the Reliability of Locomotive Traction Motors due to the use of Electrical Discharge Machining of Collector Plates

Yurij Titov^{1, a, *}, Dmitriy Belan^{2, b}, Georgij Toder^{2, c}, Anna Otradnova^{2, d}

¹ Omsk State Technical University, 11 Mira ave., Omsk, 644050, Russian Federation

² Omsk State Transport University, 35 Prospekt Marksa, Omsk, 644046, Russian Federation

^a <http://orcid.org/0000-0002-6454-8310>, tyrin-88@mail.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0002-7168-103X>, Baltazar.13@mail.ru,

^c <http://orcid.org/0000-0001-5000-7137>, georgyt@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-7801-753X>, anna3812_88@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21 October 2018

Revised: 15 January 2019

Accepted: 29 January 2019

Available online: 15 March 2019

Keywords:

Traction electric motor

Collector

Pulse generator

Carbon

Electrical discharge machining

ABSTRACT

Introduction. One of the most important tasks of locomotive repair production of Russian Railways is to increase the service life of the rolling stock: locomotives and wagons. This paper discusses the use of a new method of repair of collector-brush unit of the electric locomotive, which will improve the switching characteristics, improve the reliability of electric traction motors (ETM) and increase the operating time of the entire electric locomotive as a whole. **The purpose of the work** is to improve the reliability and service life of ETM of electric locomotives. **Methods.** To reduce the coefficient of friction between the collector plates and brushes and increase the service life of the collector-brush unit, it is proposed to carburize the surface standing copper plates of the collector by means of electrical discharge machining (EDM). The method of electrical discharge machining, in comparison with traditional mechanical methods of repair of electric traction motors, is more preferable, because it allows increasing the wear resistance of the contact surface of the collector plates, which provides the required performance properties and increases the reliability of the collector-brush unit. **Results.** The article proposes a technological process of repair of the electric motor collector, characterized by the use of electrical discharge machining with the formation of a carbon surface layer on the contact surface of the collector. A device for the formation of a carbon layer on the working surface of the collector of electric traction motors by means of electrical discharge machining is presented. The results of atomic emission spectral analysis of carbonized copper sample, which showed that the proportion of carbon in the carbonized copper sample increased by 0.1 % compared to the copper plate, not subjected to electrical discharge machining, are given. An evaluation model of the dependence of the depth of the composite layer on the voltage applied to the electrodes is presented. **Discussion.** the evaluation model Presented in the article allows: 1) to make a preliminary estimate of the dependence of the depth and thickness of the layers forming the composite structure of the surface subjected to EDM on the voltage applied to the electrodes; 2) based on this calculation, to conduct an experimental EDM of the collector surface of the ETM with the adjustment of the thickness and depth of the layers by means of the described technique; 3) to experimentally determine the processing modes for the samples.

For citation: Titov Yu.V., Belan D.Yu., Toder G.B., Otradnova A.A. Improving the reliability of locomotive traction motors due to the use of electrical discharge machining of collector plates. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 16–24. doi 10.17212/1994-6309-2019-21.1-16-24. (In Russian).

References

1. *Rasporyazhenie prezidenta OAO "RZhD" ot 17.01.2005 № 3r "O sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta lokomotivov"* [The order of the President of JSC "Russian Railways" dated 17.01.2005 N 3r "About system of maintenance and repair of locomotives"]. Moscow, JSC "Russian Railways" Publ., 2005. 8 p.
2. *Rasporyazhenie prezidenta OAO "RZhD" ot 13.01.2006 № 181 "Dopolnitel'nye mery po povysheniyu urovnya obespecheniya bezopasnosti dvizheniya v lokomotivnom khozyaistve zheleznnykh dorog OAO "RZhD"* [The order of the President of JSC "Russian Railways" dated 13.01.2006 N 181 "Additional measures to improve the level of

* Corresponding author

Titov Yurij V., Assistant

Omsk State Technical University

11 Mira ave.,

644050, Omsk, Russian Federation,

Tel.: +7 (913) 681-56-64, e-mail: tyrin-88@mail.ru

traffic safety in the locomotive industry of Railways of JSC “Russian Railways”]. Moscow, JSC “Russian Railways” Publ., 2006. 7 p.

3. *Poruchenie pervogo vitse-prezidenta OAO “RZhD” ot 26.08.2010 № P-VM-120 “Ob optimizatsii struktury i povyshenii effektivnosti lokomotivoremontnogo kompleksa”* [The order of the first Vice-President of JSC “Russian Railways” dated 26.08.2010 N P-VM-120 “About optimization of structure and increase of efficiency of the locomotive repair complex”]. Moscow, JSC “Russian Railways” Publ., 2010. 6 p.

4. Avilov V.D., Petrov P.G., Moiseenok E.M. K voprosu o povyshenii kommutatsionnoi ustoychivosti kollektornykh elektricheskikh mashin postoyannogo toka [Increasing of switching stability on dc machines]. *Izvestiya Transsiba = Journal of Transsib Railway Studies*, 2010, no. 2 (2), pp. 2-6. Available at: [http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2010-2\(2\).pdf](http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2010-2(2).pdf) (accessed 01.02.2019).

5. Stepanov Yu.S., Sotnikov V.I., Tkachenko A.N. Eksperimental'noe issledovanie protsessa kombinirovannoi obrabotki tocheniem i almaznym vyglazhivaniem tortsovykh poverkhnostei detalei iz medi [Experimental study of combined treatment of turning and diamond caress end surface of components made of copper]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 2012, no. 8, pp. 43-48. Available at: http://www.mashin.ru/files/2012/utp8_12.pdf (accessed 01.02.2019).

6. Fel'dshtein E.E., Kardapolova M.A., Gaida R., Khorodyski B., Kaval'chuk O.V. [Tribological properties of electrospark-deposited and further laser-hardened coatings]. *Journal of Friction and Wear*, 2013, vol. 34, no. 2, pp. 137–141. doi: 10.3103/S1068366613020049. Translated from *Trenie i iznos*, 2013, vol. 34, no. 2, pp. 175–180.

7. Safonova M.N., Tarasov P.P., Syromyatnikova A.S., Fedotov A.A. Effect of nanodispersed diamond additions on properties of composite materials based on bronze. *Metal Science and Heat Treatment*, 2013, vol. 55, iss. 5–6, pp. 229–231. doi: 10.1007/s11041-013-9610-z. Translated from *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2013, vol. 55, no. 5 (695), pp. 3–6.

8. Koeffitsienty treniya pokoya i skol'zheniya dlya par naibolee rasprostranennykh materialov [Coefficients of friction of rest and slip for pairs of the most common materials]. Available at: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/Frication/FrictionToVariousPairs> (accessed 01.02.2019).

9. Kuznetsov A.A., Belan D.Yu., Otradnova A.O., Otradnova T.V., Otradnova I.V. *Ustanovka dlya elektroiskrovoi obrabotki s pozitsionirovaniem elektrodov otnositel'no poverkhnosti kollektora elektricheskoi mashiny* [Installation for electrical discharge machining with the positioning of the electrodes relative to the surface of the collector electric machines]. Patent RF, no. 137639, 2014.

10. Smolentsev V.P. *Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov*. V 2 t. T. 1. *Obrabotka materialov s primeneniem instrumenta* [Electrophysical and electrochemical methods of materials processing. In 2 vol. Vol. 1. Processing of materials with the use of tools]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 247 p.

11. Sandeep K. Current research trends in electrical discharge machining: a review. *Research Journal of Engineering Sciences*, 2013, vol. 2 (2), pp. 56–60. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/93e1/7a1521161a361dc1600aa61618166f8de5e7.pdf> (accessed 01.02.2019).

12. Nishiwaki N., Hori S., Natsu W. Detection of electric discharge machining state by using ultrasonic technique. *17th World Conference on Nondestructive Testing*, Shanghai, China, 25–28 October 2008, pp. 1–6. Available at: <https://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/128.pdf> (accessed 01.02.2019).

13. Lee H., Yahya A., Khamis N. H., Samion S. Nonlinear servomotor in single pulse simulation of electrical discharge machining system modeling. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2016, vol. 1, no. 2, pp. 319–328. Available at: https://www.researchgate.net/publication/299433312_Nonlinear_Servomotor_in_Single_Pulse_Simulation_of_Electrical_Discharge_Machining_System_Modeling (accessed 01.02.2019).

14. Equbal A., Sood A.K. Electrical discharge machining: an overview on various areas of research. *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering (MIE)*, 2014, vol. 13, no. 1–2, pp. 1–6. Available at: <http://www.qip-journal.eu/index.php/MIE/article/view/339>. (accessed 01.02.2019).

15. Choudhary A.K., Chhabra K.K. Effect of control parameters in electrical discharge machining – a review. *International Journal of R&D in Engineering Science and Management*, 2014, vol. 1, no. 3, pp. 72–76. Available at: http://www.rndpublications.com/wp-content/uploads/2014/10/Paper_1oct.pdf (accessed 01.02.2019).

16. Upta S., Singh G. A review on fabrication of copper graphite composite material & its mechanical properties. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 2017, vol. 3, iss. 3, pp. 537–543. Available at: <http://www.ijariie.com/PastIssueSelected.aspx?VolumeId=18> (accessed 01.02.2019).

17. Ojha K., Garg R.K., Singh K.K. MRR improvement in sinking electrical discharge machining: a review. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 2010, vol. 9, no. 8, pp. 709–739. Available at: http://file.scirp.org/pdf/JMMCE20100800004_52519296.pdf (accessed 01.02.2019).
18. Hsu W.-H., Chien W.-T. Effect of electrical discharge machining on stress concentration in titanium alloy holes. *Materials*, 2016, vol. 9, iss. 12. doi: 10.3390/ma9120957.
19. Reddy C.B., Reddy G.J., Reddy C.E. Growth of electrical discharge machining and its applications – a review. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2012, vol. 4, iss. 12, pp. 13–22. Available at: <http://www.ijerd.com/paper/vol4-issue12/C04121322.pdf> (accessed 01.02.2019).
20. Singh A., Grover N.K., Sharma R. Recent advancement in electric discharge machining, a review. *International Journal of Modern Engineering Research*, 2012, vol. 2, iss. 5, pp. 3815–3821. Available at: http://www.ijmer.com/papers/Vol2_Issue5/EN2538153821.pdf (accessed 01.02.2019).
21. Banu A., Ali M.Y. Electrical discharge machining (EDM): a review. *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*, 2016, no. 1 (1), pp. 3–10. doi: 10.26776/ijemm.01.01.2016.02.

Conflicts of Interest

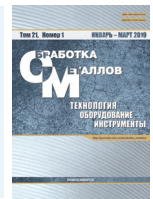
The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov





Гибридная технология электрохимической обработки сложнопрофильных изделий

Михаил Борисов^a, Дмитрий Лобанов^{b, *}, Александр Янюшкин^c

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, пр. Московский, 15, г. Чебоксары, 428015, Россия

^a  <http://orcid.org/0000-0001-9084-1820>,  borisovmgou@mail.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0002-4273-5107>,  lobanovdv@list.ru,

^c  <http://orcid.org/0000-0003-1969-7840>,  yanyushkinas@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.047

История статьи:

Поступила: 14 декабря 2018
 Рецензирование: 21 января 2019
 Принята к печати: 11 февраля 2019
 Доступно онлайн: 15 марта 2019

Ключевые слова:

Электрохимическое шлифование
 Электрохимическое полирование
 Гибридная технология
 Алмазная головка
 Керамическое покрытие

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие современных технологий обработки конструкционных материалов значительно повысило требования не только к оборудованию, оснастке и инструменту для реализации процессов, но и к качеству обработанных поверхностей. Особо остро эта проблема прослеживается при создании изделий индивидуального сложного профиля, зачастую изготавливаемых по единичным технологиям, что ведет к необходимости снижения себестоимости при сохранении эффективности изготовления. Наиболее часто детали такого типа применяются в судостроении, авиастроении, машиностроении, медицине. Для механической (ручной) обработки металлического каркаса при зубопротезировании используются ротационные инструменты, в том числе зуботехнические бормашины. Они оснащаются цанговыми патронами, в которые устанавливаются твердосплавные фрезы, шлифовальные корундовые головки на керамической связке и алмазные головки на металлической связке. Алмазные головки на металлической связке применяются только для обработки изделий, которые не покрываются затем керамикой. Для обработки металлических каркасов под покрытие керамикой их применять не рекомендуется, так как алмазные головки на металлической связке оставляют царапины, в которых в процессе обжига керамики могут скапливаться и застаиваться газы, приводящие к дефектам керамического покрытия. Кроме того, во время обработки происходит «засаливание» инструмента. Приходится прерывать процесс обработки и чистить алмазные головки в пескоструйном аппарате. **Цель работы.** В работе решается задача, связанная с обеспечением возможности использования высокоэффективных алмазных головок на металлической связке для механической (ручной) финишной обработки металлических каркасов под дальнейшее покрытие керамикой путем применения и комбинирования известных способов электрохимического шлифования и электрохимического полирования изделий (гибридных технологий финишной обработки). **Результаты и обсуждение.** Исследования проводились путем механической (ручной) обработки образцов из стали 12Х18Н10Т. На собранном нами лабораторном стенде проводились сравнительные испытания трех способов обработки металлических заготовок: традиционное шлифование образцов стоматологической алмазной головкой, электрохимическое шлифование образцов стоматологической алмазной головкой и электрохимическое шлифование образцов стоматологической алмазной головкой с последующим электрохимическим полированием образцов круглым электродом, изготовленным из проволоки ДКРНМ 2,5 Л63, ГОСТ 1066–2015. Изображения поверхности обработанных разным способом образцов и химический состав поверхности образца были получены на настольном сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM4000Plus. Измерение величины шероховатости обработанной поверхности проводилось на профилометре модели 130. Применение способа электрохимического шлифования алмазной головкой на металлической связке с последующим электрохимическим полированием круглым электродом позволяет устранить царапины от обработки алмазной головкой и создать необходимую топографию поверхности для обеспечения механической связи между металлическим каркасом и керамикой. Анализ результатов сравнительных исследований позволяет нам сделать вывод, что лучшим, с точки зрения качества, эффективности обработки и условий обеспечения топографии поверхности, пригодной для обеспечения устойчивой механической связи между металлическим каркасом и керамикой, является гибридная технология обработки на одном технологическом оборудовании с использованием электрохимического шлифования алмазной головкой на металлической связке с последующим электрохимическим полированием круглым электродом.

Для цитирования: 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.

*Адрес для переписки

Лобанов Дмитрий Владимирович, д.т.н., доцент
 Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова
 пр. Московский, 15,
 428015, г. Чебоксары, Россия
 Тел.: +7-908-303-47-45, e-mail: lobanovdv@list.ru

Введение

Развитие современных технологий обработки конструкционных материалов значительно повысило требования не только к оборудованию, оснастке и инструменту для реализации процессов, но и к качеству обработанных поверхностей. Особо остро эта проблема прослеживается при создании изделий индивидуального сложного профиля, зачастую изготавливаемых по единичным технологиям, что ведет к необходимости снижения себестоимости при сохранении эффективности изготовления. Наибольшее применение детали такого типа нашли в судостроении, авиастроении, машиностроении, медицине.

В частности, в стоматологии в последние годы все большее применение получают металлокерамические несъемные зубные протезы, представляющие собой сложнопрофильное литое изделие, изготовленное с применением механической обработки. Они в наибольшей степени удовлетворяют возросшим эстетическим требованиям и лишены недостатков штамповочно-паяных конструкций. Металлокерамическая конструкция состоит из металлического каркаса, покрытого тремя основными слоями керамической массы.

Металлический каркас отливается из труднообрабатываемых сплавов, включающих в свой состав хром с кобальтом или никелем, в том числе из стали 12Х18Н10Т. Каркас является одной из важнейших составных частей металлокерамической конструкции, поэтому особое значение приобретает его прочность и качество. Тонкий и ослабленный металлический каркас отрицательно влияет на прочность всей металлокерамической системы и особенно мостовидного протеза. Низкое качество поверхности металлического каркаса приводит к отслоениям керамического покрытия и изменениям его цветовой гаммы.

Для механической (ручной) обработки металлического каркаса используются ротационные инструменты, в том числе зуботехнические бормашины. Они оснащаются цанговыми патронами, в которые устанавливаются твердосплавные фрезы, шлифовальные корундовые головки на керамической связке и алмазные головки на металлической связке. Алмазные головки на металлической связке применяются только для обработки изделий, которые не покрываются затем

керамикой. Для обработки металлических каркасов под покрытие керамикой их применять не рекомендуется [1, 2], так как алмазные головки на металлической связке оставляют царапины (следы от абразивной обработки), в которых в процессе обжига керамики могут скапливаться и застаиваться газы, приводящие к дефектам керамического покрытия. Кроме этого во время обработки происходит интенсивный процесс потери работоспособности алмазного инструмента (засаливание), приходится прерывать процесс обработки и чистить алмазные головки в пескоструйном аппарате. Это в значительной мере снижает эффективность обработки.

Традиционно используемая технология изготовления каркаса на сегодняшний день такова: металлический каркас для уменьшения шероховатости его поверхности обрабатывают с помощью шлифовальных инструментов на керамической связке очень тщательно, плавно и всегда в одном направлении. Затем проводят либо пескоструйную обработку каркаса, либо полирование всего изделия целиком с применением стационарного электрода сложной формы. Этот последний этап завершает создание поверхности с топографией, пригодной для обеспечения устойчивой механической связи между металлическим каркасом и керамикой [1, 2]. Недостаток традиционно применяемой технологии состоит в том, что шлифовальные инструменты на керамической связке имеют относительно больший расход по сравнению, например, с инструментами на металлической связке, что приводит к существенному снижению производительности и повышению стоимости обработки [3–10].

Резерв повышения эффективности обработки и качества поверхности таких изделий видится в использовании современных методов комбинированной электрохимической или электрофизической обработки. Так, в машиностроении для повышения производительности обработки металлических изделий, изготавливаемых на шлифовальных и заточных станках, применяется электрохимическое шлифование алмазным инструментом на металлической связке [11–15]. При этом правка инструмента может осуществляться постоянно, если используются две электрические цепи – рабочая цепь и цепь правки инструмента, или периодически, если используется одна электрическая цепь. Направление

и длительность импульсов тока, проходящего по одной электрической цепи, можно изменять с использованием специального блока управления [16, 17]. Если же результат обработки не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к качеству поверхности изделия, то после электрохимического шлифования алмазным токопроводящим инструментом дополнительно проводится процесс электрохимического полирования вращающимися электродами [18]. Последовательная реализация технологий механической, электрофизической и электрохимической обработки на одном технологическом оборудовании позволит синтезировать гибридную технологию электрохимической обработки сложнопрофильных металлических изделий, сочетающую в себе достоинства каждого из видов обработки, для достижения необходимых экономических и качественных показателей [19–26].

Таким образом, в работе предлагается решение задачи, связанной с обеспечением возможности использования высокоэффективных алмазных головок на металлической связке для механической (ручной) финишной обработки металлических каркасов под дальнейшее покрытие керамикой путем применения и комбинирования известных способов электрохимического шлифования и электрохимического полирования изделий (гибридных технологий финишной обработки).

Методика исследований

Исследования проводились путем механической (ручной) обработки образцов из стали 12X18H10T, нарезанных на токарном станке из прутка диаметром 10 мм и длиной по 6 мм. В качестве ротационного инструмента для проведения экспериментов использовали гравер ЗУБР ЗГ-160ЭК, так как число оборотов вала гравера соответствует числу оборотов бормашины зуботехнических. При этом его стоимость значительно ниже стоимости бормашины зуботехнических. Гравер был модернизирован путем изоляции гибкого вала от корпуса гравера и оснащения его щеточным устройством для обеспечения возможности подвода к нему электрического тока от источника постоянного тока номинальным напряжением 14,7 В, размещенным в блоке управления (рис. 1).

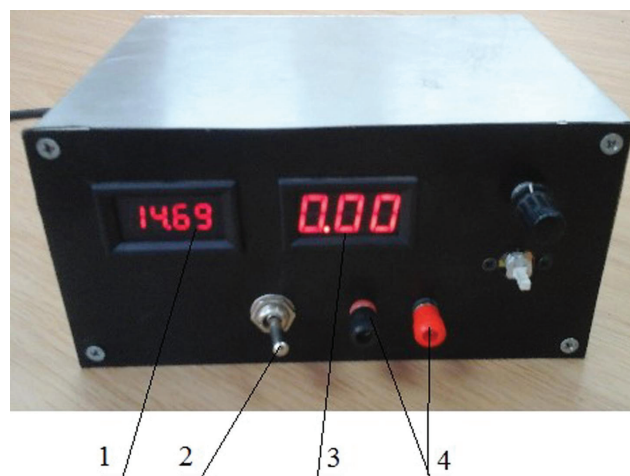


Рис. 1. Блок управления:

1 – вольтметр; 2 – переключатель полярности; 3 – амперметр; 4 – выходные клеммы

Fig. 1. The control unit:

1 – voltmeter; 2 – polarity switch; 3 – ammeter; 4 – output terminals

Гибкий вал гравера снабжен цанговым патроном для установки сменного инструмента. Образцы закреплялись в специальном изолированном от рук человека токопроводящем пинцете, который соединялся с источником тока. На рис. 2 показана фотография лабораторного стенда.

На собранном лабораторном стенде проводились сравнительные испытания трех способов обработки металлических заготовок.

Способ обработки № 1. Традиционное шлифование образцов стоматологической алмазной головкой на металлической связке.

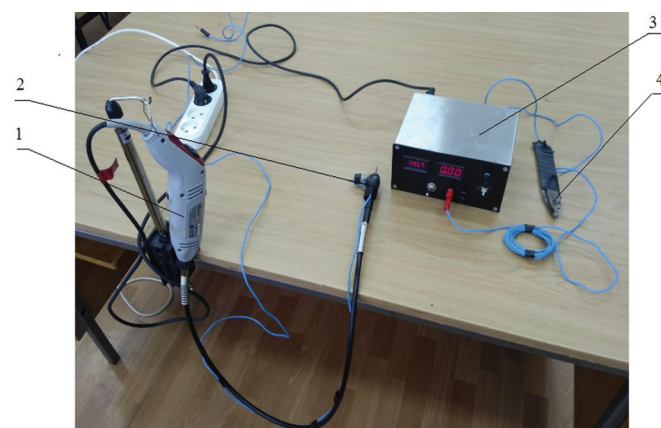


Рис. 2. Лабораторный стенд:

1 – гравер; 2 – гибкий вал гравера; 3 – блок управления; 4 – пинцет для закрепления образца

Fig. 2. Laboratory stand:

1 – engraver; 2 – flexible engraver shaft; 3 – control unit; 4 – tweezers for fixing the sample

Способ обработки № 2. Электрохимическое шлифование образцов стоматологической алмазной головкой на металлической связке.

Способ обработки № 3. Электрохимическое шлифование образцов стоматологической алмазной головкой на металлической связке и последующее электрохимическое полирование образцов круглым электродом.

Традиционное шлифование образцов стоматологической алмазной головкой на металлической связке, которое не рекомендуется применять для обработки металлических каркасов под покрытие керамикой, проводилось для получения исходных данных в целях сравнения его с результатами двух других способов обработки.

Обработка осуществлялась в первом случае без электролита, а во втором и третьем случае – в ванне с электролитом на водной основе (NaNO_3 – 3 %, NaNO_2 – 1 %, Na_2CO_3 – 0,5 %).

На рис. 3 показана фотография зоны обработки.

При обработке образцов число оборотов вала гравера соответствовало $30\,000\ \text{мин}^{-1}$. Время обработки всей поверхности образца за один проход равнялось двум минутам. Глубина резания примерно составляла 0,1 мм. Использовалась цилиндрическая стоматологическая алмазная головка на металлической связке диаметром 3 мм. Размер зерна 90...125 мкм. При электрохимическом полировании использовался электрод, изготовленный из проволоки ДКРНМ 2,5 Л63, ГОСТ 1066–2015. Сила тока в рабочей цепи и цепи правки инструмента 0,1...0,18 А, напряже-

ние 13,5...14,7 В. Правка инструмента осуществлялась электрохимическим способом периодически после обработки каждого образца.

Изображения поверхности обработанных разным способом образцов и химический состав поверхности образца были получены на настольном сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM4000Plus. Измерение величины шероховатости обработанной поверхности проводилось на профилометре модели 130.

Результаты и их обсуждение

Способ обработки № 1

На рис. 4 изображена поверхность образца № 1. На фотографии видны ориентированные в одном направлении на всю длину образца царапины от обработки алмазной головкой. Их ширина составляет от 3,74 до 11,7 мкм. Измеренная шероховатость обработанной поверхности $R_a = 0,408$ мкм.

Способ обработки № 2

На рис. 5 представлено изображение поверхности образца № 2. На фотографии видны также ориентированные в одном направлении дефекты поверхности в виде углублений с неявно выраженными очертаниями. Их ширина составляет от 20,5 до 28,8 мкм, а длина порядка 80 мкм. Измеренная шероховатость обработанной поверхности $R_a = 0,332$ мкм.

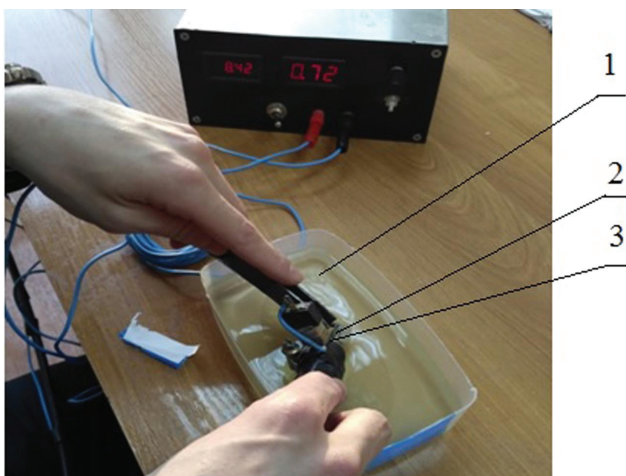


Рис. 3. Зона обработки:

1 – ванна с электролитом; 2 – образец; 3 – инструмент

Fig. 3. Processing area:

1 – bath with electrolyte; 2 – sample; 3 – tool

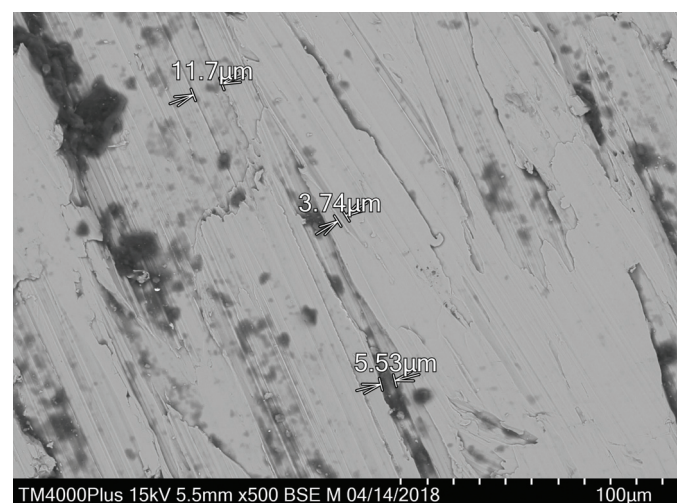


Рис. 4. Изображение поверхности образца № 1, обработанного традиционным способом стоматологической алмазной головкой

Fig. 4. Image of the surface of sample No. 1, processed in the traditional way with a dental diamond head

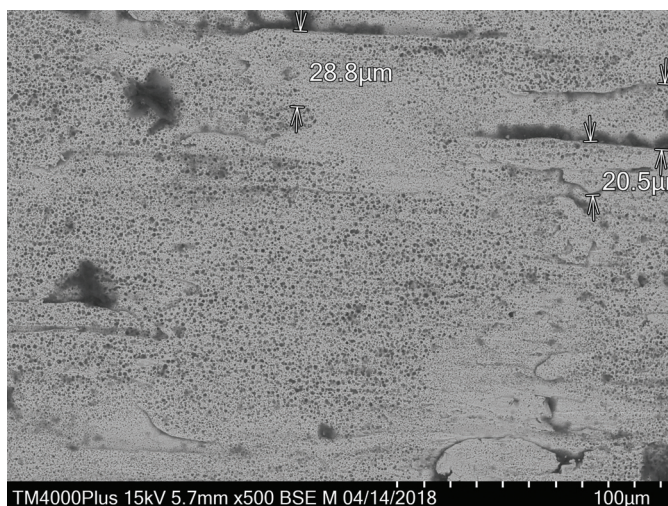


Рис. 5. Изображение поверхности образца № 2, обработанного способом электрохимического шлифования стоматологической алмазной головкой

Fig. 5. Image of the surface of sample No. 2, processed by an electrochemical grinding method with a dental diamond head

Способ обработки № 3

На рис. 6 изображена поверхность образца № 3. На фотографии видны дезориентированные дефекты поверхности. Их максимальная величина по ширине и длине на измеренном участке достигает значения порядка 2 мкм. Измеренная шероховатость обработанной поверхности $R_a = 0,243$ мкм.

Топографию поверхности, пригодную для обеспечения устойчивой механической связи между металлическим каркасом и керамикой,

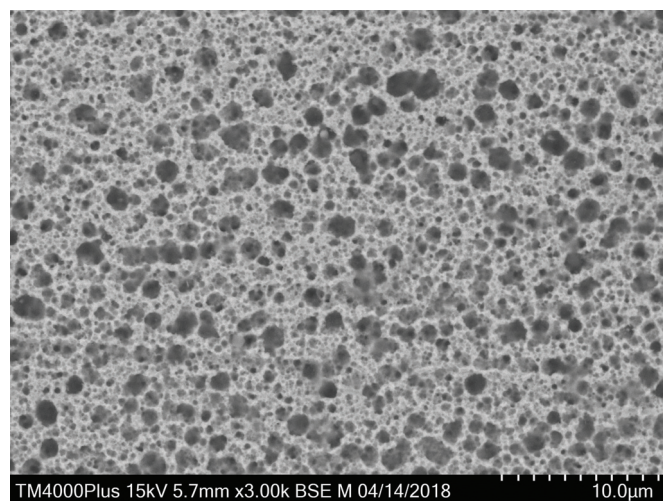


Рис. 6. Изображение поверхности образца № 3, обработанного электрохимическим шлифованием стоматологической алмазной головкой и последующим электрохимическим полированием круглым электродом

Fig. 6. Image of the surface of sample No. 3, treated by electrochemical grinding with a dental diamond head and subsequent electrochemical polishing with a round electrode

обеспечивает обработка электрохимическим шлифованием стоматологической алмазной головкой и последующим электрохимическим полированием круглым электродом.

Химический состав поверхности образца № 3 представлен на рис. 7. Спектрометр показывает наличие на поверхностном слое образца изделия только элементов обрабатываемого материала и

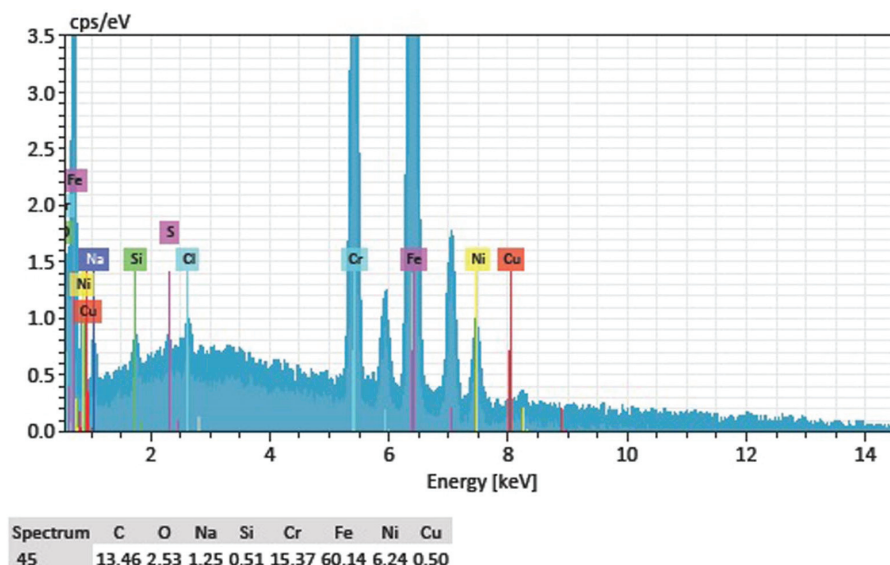


Рис. 7. Химический состав поверхности образца
Fig. 7. The chemical composition of the sample surface

применяемых инструментов, что говорит о стабильности процессов в зоне обработки.

На рис. 8 изображена гистограмма, показывающая зависимость шероховатости обработанной поверхности образцов от способа обработки. Наименьшая шероховатость поверхности достигается электрохимическим шлифованием образцов стоматологической алмазной головкой и последующим электрохимическим полированием образцов круглым электродом.

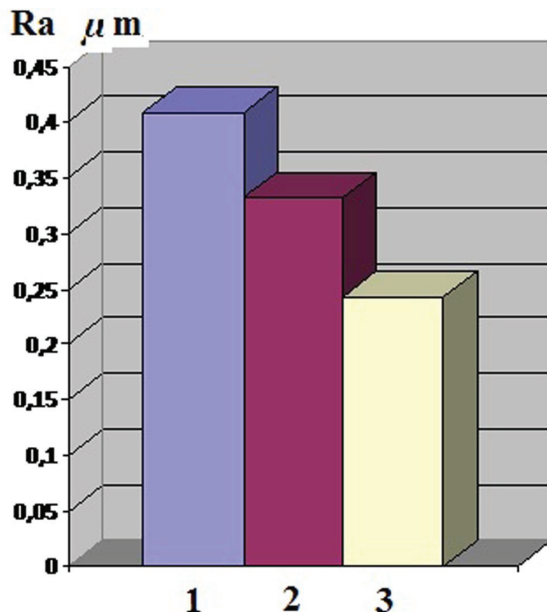


Рис. 8. Гистограмма, показывающая зависимость шероховатости обработанной поверхности образцов от способа обработки:

1 – традиционное шлифование образцов стоматологической алмазной головкой; 2 – электрохимическое шлифование образцов стоматологической алмазной головкой; 3 – электрохимическое шлифование образцов стоматологической алмазной головкой и последующее электрохимическое полирование образцов круглым электродом

Fig. 8. A histogram showing the dependence of the surface roughness of the samples on the processing method:

1 – traditional grinding of samples with a dental diamond head; 2 – electrochemical grinding of samples with a dental diamond head; 3 – electrochemical grinding of samples with a dental diamond head and subsequent electrochemical polishing of samples with a round electrode

Выводы

Анализ результатов сравнительных исследований позволяет сделать вывод, что лучшим с точки зрения качества, эффективности обработ-

ки и условий обеспечения топографии поверхности, пригодной для осуществления устойчивой механической связи между металлическим каркасом и керамикой, является гибридная технология обработки на одном технологическом оборудовании с использованием электрохимического шлифования алмазной головкой на металлической связке с последующим электрохимическим полированием круглым электродом.

Это создает предпосылки к дальнейшему детальному исследованию данной гибридной технологии для формирования обоснованных практических рекомендаций по режимам и условиям обработки с высокой эффективностью.

Список литературы

1. Троян И.С. Техника изготовления несъемных металлокерамических конструкций зубных протезов: учебное пособие / Волгоградский медицинский колледж. – Волгоград, 2013. – 24 с.
2. Химическая технология. Керамические и стеклокристаллические материалы для медицины: учебное пособие для магистратуры / В.И. Верещагин, Т.А. Хабас, Е.А. Кулинич, В.П. Игнатов. – М.: Юрайт, 2019. – 147 с. – (Университеты России). – ISBN 978-5-534-10880-4.
3. Гордон М.Б., Янюшкин А.С. Высокоэффективная электрохимическая обработка твердых сплавов в режиме самозатачивания алмазного круга и одновременного травления поверхности изделий // Вестник машиностроения. – 1984. – № 3. – С. 12–14.
4. Contact processes in grinding / A. Yanyushkin, D. Lobanov, P. Arkhipov, V. Ivancivsky // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 17–21. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17.
5. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Архипов П.В. Потеря режущей способности алмазных кругов на металлической связке при шлифовании композиционных материалов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2013. – № 1 (47). – С. 178–183.
6. Носенко В.А., Носенко С.В. Плоское глубинное шлифование пазов в заготовках из титанового сплава с непрерывной правкой шлифовального круга // Вестник машиностроения. – 2013. – № 4. – С. 74–79.
7. Nosenko V.A., Mitrofanov A.P., Butov G.M. Impregnation of abrasive tools with foaming agents // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31, iss. 11. – P. 1160–1163. – doi: 10.3103/S1068798X11110189.
8. 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/mateconf/201712901002.

9. *Виноградова Т.Г., Салов П.М., Салова Д.П.* Качество обработанных отверстий при электрокорундовом и аэроборном шлифовании // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 1. – С. 91–95.

10. Определение относительной абразивной способности кругов при безалмазной непрерывной правке / П.М. Салов, В.Н. Цай, С.С. Сайкин, Ю.И. Воронцов, Н.В. Мулюхин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 4. – С. 57–59.

11. Моделирование процесса стохастического взаимодействия инструмента и заготовки на операциях шлифования / С.М. Братан, В.Б. Богущкий, Ю.К. Новоселов, С.И. Рошупкин // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – № 5 (71). – С. 9–18.

12. Identification of removal parameters at combined grinding of conductive ceramic materials / S. Bratan, S. Roshchupkin, A. Kolesov, B. Bogutsky // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – P. 01079. – doi: 10.1051/mateconf/201712901079.

13. *Nosenko S.V., Nosenko V.A., Bairamov A.A.* Factors affecting the surface roughness in the deep grinding of titanium alloys // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, iss. 7. – P. 549–553. – doi: 10.3103/S1068798X15070151.

14. *Рахмянов Х.М., Журавлев А.И., Гаар Н.П.* Установка для исследования электрохимических процессов в условиях лазерной активации процесса электрохимической размерной обработки // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 2 (39). – С. 135–144.

15. *Попов В.Ю.* Шероховатость поверхности быстрорежущего инструмента в зависимости от режимов электроалмазной обработки // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 21–26.

16. *Борисов М.А., Мишин В.А., Дементьев Д.А.* Разработка программируемого устройства для управления параметрами тока при электрохимической обработке // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции «Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение» / Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. – Чебоксары, 2017. – С. 188–192.

17. *Борисов М.А., Мишин В.А.* Аспекты применения электрохимического шлифования зубопротезных металлических изделий // Новые технологии науки, техники, педагогики высшей школы: материалы Международной научно-практической конференции «Наука – Общество – Технологии – 2017» / Мо-

сковский политехнический университет. – Москва, 2017. – С. 157–159.

18. *Мирзоев Р.А., Давыдов А.Д.* Анодные процессы электрохимической и химической обработки металлов: учебное пособие. – 2-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2016. – 384 с. – ISBN 978-5-8114-2288-3.

19. Структура износостойких плазменных покрытий после высокоэнергетического воздействия ТВЧ / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, В.В. Иванцовский, В.Ю. Скиба, Н.В. Плотникова, Д.В. Лобанов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 4 (65). – С. 11–18.

20. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyskin, K.A. Parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – P. 012016. – Vol.126. – doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016.

21. *Skeebea V., Pushnin V., Kornev D.* Quality improvement of wear-resistant coatings in plasma spraying integrated with high-energy heating by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 88–94. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.88.

22. Formation of high-carbon abrasion-resistant surface layers when high-energy heating by high-frequency currents / N.V. Plotnikova, V.Yu. Skeebea, N.V. Martyushev, R.A. Miller, N.S. Rubtsova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – P. 012022. – Vol. 156. – doi: 10.1088/1757-899X/156/1/012022.

23. Integrated quality ensuring technique of plasma wear resistant coatings / E.A. Zverev, V.Yu. Skeebea, P.Yu. Skeebea, N.V. Martyushev // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 736. – P. 132–137. – doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.132.

24. Theoretical-probabilistic model of the rotary belt grinding process / S. Bratan, A. Kolesov, S. Roshchupkin, T. Stadnik // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – P. 01078. – doi: 10.1051/mateconf/201712901078.

25. *Братан С.М., Сазонов С.Е., Колесов А.Г.* Моделирование процессов доводки абразивными пастами // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 1 (55). – С. 25–29.

26. *Иванцовский В.В., Рахмянов 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.

Конфликт интересов

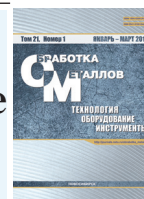
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Hybrid Technology of Electrochemical Processing of Complex Profiles

Mikhail Borisov^a, Dmitry Lobanov^{b, *}, Alexander Yanyushkin^c

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

^a <http://orcid.org/0000-0001-9084-1820>, borisovmgou@mail.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0002-4273-5107>, lobanovdv@list.ru,
^c <http://orcid.org/0000-0003-1969-7840>, yanyushkinas@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 December 2018

Revised: 21 January 2019

Accepted: 11 February 2019

Available online: 15 March 2019

Keywords:

Electrochemical grinding
Electrochemical polishing
Hybrid technology
Diamond head
Ceramic coating

ABSTRACT

Introduction. The development of modern processing technologies for structural materials has significantly increased the requirements not only for equipment, accessories and tools for implementing processes, but also for the quality of machined surfaces. Particularly acute this problem can be traced when creating products of an individual complex profile, often produced by individual technologies, which leads to the need to reduce costs while maintaining production efficiency. The most widely used parts of this type were found in shipbuilding, aircraft manufacturing, mechanical engineering, and medicine. For the mechanical (manual) processing of the metal frame during dental prosthetics, rotary instruments are used, including dental drills. They are equipped with collet chucks, in which carbide mills, grinding corundum heads on a ceramic bond and diamond heads on a metal bond are installed. Diamond heads on a metal bond are used only for processing products that are not then covered with ceramics. It is not recommended to use them for machining metal frames under ceramic coating, as diamond heads on a metal bond leave scratches in which gases can accumulate and stagnate during the ceramic firing process, leading to defects in the ceramic coating. In addition, during the treatment, the tool becomes “salted”. It became necessary to interrupt the process and clean the diamond heads in a sandblaster. **Objective.** The paper solves the problem associated with ensuring the possibility of using high-performance diamond heads on a metal bond for mechanical (manual) finishing of metal frames for further coating with ceramics by applying and combining known methods of electrochemical grinding and electrochemical polishing of products (hybrid finishing technologies). **Results and discussion.** Studies are carried out by mechanical (manual) processing of samples of steel 12Cr18Ni10Ti. On the laboratory bench we assembled, comparative tests are carried out on three methods for processing metal blanks: traditional grinding of samples with a dental diamond head, electrochemical grinding of samples with a dental diamond head and electrochemical grinding of samples with a dental diamond head followed by electrochemical polishing of samples with a round electrode made of wire DKRNM 2.5 L63 (GOST 1066–2015). Images of the surface of samples processed in different ways and the chemical composition of the surface of the sample are obtained on a Hitachi TM4000Plus desktop scanning electron microscope. Measurement of the roughness of the treated surface is carried out on a Model 130 profilometer. Applying an electrochemical grinding method with a diamond head on a metal bond followed by electrochemical polishing with a round electrode eliminates scratches from the diamond head treatment and creates the necessary surface topography to provide a mechanical connection between the metal frame and ceramic. Analysis of the results of comparative studies allows to conclude that the best, in terms of quality, processing efficiency and conditions for providing surface topography, suitable for ensuring a stable mechanical connection between the metal frame and ceramics, is a hybrid processing technology on one processing equipment using diamond electrochemical grinding head on a metal bond, followed by electrochemical polishing with a round electrode.

For citation: Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Hybrid technology of electrochemical processing of complex profiles. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 25–34. doi:10.17212/1994-6309-2019-21.1-25-34. (In Russian).

* Corresponding author

Lobanov Dmitry V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor
I. N. Ulianov Chuvash State University
15 Moskovsky Prospekt,
428015, Cheboksary, Russian Federation
Tel.: + 7-908-303-47-45, e-mail: lobanovdv@list.ru

References

1. Troyan I.S. *Tekhnika izgotovleniya nes'emnykh metallokeramicheskikh konstruksii zubnykh protezov* [Technique of manufacturing fixed metal-ceramic constructions of dentures]. Volgograd Medical College. Volgograd, 2013. 24 p.
2. Vereshchagin V.I., Khabas T.A., Kulinich E.A., Ignatov V.P. *Khimicheskaya tekhnologiya. Keramicheskie i steklokristallicheskie materialy dlya meditsiny* [Chemical Technology. Ceramic and glass-ceramic materials for medicine]. Moscow, Yurait Publ., 2019. 147 p. ISBN 978-5-534-10880-4.
3. Gordon M.B., Yanyushkin A.S. Vysokoeffektivnaya elektrokhimicheskaya obrabotka tverdykh splavov v rezhime samozatachivaniya almaznogo kruga i odnovremennogo travleniya poverkhnosti izdelii [High-performance electrochemical treatment of hard alloys in the mode of self-sharpening of the diamond wheel and simultaneous etching of the surface of products]. *Vestnik mashinostroeniya = Bulletin of Mechanical Engineering*, 1984, no. 3, pp. 12–14.
4. Yanyushkin A., Lobanov D., Arkhipov P., Ivancivsky V. Contact processes in grinding. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 17–21. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17.
5. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Poterya rezhushchei sposobnosti almaznykh krugov na metallicheskoj svyazke pri shlifovanii kompozitsionnykh materialov [Loss of cutting ability of metal bound diamond wheels at grind of composite materials]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva = Vestnik SibGAU*, 2013, no. 1 (47), pp. 178–183.
6. Nosenko V.A., Nosenko S.V. Ploskoe glubinnoe shlifovanie pazov v zagotovkakh iz titanovogo splava s nepreryvnoi pravkoi shlifoval'nogo kruga [Flat deep groove grinding in titanium alloy block with continuous dressing grinding wheel]. *Vestnik mashinostroeniya = Bulletin of Mechanical Engineering*, 2013, no. 4, pp. 74–79.
7. Nosenko V.A., Mitrofanov A.P., Butov G.M. Impregnation of abrasive tools with foaming agents. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, iss. 11, pp. 1160–1163. doi: 10.3103/S1068798X11110189.
8. Popov V.Yu., Arkhipov P.V., Rychkov D.A. Adhesive wear mechanism under combined electric diamond grinding. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, pp. 01002. doi: 10.1051/mateconf/201712901002.
9. Vinogradova T.G., Salov P.M., Salova D.P. Kachestvo obrabotannykh otverstii pri elektrokorundovom i aerobornom shlifovanii [Quality of the processed apertures at alektrokorundic and aeroboric grinding]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2011, no. 1, pp. 91–95.
10. Salov P.M., Tsai V.N., Saikin S.S., Vorontsov Yu.I., Mulyukhin N.V. Opredelenie odnositel'noi abrazivnoi sposobnosti krugov pri bezalmaznoi nepreryvnoi pravke [Determination of relative abrasive ability in community without diamond continuous dressing]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2016, no. 4, pp. 57–59.
11. Bratan S.M., Bogutsky V.B., Novoselov Yu.K., Roshchupkin S.I. Modelirovanie protsessa stokhasticheskogo vzaimodeistviya instrumenta i zagotovki na operatsiyakh shlifovaniya [Process simulation of tool and blank stochastic interaction in grinding operations]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2017, no. 5 (71), pp. 9–18.
12. Bratan S., Roshchupkin S., Kolesov A., Bogutsky B. Identification of removal parameters at combined grinding of conductive ceramic materials. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, p. 01079. doi: 10.1051/mateconf/201712901079.
13. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Bairamov A.A. Factors affecting the surface roughness in the deep grinding of titanium alloys. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, iss. 7, pp. 549–553. doi: 10.3103/S1068798X15070151.
14. Rakhimyanov Kh.M., Zhuravlev A.I., Gaar N.P. Ustanovka dlya issledovaniya elektrokhimicheskikh protsessov v usloviyakh lazernoi aktivatsii protsessa elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotki [Installation for electrochemical processes investigation when laser activation of electrochemical dimensional processing occurs]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 2 (39), pp. 135–144.
15. Popov V.Yu. Sherokhovatost' poverkhnosti bystrorezhushchego instrumenta v zavisimosti ot rezhimov elektroalmaznoi obrabotki [Surface roughness of high speed tools after electro-diamond machining]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii = Actual problems in engineering*, 2015, no. 2, pp. 21–26.
16. Borisov M.A., Mishin V.A., Dement'ev D.A. [Development of a programmable device for controlling current parameters during electrochemical processing]. *Materialy III-ei Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Proektirovanie i perspektivnye tekhnologii v mashinostroenii, metallurgii i ikh kadrovoe obespechenie"* [Proceedings 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference "Design and perspective technologies in mechanical engineering, metallurgy and their staffing"]. Cheboksary, 2017, pp. 188–192. (In Russian).

17. Borisov M.A., Mishin V.A. Aspekty primeneniya elektrokhimicheskogo shlifovaniya zuboproteznykh metallicheskiikh izdelii [Aspects of the use of electrochemical grinding of dental prosthetic metal products]. *Novye tekhnologii nauki, tekhniki, pedagogiki vysshei shkoly* [New technologies of science, technology, pedagogy of higher education]. Moscow, 2017, pp. 157–159.

18. Mirzoev R.A., Davydov A.D. *Anodnye protsessy elektrokhimicheskoi i khimicheskoi obrabotki metallov* [Anode processes of electrochemical and chemical processing of metals]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2016. 384 p. ISBN 978-5-8114-2288-3.

19. Chesov Yu.S., Zverev E.A., Ivantsivskii V.V., Skiba V.Yu., Plotnikova N.V., Lobanov D.V. Struktura iznosostoikikh plazmennyykh pokrytii posle vysokoenergeticheskogo vozdeistviya TVCh [Structure of wear resistant plasma coatings after high-energy treatment using high-frequency currents]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2014, no. 4 (65), pp. 11–18.

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

21. Skeebe V., Pushnin V., Kornev D. Quality improvement of wear-resistant coatings in plasma spraying integrated with high-energy heating by high frequency currents. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 88–94. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.88.

22. Plotnikova N.V., Skeebe V.Yu., Martyushev N.V., Miller R.A., Rubtsova N.S. Formation of high-carbon abrasion-resistant surface layers when high-energy heating by high-frequency currents. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 156, p. 012022. doi: 10.1088/1757-899X/156/1/012022.

23. Zverev E.A., Skeebe V.Yu., Skeebe P.Yu., Martyushev N.V. Integrated quality ensuring technique of plasma wear resistant coatings. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 736, pp. 132–137. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.132.

24. Bratan S., Kolesov A., Roshchupkin S., Stadnik T. Theoretical-probabilistic model of the rotary belt grinding process. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, p. 01078. doi: 10.1051/mateconf/201712901078.

25. Bratan S.M., Sazonov S.E., Kolesov A.G. Modelirovanie protsessov dovodki abrazivnymi pastami [Modeling of processes of finishing by abrasive pastes]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2016, no. 1 (55), pp. 25–29.

26. Ivancivsky V.V., Rakhimyanov Kh.M. Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva poverkhnostnogo sloya detalei mashin pri integratsii poverkhnostnoi termicheskoi i finishnoi mekhanicheskoi obrabotki [Technological quality assurance of the surface layer of machine parts with the integration of surface thermal and finishing machining]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 2005, no. 6, pp. 43–46.

Conflicts of Interest

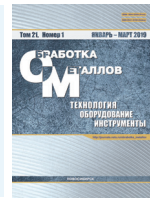
The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)









Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Анализ и синтез системы виброизоляции шлифовального станка с учетом эксплуатационной надежности ее элементов

Сергей Братан ^{a, *}, Александр Харченко ^b, Екатерина Владецкая ^c, Андрей Харченко ^d

Севастопольский государственный университет, ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия

^a  <http://orcid.org/0000-0002-9033-1174>,  serg.bratan@gmail.com, ^b  <http://orcid.org/0000-0003-1704-9380>,  khao@list.ru,
^c  <http://orcid.org/0000-0002-2774-3088>,  vladetska@rambler.ru, ^d  <http://orcid.org/0000-0001-8797-6046>,  a.a.kharchenko@sevsu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9-219.1-752

История статьи:

Поступила: 18 декабря 2018
 Рецензирование: 12 февраля 2019
 Принята к печати: 15 февраля 2019
 Доступно онлайн: 15 марта 2019

Ключевые слова:

Шлифовальный станок
 Плавающая мастерская
 Виброизолирующая опора
 Виброизолирующее устройство
 Морфологическая матрица
 Размеченный граф состояний
 Надежность

АННОТАЦИЯ

Введение. Особенностью эксплуатации шлифовальных станков в условиях плавающей мастерской является наличие вибраций, снижающих точность и повышающих шероховатость обрабатываемых поверхностей. Разброс выходных показателей качества объясняется возмущающими воздействиями, часть из которых не контролируется в процессе обработки и приводит к нестабильности свойств выпускаемой продукции. Поэтому снижение уровня вынужденных колебаний станка за счет эффективности виброизоляции с учетом особенностей обработки является актуальной задачей, решение которой обеспечит повышение технологических показателей процесса. **Цель работы:** изыскание путей повышения надежности систем виброизоляции шлифовального станка, работающего в условиях плавающей мастерской. **В работе исследованы** структурные варианты виброизолирующих устройств станка для определения их эксплуатационной надежности и выявления наименее надежных элементов путем определения вероятности их отказов для уменьшения влияния вибрационных воздействий от внешней среды и внутренних факторов на качество обработки. **Методами исследования** являются морфологический анализ, структурно-компоновочный и параметрический синтез на основе оценки надежности элементов с использованием однородных цепей Маркова. **Результаты и обсуждение.** Выявлено, что на этапах анализа и синтеза на уровне структурно-компоновочной оптимизации виброизолирующих устройств возможно по укрупненным качественным показателям получение рациональных структурных вариантов для шлифовальных станков плавающей мастерской. Установлено, что путем параметрического синтеза и проведения дополнительных теоретических и практических исследований реальных конструкций виброизолирующих устройств возможно создание новых конструкций виброизолирующего устройства металлорежущего станка плавающей мастерской. Исследование эксплуатационной надежности нового устройства с учетом потоков отказов и восстановлений подсистем с использованием размеченного графа состояний и уравнений финальных вероятностей позволили с помощью машинного эксперимента определить эксплуатационную надежность (вероятность безотказной работы, $P_0 = 0,96$) виброизолирующего устройства, а также вероятности отказов его подсистем. Подтверждено, что созданные в результате параметрического синтеза новые конструкции опоры и виброизолирующего устройства повышают надежность виброзащиты станка. Представленные результаты и последующие испытания показали повышение качества шлифованных деталей с использованием новых устройств при внешних вибрационных воздействиях от оборудования, а также от морского волнения на плавучее основание мастерской (в статье не рассматривается). Представленные результаты подтверждают перспективность развиваемого подхода для модернизации станочного оборудования плавучих мастерских, выполняющих сложные работы по изготовлению высокоточных деталей в морских и прибрежных акваториях.

Для цитирования: Анализ и синтез системы виброизоляции шлифовального станка с учетом эксплуатационной надежности ее элементов / С.М. Братан, А.О. Харченко, Е.А. Владецкая, А.А. Харченко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 35–49. – doi: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-35-49.

*Адрес для переписки

Братан Сергей Михайлович, д.т.н., профессор
 Севастопольский государственный университет
 ул. Университетская, 33,
 299053, г. Севастополь, Россия
 Тел.: +79787155019, e-mail: serg.bratan@gmail.com

Введение

Плавающие мастерские (ПМ) с размещенными на палубах производственными участками, в том числе и механообрабатывающими с широким спектром станочного оборудования (включая шлифовальные станки), выполняют слож-

ные работы по изготовлению и модернизации высокотехнологичных изделий, узлов и агрегатов специального назначения в удаленных от пунктов базирования районах. Особенностью эксплуатации указанного оборудования является наличие вибраций, снижающих точность и повышающих шероховатость обрабатываемых поверхностей. Разброс выходных показателей качества объясняется возмущающими воздействиями, влияющими на технологический процесс. Нестабильность параметров качества деталей определяется воздействием в процессе их изготовления изменяющихся внешних факторов, часть из которых не контролируется в процессе обработки и приводит к нестабильности свойств выпускаемой продукции. Фундаментальные подходы к обеспечению качества при шлифовании с учетом динамики процесса освещены во многих исследованиях, например [1–4]. В ряде работ затрагиваются такие проблемы, как совершенствование процессов шлифования [5 и 6], технологии и оборудования для повышения производительности [7–9] и качества [10–12], снижения себестоимости, повышения безопасности [13–15]. Предложенные авторами модели не всегда принимают во внимание влияние всех возмущающих факторов, поэтому известные результаты не приводят к снижению вибрационных воздействий в условиях плавающих мастерских. Особенно актуальна эта проблема для шлифовальных станков, работающих на плавающих механообрабатывающих участках.

Уменьшение уровня вынужденных колебаний станка на основе повышения эффективности его виброизоляции с учетом особенностей условий функционирования является актуальной задачей, решение которой позволит повысить технологические параметры процесса.

Для повышения качества обработки прецизионные станки должны быть защищены от вибраций соседних установок. При монтаже такого оборудования на фундаментах первой группы, когда роль фундамента выполняет станина, практикуется установка станков на виброизолирующих опорах [16]. При недостаточно тщательном подборе или при изменении режима работы станка упругие элементы могут вызывать даже усиление вибраций [17]. Однако в случаях, когда требуется особо малая волнистость и шероховатость обработанной поверхности или при

близком расположении источника вибрации, вышеуказанный способ виброизоляции является недостаточным [18].

В этой связи цель работы заключается в изыскании путей повышения надежности систем виброизоляции шлифовального станка в условиях плавающей мастерской для обеспечения качества обрабатываемых деталей. Задачей является исследование новых структурных вариантов виброизолирующих устройств станка для определения их эксплуатационной надежности и выявления наименее надежных элементов путем определения вероятности их отказов для уменьшения влияния вибрационных воздействий от внешней среды и внутренних факторов на качество обработки.

Методика исследований

Повышение качества обработки в условиях плавающей мастерской непосредственно связано с необходимостью уменьшения вынужденных колебаний станка, передаваемых через поверхность палубы от внешних источников, что достигается при установке его на виброизолирующие устройства.

Общая модель формирования технологической системы шлифовального станка с учетом необходимости повышения качества обработки при шлифовании путем снижения уровня вынужденных колебаний за счет повышения эффективности виброизоляции его несущей системы (рис. 1) включает в себя следующие этапы: формирование цели системы, создание образа ее конечного состояния, обновление конечного состояния (если оно не достигло уровня ответственности конечному образу), выбор образа действия, процесс повышения качества деталей при шлифовании и оценка достигнутого состояния. Процесс повышения качества шлифования (поз. 6, рис. 1) проиллюстрирован алгоритмом (рис. 2), предусматривающим необходимость следующих действий:

- анализ вибрационных взаимодействий системы станка в условиях работы плавающей мастерской (поз. 6.1);
- создание математической модели динамической системы станка (поз. 6.2);
- определение динамических свойств и внешних воздействий на станок (поз. 6.3);

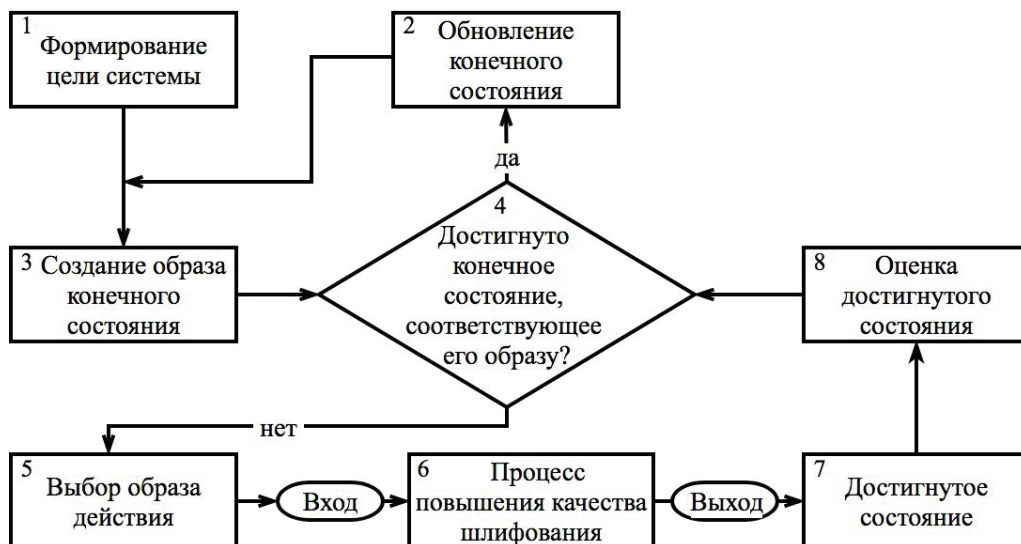


Рис. 1. Общая модель формирования рациональной технологической системы шлифовального станка

Fig. 1. General model of a grinding machine rational technological system formation



Рис. 2. Алгоритм повышения качества процесса шлифования

Fig. 2. Algorithm of grinding process quality improvement

– морфологический анализ виброизолирующих устройств технологического оборудования (поз. 6.4);

– оценка надежности рациональных вариантов виброизолирующих устройств (поз. 6.5);

– структурно-параметрическая оптимизация устройств для виброизоляции оборудования (поз. 6.6);

– рекомендации по повышению эффективности виброизолирующих устройств для улучшения качества обработки в плавучей мастерской (поз. 6.7–6.10).

В настоящей работе подробно рассматриваются этапы 6.4–6.6 предложенного на рис. 2 алгоритма. Известные виброизолирующие опоры станков обладают разными упругодемпфирующими способностями, разными сочетаниями виброизолирующих и ударно-защитных свойств, надежностью, способностью действовать в различных температурных условиях, а также габаритными параметрами и особенностями монтажа. Эти опоры не могут использоваться для оборудования в плавучих мастерских, так как не способны действовать в условиях качки объекта и соответствующих горизонтальных смещений.

Для выбора рациональных вариантов виброизолирующих устройств станка использован метод морфологического анализа, рекомендуемый для решения конструкторских задач общего плана (проектирование станков и комплексов, узлов, механизмов и т. д.). Однако выбор рационального варианта при этом методе на последнем этапе не учитывает реальных условий функционирования объекта. Поэтому принимаем последовательный перебор возможных вариантов элементов в качестве аппарата на этапе формирования множества структур системы виброизолирующего устройства (рис. 3) и оценки этих вариантов по укрупненным показателям. Для этого проводим построение морфологической матрицы (табл. 1) с указанием признаков и характеристик подсистем и элементов с выявлением связей между ними.

Затем синтезируем варианты структуры виброизолирующего устройства при заданных требованиях по следующей методике. Вначале из множества признаков $n = 1, 2, \dots, N$ подсистемы «корпус» (X) (признаки – форма, материал) выделим наиболее приемлемые элементы для создания виброизолирующего устройства (ВУ).



Рис. 3. Структурная схема системы виброизолирующего устройства

Fig. 3. Block diagram of a system of the anti-vibration device

При этом применяем различные типы указанных элементов, обеспечивающих правильное функционирование системы, но обладающих различными характеристиками (надежность, габариты, масса, стоимость).

Пусть имеется M типов n -го узла, причем m – порядковый номер типа данного узла ($m = 1, 2, \dots, M$). Обозначив через X_{nm} совокупность параметров n -го узла M -го типа, множество состояний подсистемы «корпус» выразим в виде матрицы

$$\|X\| = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{21} & \dots & X_{N1} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{N2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{1M} & X_{2M} & \dots & X_{NM} \end{pmatrix}.$$

По аналогии совокупность параметров подсистемы «виброизолятор» обозначим через Y_{kl} , а множество состояний этой подсистемы также запишем в матричной форме $\|Y\|$. Аналогично в виде матрицы выражаем множество состояний подсистемы «устройство крепления» $\|Z\|$ и подсистемы «привод» $\|V\|$.

Обозначение и расшифровка параметров для виброизолирующего устройства приведены в морфологической матрице (табл. 1). Характеристики элементов используем основой для построения графов (рис. 4), иллюстрирующих множество возможных вариантов подсистем устройства, равное числу путей в графе.

Синтез начинаем с выбора вариантов подсистем при включении наиболее существенных

Таблица 1

Table 1

Морфологическая матрица системы виброизолирующего устройства
Morphological matrix of a system of the anti-vibration device

Подсистема Subsystem	Признаки Signs	Элемент/Свойство Element/property	
Корпус (X) (основание)	X1. Форма	X1 ₁ Диск	
		X1 ₂ Цилиндр	
		X1 ₃ Квадрат	
		X1 ₄ Призма	
		X1 ₅ Корпус	
		X1 ₆ Пирамида	
		X1 ₇ Комбинированный	
	X2. Материал	X2 ₁ Металл	
		X2 ₂ Пластик	
		X2 ₃ Углеволокно	
		X2 ₄ Другие неметаллы	
	Виброизолятор (Y)	Y1. Материал	Y1 ₁ Резина
			Y1 ₂ Капролон
			Y1 ₃ Полиуретан
Y1 ₄ Эластомер			
Y1 ₅ Металл			
Y1 ₆ Другие			
Y2. Форма		Y2 ₁ Цилиндр	
		Y2 ₂ Тор	
		Y2 ₃ Конус	
		Y2 ₄ Спираль	
		Y2 ₅ Тарелка	
		Y2 ₆ Переменного сечения	
		Y2 ₇ С внутренней полостью	
		Y2 ₈ Усеченной формы	
		Y2 ₉ В виде мембраны	
		Y2 ₁₀ В виде поршня	
		Y2 ₁₁ Другие	
Y3. Рабочее тело		Y3 ₁ Масло	
		Y3 ₂ Воздух	
		Y3 ₃ Отсутствует	
Y4. Принцип действия		Y4 ₁ Растяжение-сжатие материала	
		Y4 ₂ Изгибные деформации	
		Y4 ₃ Перемещение рабочего тела	

Окончание табл. 1

End of table 1

Подсистема Subsystem	Признаки Signs	Элемент/Свойство Element/property
Устройство крепления (Z)	Z1. К полу	Z1 ₁ Механическое
		Z1 ₂ Жёсткая фиксация
		Z1 ₃ Отсутствует
	Z2. К станку	Z2 ₁ Механическое
		Z2 ₂ Жёсткая фиксация
		Z2 ₃ Упругомеханическая фиксация
Привод (V)	V1. Вид привода	V1 ₁ Электромагнитный
		V1 ₂ Гидравлический
		V1 ₃ Пневматический
		V1 ₄ Комбинированный
		V1 ₅ Ручной
		V1 ₆ Отсутствует
	V2. Вид передачи	V2 ₁ Непосредственно
		V2 ₂ Рычажной системой
		V2 ₃ Другие

признаков с использованием списка технических требований, определяющихся свойствами системы.

В нашем случае исходными свойствами для технологической системы станка 3В12 являются:

1) масса – 3000 кг; 2) операция – круглое шлифование; 3) режимы обработки: частота вращения шпинделя – 78...780 мин⁻¹; частота вращения шлифовального круга – 2240 мин⁻¹; 4) диапазон частот собственных колебаний – $fz \leq 20$ Гц; 5) диапазон частот вынужденных колебаний – $f \leq 10$ Гц.

Осуществляем выбор вариантов подсистемы «корпус», предварительно разработав перечень требований, предъявляемых к корпусу виброизолирующего устройства (X) с учетом его основных функций, а также качественных показателей K_i^I , характеризующих: прочность (повышенная – $K_1^I = 1$, высокая – $K_1^I = 0,75$, средняя – $K_1^I = 0,5$); технологичность (высокая – $K_2^I = 1,0$, низкая – $K_2^I = 0,5$); себестоимость (высокая – $K_3^I = 0,5$, средняя – $K_3^I = 0,75$, малая – $K_3^I = 1,0$).

По формуле $K_c = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{1 - K_i}{n}$ определяем

суммарный качественный показатель для каждой из синтезированных структур. Наибольшее значение ($K_x = 0,93$) получил следующий вариант:

$$X' = X_{117} \begin{vmatrix} X_{11} \\ X_{12} \end{vmatrix} \rightarrow X_{21}.$$

Объект представляет собой металлический корпус комбинированной формы в виде цилиндра с диском, установленным в нижней части.

Аналогичные действия проводим по выбору «виброизолятора» (Y). Наибольшее значение $K_y = 0,84$ имеет структурный вариант:

$$Y' = Y_{11} \rightarrow \begin{vmatrix} Y_{21} \\ Y_{27} \\ Y_{210} \end{vmatrix} \rightarrow Y_{31} \rightarrow \begin{vmatrix} Y_{41} \\ Y_{42} \\ Y_{43} \end{vmatrix}.$$

Объект представляет собой резиновый цилиндр с полостью, внутри которой размещены поршень и рабочее тело (масло), что позволяет использовать принципы растяжения-сжатия,

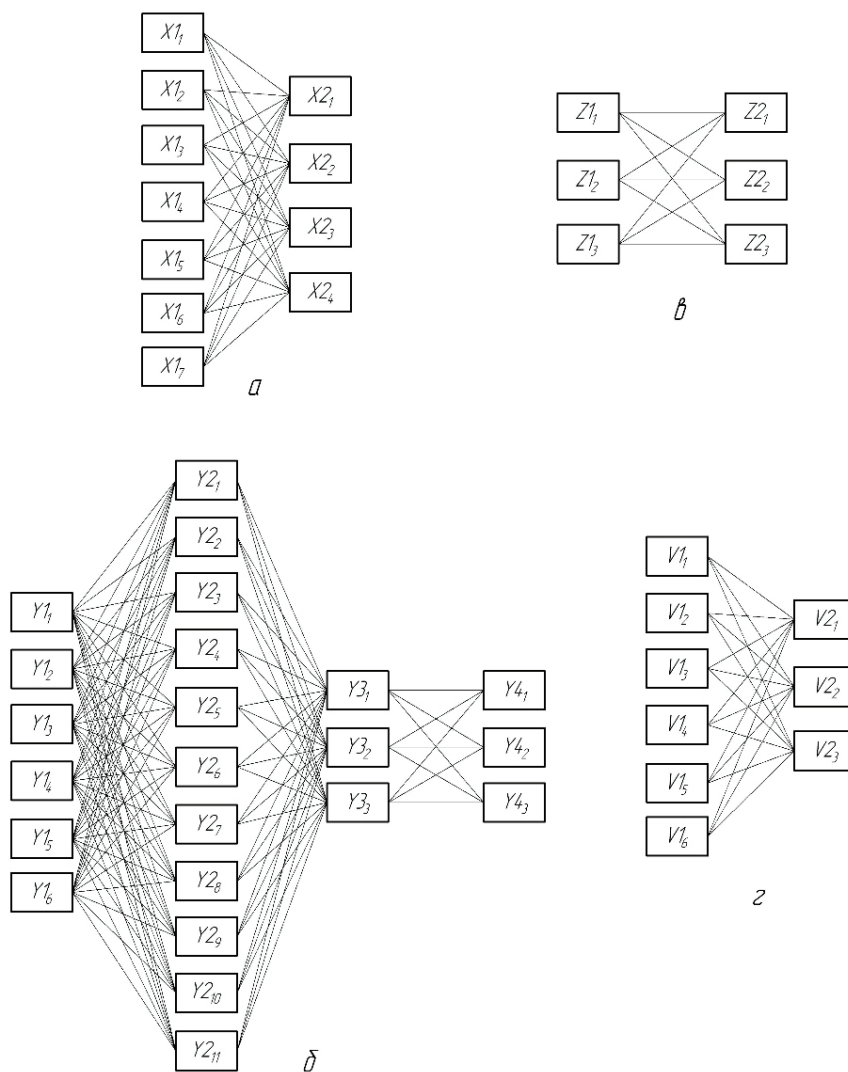


Рис. 4. Графы возможных структурных вариантов подсистем виброизолирующего устройства:

a – корпус (*X*); *б* – виброизолятор (*Y*); *в* – устройство крепления (*Z*); *г* – привод (*V*)

Fig. 4. Graphs of possible structural variants of subsystems of the anti-vibration device:

a – body (*X*); *б* – vibration absorber (*Y*); *в* – fastening device (*Z*); *г* – drive (*V*)

изгибных деформаций, а также перемещения масла через дросселирующие отверстия для гашения колебаний.

Вариант устройства крепления (*Z*) обусловлен заданными условиями работы и может использовать фиксацию к полу (*Z1*) и к станку (*Z2*). Наибольший показатель $K_Z = 0,92$ имеет структурный вариант:

$$Z^I = Z1_7 \rightarrow Z2_3.$$

Он имеет механическое крепление к полу и упруго-механическую фиксацию к станине станка.

После этого выбираем привод (*V*). Наибольшее значение $K_V = 0,92$ имеет следующий вариант:

$$V^I = V1_2 \rightarrow V2_2.$$

На основании этого выбран гидравлический привод с рычажной системой передачи прижимного усилия. Анализ подмножества синтезированных структур виброизолирующего устройства представлен на схеме (рис. 5). При возможном значительном сочетании вариантов на основе перспективы создания устройства из серийно выпускаемых элементов путем модер-

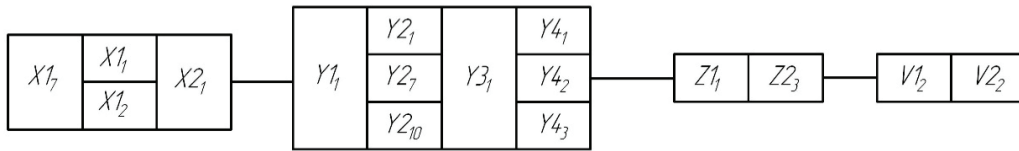


Рис. 5. Структура рационального варианта системы виброизолирующего устройства по качественным показателям

Fig.5. The structure of the rational variant of the system of anti-vibration device according to quality indicators

низации при использовании вышеуказанных качественных критериев оценки подсистем получаем рациональный вариант виброизолирующего устройства:

$$X^I \rightarrow Y^I \rightarrow Z^I \rightarrow V^I .$$

Представленная методика дает возможность синтезировать заданную систему на этапе структурно-компоновочной оптимизации. Дальнейшие теоретические и практические исследования на этапе параметрического синтеза позволили усовершенствовать конструкции виброизолирующих устройств и создать новые виброизолирующую опору [19] и виброизолирующее устройство для станка, эксплуатируемого в плавучей мастерской (рис. 6) [20].

Устройство предполагает повышение надежности виброзащиты металлорежущих станков от внешних колебаний, в том числе и от волнений водной поверхности; упрощает возможность монтажа станочного оборудования плавучих

мастерских. Предназначено для повышения качества деталей на шлифовальных операциях путем уменьшения погрешностей их формы, а также снижения шероховатости и волнистости поверхностей.

Результаты и их обсуждение

Для определения надежности структурных вариантов виброизолирующего устройства (ВУ) требуется проанализировать причины возникновения отказов функционирования (эксплуатационную надежность).

При рассмотрении дискретной системы виброизолирующего устройства учитываем, что ее подсистемы (элементы) отказывают независимо друг от друга, и каждая из них восстанавливается после отказа. Считаем, что исходные свойства подсистемы полностью восстанавливаются, а функционирование с отказами и восстановлениями одной подсистемы не влияют на надежность других. Наступление отказа каждой подсистемы

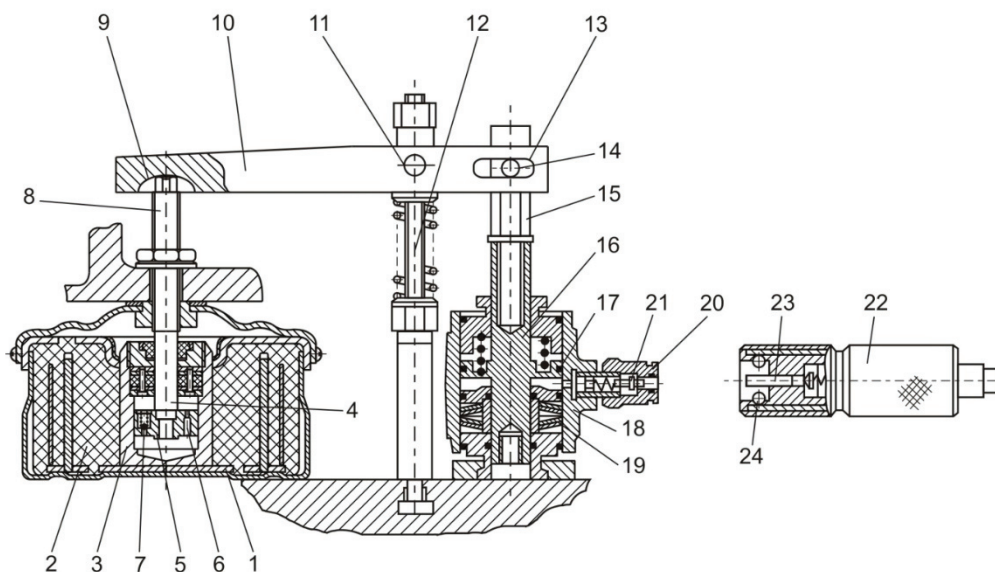


Рис. 6. Общий вид виброизолирующего устройства (Патент UA 51621)

Fig. 6. General view of the anti-vibration device (Patent UA 51621)

образует процесс ее восстановления, причем эти процессы независимы. Примем $F_k(t)$ как обозначение закона распределения времени жизни k -й подсистемы. Допускаем, что он имеет непрерывную плотность $f_k(t)$ и характеризуется средним временем жизни подсистемы T_k при дисперсии σ_k^2 .

Так как с позиции надежности подсистемы в системе ВУ имеют последовательное соединение (см. рис. 6), то их любой отказ приводит к отказу всей системы. Возникновение отказов на одном временном участке не приводит к изменению вероятности возникновения некоторого числа отказов на другом, не пересекающемся с первым. Из этого следует, что в вышеуказанных процессах отсутствует последствие в потоке отказов системы ВУ. При этом предполагается, что в законах распределения $F_k(t)$ имеются непрерывные плотности. Следовательно, среднее число отказов – функция $H(t)$ – непрерывная, и вероятность одновременного появления двух отказов ничтожно мала, т. е. поток отказов системы – ординарный. Приведенные выше доводы позволяют рассматривать ВУ как систему физически дискретную, для которой могут быть характерны состояния S_0, S_1, S_2, S_3, S_4 .

В состоянии S_0 виброизолирующее устройство (ВУ) нормально функционирует, отказы отсутствуют.

В S_1 необходимо восстановление (ремонт) корпуса по причине отказов его функционирования с интенсивностью λ_1 . При этом $\lambda_1 = 1/\bar{T}_k$, где \bar{T}_k – среднее время между двумя отказами функционирования корпуса, ч.

В состоянии S_2 – отказ виброизолятора, характеризующийся потоком с интенсивностью λ_2 . В этом случае $\lambda_2 = 1/\bar{T}_b$, где \bar{T}_b – среднее время между отказами виброизолятора, ч.

В S_3 необходима замена либо ремонт устройства крепления при потоке отказов с интенсивностью λ_3 . Здесь $\lambda_3 = 1/\bar{T}_y$, где \bar{T}_y – среднее время между отказами указанного устройства, ч.

Для состояния S_4 характерен ремонт привода из-за его отказов с интенсивностью λ_4 . При этом $\lambda_4 = 1/\bar{T}_n$, где \bar{T}_n – среднее время между отказами привода, ч.

Величины соответствующих математических ожиданий $\bar{T}_k, \bar{T}_y, \bar{T}_b, \bar{T}_n$ вычисляются по формуле

$$\bar{T} = \sum_{j=1}^m \frac{t_j}{m},$$

где t_j – интервал между $(j-1)$ -м и j -м отказами; m – число отказов соответствующей подсистемы ВУ.

Отказавшая подсистема восстанавливается после отказа с интенсивностями восстановления каждой из подсистем – $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$, причем время восстановления является величиной случайной и подчиняется закону Пуассона:

$$\mu_1 = \frac{1}{\bar{T}_{BK}}; \mu_2 = \frac{1}{\bar{T}_{BB}}; \mu_3 = \frac{1}{\bar{T}_{BY}}; \mu_4 = \frac{1}{\bar{T}_{BN}},$$

где $\bar{T}_{BK}, \bar{T}_{BB}, \bar{T}_{BY}, \bar{T}_{BN}$ – соответственно среднее время восстановления корпуса, виброизолятора, устройства крепления и привода, ч.

При описании размеченного графа состояний системы ВУ (рис. 7) используем обозначения вероятности ее нахождения в каждом из них соответственно: P_0 – нормальной работы (отсутствуют отказы), $P_0 = P(S_0)$; P_1 – отказа корпуса, $P_1 = P(S_1)$; P_2 – отказа виброизолятора, $P_2 = P(S_2)$; P_3 – отказа устройства уплотнения, $P_3 = P(S_3)$; P_4 – отказа привода, $P_4 = P(S_4)$.

Состояние описывается системой уравнений А.Н. Колмогорова:

$$\begin{cases} P_0(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) = \\ = P_1\mu_1 + P_2\mu_2 + P_3\mu_3 + P_4\mu_4, \\ P_1\mu_1 = P_0\lambda_1, \\ P_2\mu_2 = P_0\lambda_2, \\ P_3\mu_3 = P_0\lambda_3, \\ P_4\mu_4 = P_0\lambda_4. \end{cases} \quad (1)$$

Из системы (1) с помощью условия нормирования $\sum_{i=0}^4 P_i = 1$ определяем финальные вероятности:

$$\begin{cases} P_0(1 + \lambda_1/\mu_1 + \lambda_2/\mu_2 + \lambda_3/\mu_3 + \lambda_4/\mu_4)^{-1}, \\ P_1 = P_0\lambda_1/\mu_1, \\ P_2 = P_0\lambda_2/\mu_2, \\ P_3 = P_0\lambda_3/\mu_3, \\ P_4 = P_0\lambda_4/\mu_4. \end{cases} \quad (2)$$

Решение полученной системы уравнений (2) с помощью ЭВМ (рис. 8), результаты расчетов

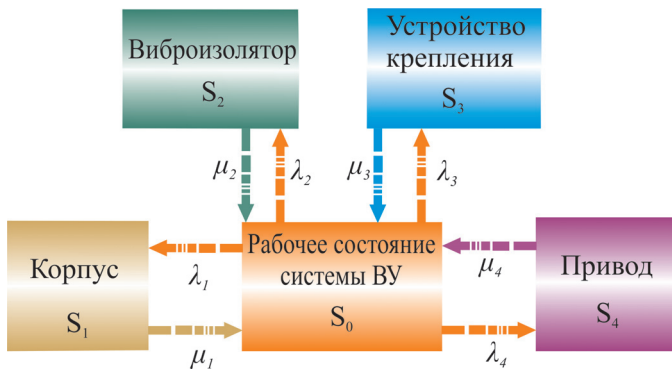


Рис. 7. Размеченный граф состояний системы виброизолирующего устройства с учетом отказов

Fig. 7. Marked state graph of the system of anti-vibration device with regard to failures

вероятностей безотказной работы ВУ и отказов подсистем (табл. 2) позволили на основе эксплуатационных данных по параметрам наработок и восстановлений определить надежность системы и выявить наименее надежные из подсистем, определив вероятности их отказов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что даже имеющий самый высокий уро-

вень вероятности отказов привод ($P_4 = 0,021$, т. е. 2,1 %), далее – виброизолятор ($P_2 = 0,01$, т. е. 1 %), затем – корпус ($P_1 = 0,005$, т. е. 0,5 %) и устройство крепления (вероятность отказа $P_3 = 0,003$, т. е. 0,3 %) достаточно надежны, так как суммарная вероятность их отказов не превышает 4 %. В противном случае выявленные наименее надежные подсистемы могут быть подвергнуты усовершенствованиям путем модернизации конструкции с целью повышения наработки на отказ и сокращения времени их восстановления, что неизбежно увеличит срок службы ВУ.

При продолжении машинного эксперимента вводятся эксплуатационные данные наработок и восстановлений для усовершенствованных вариантов подсистем, и процесс расчетов, начиная с первого этапа, повторяют. Если подсистем, существенно снижающих вероятность безотказной работы ВУ не выявлено (как в данном случае, где даже наименее надежная из них – привод с вероятностью отказа 2,1 %), дальнейшая оптимизация для повышения надежности не проводится.

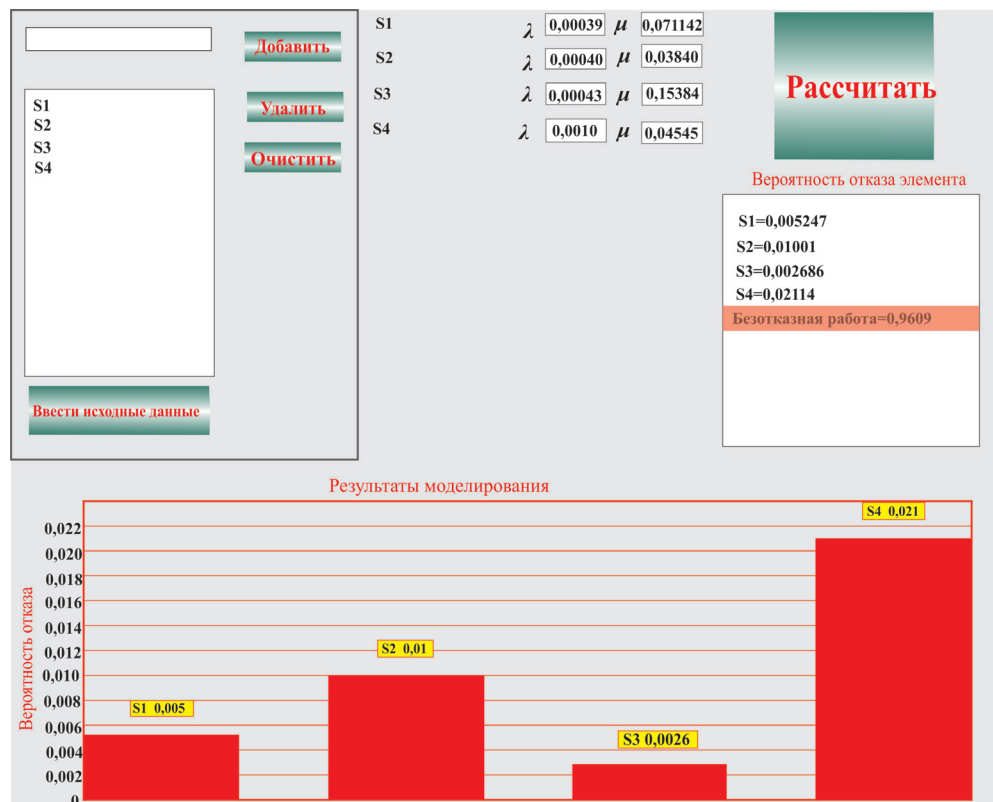


Рис. 8. Результаты программы расчета надежности подсистем виброизолирующего устройства

Fig. 8. Results of calculation of reliability of subsystems anti-vibration device

Показатели надежности подсистем виброизолирующего устройства
The reliability indicators of the subsystems anti-vibration device

Подсистема Subsystem	Интенсивность потока отказов, ч ⁻¹ Failures intensity, h ⁻¹	Интенсивность потока восстановлений, ч ⁻¹ Restoration rate, h ⁻¹	Вероятность отказа Probability of failure
Корпус	0,00039	0,07142	0,0052
Виброизолятор	0,00040	0,03840	0,0100
Устройство крепления	0,00043	0,15384	0,0026
Привод	0,00100	0,04545	0,0211
Вероятность безотказной работы системы ВУ			0,9609

Выводы

Разработанная общая модель формирования рациональной технологической системы станка и алгоритм определили направления поиска путей обеспечения качества деталей при шлифовании в условиях плавучей мастерской, в частности, за счет усовершенствования и повышения надежности систем виброизолирующего устройства. Морфологический анализ и синтез структур виброизолирующих устройств позволили по укрупненным качественным показателям получить рациональный вариант структуры системы ВУ, предназначенной для шлифовальных станков, работающих в условиях плавучей мастерской [19]. Параметрический синтез полученного варианта ВУ привел к созданию более надежных конструкций виброизолирующей опоры и виброизолирующего устройства станка плавучей мастерской, позволяющих осуществлять защиту станка от внешних воздействий, в том числе возникающих от ударов волн о корпус плавучего основания мастерской в результате волнений водной поверхности [20].

По результатам исследования надежности виброизолирующего устройства с помощью размеченного графа состояний и уравнений А.Н. Колмогорова на основе эксплуатационных данных по параметрам наработок и восстановлений определена надежность системы (вероятность безотказной работы $P_0 = 0,96$) и выявлены вероятности отказов подсистем устройства.

Полученный рациональный вариант ВУ в дальнейшем подвергают проверке в реальных условиях функционирования станка и на лабораторном стенде с целью получения эксплуатационных данных по качеству деталей при шлифовании в условиях плавучей мастерской с различными уровнями внешних воздействий.

Список литературы

1. Siddique A.N., Khan Z.A., Mallick Z. Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the process parameters in in-feed centerless cylindrical grinding. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2010. – Vol. 46, iss. 9–12. – P. 983–992. – doi: 10.1007/S00170-009-2159-8.
2. Li G.F., Wang L.S., Yang L.B. Multi parameter optimization and control of the cylindrical grinding process // Journal of Material Processing Technology. – 2002. – Vol. 129, iss. 1. – P. 232–236. – doi: S0924-0136(02)00607-6.
3. Kumar S., Dhanabalan S. A review of cylindrical grinding process parameters by using various optimization techniques and their effects on the surface integrity, wear rate and MRR // International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD). – 2018. – Vol. 5, iss. 01. – P. 719–729. – doi: 10.13140/RG.2.2.30801.43368.
4. Kumar S., Bhatia O. Review of analysis and optimization of cylindrical grinding process parameters on material removal rate of En15AM steel // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. – 2015. – Vol. 12, iss. 4, ver. 2. – P. 35–43.

5. Subsurface damage in high-speed grinding of brittle materials considering kinematic characteristics of the grinding process / C. Wang, Q. Fang, J. Chen, Y. Liu, T. Jin // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 83, iss. 5–8. – P. 937–948. – doi: 10.1007/s00170-015-7627-8.

6. Kumar P., Kumar S., Kumar Dev D. Grinding processes, a review // *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*. – 2016. – Vol. 4, iss. 9. – P. 68–72.

7. Kumar P., Kumar A., Singh B. Optimization of process parameters in surface grinding using response surface methodology // *International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology (IJRMET)*. – 2013. – Vol. 3, iss. 2. – P. 245–252.

8. Vinay P.V., Rao C.S. Grinding mechanics and advances – a review // *International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD)*. – 2013. – Vol. 5, no. 2. – P. 41–74.

9. Srinivasan K. Grinding chatter and vibrations // King R.I., Hahn R.S. *Handbook of modern grinding technology*. – New York; London: Chapman and Hall, 1986. – P. 119–169.

10. Kumar S., Bhatia O.S. Experimental analysis and optimization of cylindrical grinding process parameters on surface roughness of En15AM steel // *International Journal of Engineering Research and Applications*. – 2015. – Vol. 5, iss. 7, pt. 2. – P. 01–08.

11. Optimization of grinding parameters for minimum surface roughness by Taguchi parametric optimization technique / D. Pal, A. Bangar, R. Sharma, A. Yadav // *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering (IJMIE)*. – 2012. – Vol. 1, iss. 3. – P. 74–78.

12. Лобанов Д.В., Мулюхин Н.В. Методика прогнозирования поврежденности твердого сплава при затачивании инструмента для обработки неметаллических композитов // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2018. – Т. 5, № 1–2. – С. 78–84.

13. Солер Я.И., Хоанг Н.А. Влияние глубины резания на высотные шероховатости инструментов из

стали У10А при плоском шлифовании кругами из кубического нитрида бора // *Авиациностроение и транспорт Сибири: сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции / Иркутский национальный исследовательский технический университет*. – Иркутск, 2017. – С. 250–254.

14. Soler Y.I., Van Le N., Dinh Si M. Influence of rigidity of the hardened parts on forming the shape accuracy during flat grinding // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 129. – P. 01076. – doi: 10.1051/mateconf/201712901076.

15. Солер Я.И., Нгуен В.К., Хоанг Н.А. Прогнозирование режимов чистового шлифования быстрорежущих пластин переменной податливости при многопараметрической оптимизации шероховатости // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2017. – № 4 (685). – С. 35–46.

16. Fomin A.A., Gusev V.G. Vibrational displacement of a spindle with static disequilibrium of the cutting tool // *Russian Engineering Research*. – 2013. – Vol. 33, N 7. – P. 412–415. – doi: 10.3103/S1068798X1307006X.

17. Фролов К.В., Фурман Ф.А. Прикладная теория виброзащитных систем. – М.: Машиностроение, 1980. – 276 с.

18. Владецкая Е.А. Моделирование вибрационных воздействий от внешних источников при шлифовании деталей в лабораторных условиях / Е.А. Владецкая // *Вестник современных технологий*. – 2016. Вып. 4. – С. 25–34.

19. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавучих мастерских / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Д.О. Владецкий, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: Инфра-М, 2018. – 154 с. – ISBN 978-5-9558-0598-6.

20. Патент 158629 Российская Федерация, МПК В 23 Q 1/25, В 23 Q 1/44, F 16 F 9/14. Устройство автоматической виброзащиты металлорежущего станка / Е.А. Владецкая, А.О. Харченко, С.М. Братан. – № 2015125213/02; заявл. 25.06.2015, опубл. 20.01.2016, Бюл. № 2. – 5 с.

Конфликт интересов

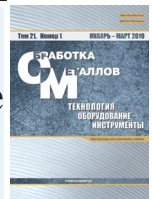
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov







Analysis and Synthesis of Vibration Isolation System of a Grinding Machine with Account of the Operational Reliability of its Elements

Sergey Bratan ^{a,*}, Alexander Kharchenko ^b, Ekaterina Vladetskaya ^c, Andrey Kharchenko ^d

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation

^a  <http://orcid.org/0000-0002-9033-1174>,  serg.bratan@gmail.com, ^b  <http://orcid.org/0000-0003-1704-9380>,  khao@list.ru,

^c  <http://orcid.org/0000-0002-2774-3088>,  vladetska@rambler.ru, ^d  <http://orcid.org/0000-0001-8797-6046>,  a.a.kharchenko@sevsu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 December 2018

Revised: 12 February 2019

Accepted: 15 February 2019

Available online: 15 March 2019

Keywords:

Grinding machine
 Floating workshop
 Anti-vibration support
 Anti-vibration device
 Morphological matrix
 Marked state graph
 Reliability

ABSTRACT

Introduction. A feature of the grinding machine operation under the floating workshop conditions is the vibration that reduces the accuracy and increases the roughness of the machined surfaces. The scatter of output quality indicators is caused by disturbing influences, some of which are not controlled during machining and lead to instability of the product's properties. Therefore reducing the level of machine-forced vibrations by the vibration isolation efficiency, with regard to the machining features, is the crucial task with its solution leading to the industrial process indicators increasing. **The purpose of the work:** develop the ways of improving the reliability of the vibration isolation systems of the grinding machine under the under the floating workshop conditions. The structural modifications of the machine vibration isolation devices were investigated in the paper to determine their operational reliability and to identify the weak points through determining their failures probability to reduce the influence of vibration effects from the outside environment and internal factors on the processing quality. **The methods of investigation.** The used research techniques are morphological analysis, structural-layout and parametric synthesis based on the elements reliability assessment using homogeneous Markov chains. **Results and discussion.** Possibility of rational structural design of vibration-insulating devices for grinding machine placed in a floating workshop at the stages of analysis and synthesis at the structural and layout optimization level according to aggregated quality indicators is presented. It is shown that parametric synthesis and additional theoretical and practical studies of real vibration-insulating devices allows new design of the vibration-insulating device of a floating workshop machine. The research of the operational reliability with regard to the failure and restoration rates of subsystems using the marked state graph and the equations of final probabilities allows us to determine the operational reliability of vibration-insulating device (reliability function, $P_0=0,96$), as well subsystems' reliability by means of computer experiment. It is exposed that the new design of the support and vibration isolation device created as a result of parametric synthesis increases the reliability of the machine vibration protection. The presented results and subsequent tests proved the better quality of ground parts produced with new devices under external equipment vibration effects as well as under the sea swell, on the floating base of the workshop (not exposed in the paper). The presented results verify the prospects of the developed approach for the modernization of floating workshops machine tools that perform complex operation of high-precision parts manufacturing in the aquatic and offshore areas.

For citation: Bratan S.M., Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A., Kharchenko A.A. Analysis and synthesis of vibration isolation system of a grinding machine with account of the operational reliability of its elements. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 35–49. doi:10.17212/1994-6309-2019-21.1-35-49. (In Russian).

* Corresponding author

Bratan Sergey M., D. Sc. (Engineering), Professor
 Sevastopol State University,
 33 Universitetskaya str,
 299053, Sevastopol, Russian Federation
 Tel.: +7 (978)7155019, e-mail: serg.bratan@gmail.com

References

1. Siddique A.N., Khan Z.A, Mallick Z. Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the process parameters in in-feed centerless cylindrical grinding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, vol. 46, iss. 9–12, pp. 983–992. doi: 10.1007/S00170-009-2159-8.
2. Li G.F., Wang L.S., Yang L.B. Multi parameter optimization and control of the cylindrical grinding process. *Journal of Material Processing Technology*, 2002, vol. 129, iss. 1, pp. 232–236. doi: S0924-0136(02)00607-6.
3. Kumar S., Dhanabalan S. A review of cylindrical grinding process parameters by using various optimization techniques and their effects on the surface integrity, wear rate and MRR. *International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD)*, 2018, vol. 5, iss. 01, pp. 719–729. doi: 10.13140/RG.2.2.30801.43368.
4. Kumar S., Bhatia O. Review of analysis and optimization of cylindrical grinding process parameters on material removal rate of En15AM steel. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2015, vol. 12, iss. 4, ver. 2, pp. 35–43.
5. Wang C., Fang Q., Chen J., Liu Y., Jin T. Subsurface damage in high-speed grinding of brittle materials considering kinematic characteristics of the grinding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 83, iss. 5–8, pp. 937–948. doi: 10.1007/s00170-015-7627-8.
6. Kumar P., Kumar S., Kumar Dev D. Grinding processes, a review. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, 2016, vol. 4, iss. 9, pp. 68–72.
7. Kumar P., Kumar A., Singh B. Optimization of process parameters in surface grinding using response surface methodology. *International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology (IJRMET)*, 2013, vol. 3, iss. 2, pp. 245–252.
8. Vinay P.V., Rao C.S. Grinding mechanics and advances – a review. *International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD)*, 2013, vol. 5, no. 2, pp. 41–74.
9. Srinivasan K. Grinding chatter and vibrations. King R.I., Hahn R.S. *Handbook of modern grinding technology*. New York, London, Chapman and Hall, 1986, pp. 119–169.
10. Kumar S., Bhatia O.S. Experimental analysis and optimization of cylindrical grinding process parameters on surface roughness of En15AM steel. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2015, vol. 5, iss. 7, pt. 2, pp. 01–08.
11. Pal D., Bangar A., Sharma R., Yadav A. Optimization of grinding parameters for minimum surface roughness by Taguchi parametric optimization technique. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering (IJMIE)*, 2012, vol. 1, iss. 3, pp. 74–78.
12. Lobanov D.V., Mulyukhin N.V. Metodika prognozirovaniya povrezhdennosti tverdogo splava pri zatachivanii instrumenta dlya obrabotki nemetallicheskih kompozitov [Technique for predicting damage to a hard alloy when grinding a tool for processing non-metallic composites]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii = Actual problems in machine building*, 2018, vol. 5, no. 1–2, pp. 78–84. (In Russian).
13. Soler Ya.I., Khoang N.A. Vliyanie glubiny rezaniya na vysotnye sherokhovatosti instrumentov iz stali U10A pri ploskom shlifovanii krugami iz kubicheskogo nitrida bora [Effect of cutting depth on the high-altitude roughness of tools made of steel U10A with flat grinding with cubic boron nitride]. *Aviamashinostroenie i transport Sibiri [Aircraft engineering and transport of Siberia]*. Irkutsk, 2017, pp. 250–254. (In Russian).
14. Soler Ya.I., Van Le N., Dinh Si M. Influence of rigidity of the hardened parts on forming the shape accuracy during flat grinding. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, p. 01076. doi: 10.1051/mateconf/201712901076.
15. Soler Ya.I., Nguen V.K., Khoang N.A. Prognozirovanie rezhimov chistovogo shlifovaniya bystrorezhushchikh plastin peremennoi podatlivosti pri mnogoparametricheskoi optimizatsii sherokhovatosti [Prediction of fine grinding modes of high-speed plates of variable compliance with multiparameter optimization of roughness]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2017, no. 4 (685), pp. 35–46.



16. Fomin A.A., Gusev V.G. Vibrational displacement of a spindle with static disequilibrium of the cutting tool. *Russian Engineering Research*, 2013, vol. 33, no. 7, pp. 412–415. doi: 10.3103/S1068798X1307006X.
17. Frolov K.V., Furman F.A. *Prikladnaya teoriya vibrozashchitnykh sistem* [Applied theory of vibration protection systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1980. 276 p.
18. Vladetskaya E.A. Modelirovanie vibratsionnykh vozddeystvii ot vneshnikh istochnikov pri shlifovanii detalei v laboratornykh usloviyakh [Modeling vibration exposure from external sources when grinding the details under]. *Vestnik sovremennykh tekhnologii = Journal of modern technologies*, 2016, no. 4, pp. 25–34.
19. Bratan S.M., Vladetskaya E.A., Vladetskii D.O., Kharchenko A.O. *Povyshenie kachestva detalei pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh* [Improving the quality of parts when grinding in floating workshops]. Moscow, Vuzovskii uchebnyk Publ., Infra-M Publ., 2018. 154 p. ISBN 978-5-9558-0598-6.
20. Vladetskaya E.A., Kharchenko A.O., Bratan S.M. *Ustroistvo avtomaticheskoi vibrozashchity metallorazreshchego stanka* [Device of automatic vibroprotection of the metal-cutting machine]. Patent RF, no. 158629, 2016.

Conflicts of Interest

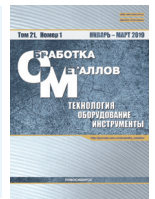
The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Моделирование методом конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния в сменных многогранных пластинах червячной фрезы

Дмитрий Василега^a, Виталий Куреев^b, Виталий Зырянов^{c,*}

Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, г. Тюмень, 625000, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0001-7618-7906>, d_vasilega@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-2285-1036>, kireevvv@tyuiu.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-8191-3930>, zyrjanovva@tyuiu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914.025.7

История статьи:

Поступила: 11 октября 2018
 Рецензирование: 23 января 2019
 Принята к печати: 29 января 2019
 Доступно онлайн: 15 марта 2019

Ключевые слова:

Зубофрезерование
 Твердый сплав
 Сборная червячная фреза
 Напряженно-деформированное состояние режущих элементов

АННОТАЦИЯ

Введение. Инструментальная оснастка играет важную роль в работе машиностроительных предприятий. Наиболее важным в оснащении металлорежущего инструмента является замена режущей части из группы быстрорежущих сталей на режущую часть, изготовленную из твердого сплава, которая, в свою очередь, дает повышение стойкости и общей работоспособности режущего инструмента. Когда режущая способность материала инструмента увеличивается, взаимозаменяемость падает. Важным является всесторонний исследовательский подход, который учитывает проектирование инструмента, использующего твердый WC-Co. Проектирование, изготовление и испытание зубчатых режущих инструментов, отработка режимов резания должны проводиться в отношении конкретной обрабатываемой детали и ее материала. При разработке такого типа инструмента необходимо учитывать особенности сплава WC-Co как режущего материала, режимы резания, разрушение инструмента и другие моменты, связанные с его использованием. **Цель работы:** изучить влияние геометрии сменной многогранной пластины на распределение опасных напряжений растяжений. **В работе исследованы** результаты расчета напряженного деформированного состояния в сменной пластине из материала WC-Co. Зоны растяжения и сжатия наблюдаются на основной режущей кромке. Концентрация опасных растягивающих напряжений расположена в переходной зоне между прямой боковой режущей кромкой к вершине, так как именно в этой зоне имеется наибольшая стесненность резания. Соответственно наибольшее разрушение произойдет в этой зоне. Важно то, что в этой части режущей кромки будет происходить самый большой износ по задней поверхности. **Методами исследования** являются применение программы конечноэлементного анализа ANSYS для выявления опасных напряжений растяжения σ_1 . **Результаты и обсуждение.** Анализ изолиний распределения напряжений показал, что растягивающие напряжения вдоль передней поверхности сменной режущей пластины уменьшаются из-за того, что каждая сменная режущая пластина срезает свою часть материала. Первой в работу вступает зауженная режущая пластина, которая срезает металл верхней частью режущей пластины, а затем работает заниженная режущая пластина, которая работает боковыми режущими кромками. В результате проведенных исследований было установлено, что с применением прогрессивной схемы резания по сравнению со стандартной схемой, у которой исходный профиль производящей рейки изготовлен по DIN3972 при зубофрезеровании, существенно снижаются опасные напряжения растяжения в режущих твердосплавных пластинах.

Для цитирования: Василега Д.С., Куреев В.В., Зырянов В.А. Моделирование методом конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния в сменных многогранных пластинах червячной фрезы // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 50–60. – doi:10.17212/1994-6309-2019-21.1-50-60.

Введение

Процессу формообразования зубчатых колес, а также повышению производительности и стойкости инструмента было посвящено множество научных работ [1–4]. В них проводились исследования инструмента в зависимости от различных факторов: кинематических параметров процесса резания [5]; влияния на стойкость

*Адрес для переписки

Зырянов Виталий Андреевич, аспирант
 Тюменский индустриальный университет
 ул. Володарского, 38,
 625000, г. Тюмень, Россия
 Тел.: 8 (919) 924-07-89, e-mail: zyrjanovva@tyuiu.ru

зубообрабатывающих инструментов [6] в условиях однопроходной и многопроходной обработки; геометрических и конструктивных параметров зубообрабатывающих фрез [7]; технологических параметров режимов резания [8]; схем резания зубообрабатывающими фрезами, характеризующихся различным сочетанием направлений подачи [9]; технического состояния металлорежущего оборудования; методов врезания в обрабатываемую заготовку [10]; материала инструмента и заготовки; наличия или отсутствия смазывающей охлаждающей жидкости; требований, предъявляемых к точности и качеству процесса резания [11]. В исследованиях процесса формообразования делается заключение о том, что на стойкость зубообрабатывающего инструмента в значительной степени влияют размеры срезаемых слоев, оказывающих свое воздействие на износ каждого зуба фрезы отдельно и в целом на весь режущий инструмент, мощность резания и крутящий момент, что служит препятствием для выбора оптимальных режимов резания.

Эти выводы подтверждаются исследованиями торцевого и цилиндрического фрезерования, которые показывают, что размеры разрезаемого слоя (длина и толщина) в момент врезания и его выхода из зоны резания с заготовкой при равных условиях определяют силы резания и износ зубьев червячной фрезы. Результаты коррекции профиля и высоты зубьев инструмента червячного типа, выполненные с целью выравнивания распределенной нагрузки на них, привели к снижению износа режущих зубьев червячной фрезы. Исходя из этого задачи комплексной оптимизации параметров фрезерования зубчатых колес решаются с учетом состояния металлорежущего станка, режущего инструмента и обрабатываемой заготовки.

Инструментальная оснастка имеет большое значение в работе машиностроительных предприятий. Однако наиболее важным элементом оснащения технологического оборудования является металлорежущий инструмент [12–14]. Замена инструмента из быстрорежущей стали на режущий инструмент с использованием спеченных твердых сплавов WC—Co [15–17] дает повышение производительности и общей эффективности обработки [18–24] за счет увеличения режущей способности материала, но при

этом наблюдается снижение универсальности применения инструмента. Таким образом, при разработке такого типа инструмента необходимо учитывать особенности режущего материала, режимы резания и другие факторы, относящиеся к его эксплуатации [25–28]. Целью настоящей работы является повышение работоспособности червячных фрез с использованием сменных многогранных пластин на основе исследования напряженно-деформированного состояния. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- 1) проведение имитационного моделирования процесса зубофрезерования;
- 2) определение поперечных сечений срезаемых слоев;
- 3) исследование напряженного состояния сменных многогранных пластин.

Методика исследований

Для выполнения поставленных задач необходимо было провести исследования процессов загрузки, напряженно-деформированного состояния методом имитационного моделирования с использованием САД-системы Компас-3D и САЕ-системы конечноэлементного анализа ANSYS. Исследование воздействия геометрии режущей пластины из твердого сплава WC—Co на их деформированное состояние в плоскости схода стружки поможет определить влияние распределения напряжений в пластине при одинаковых условиях работы инструмента (нарезаемый модуль, количество зубьев колеса и подаче инструмента), а также поможет определить зоны наибольших деформаций на передней поверхности [29–34].

Метод имитационного моделирования процесса резания заключается в том, что наглядно показано положение режущего инструмента в процессе обработки. Это дает возможность отследить траекторию движения червячной фрезы и обрабатываемой заготовки, впоследствии можно выявить поперечное сечение срезаемого слоя. Величина площадей поперечных сечений срезаемых слоев продемонстрирует, как режущие пластины загружаются в процессе обработки. Для того чтобы графически отобразить процесс формообразования, важно расположить в опре-

деленной последовательности обрабатываемую заготовку и червячную фрезу.

Для того чтобы привести доводы об эффективности прогрессивной схемы резания, был промоделирован процесс зубообработки.

Для образца была взята червячная фреза с производящей рейкой, изготовленной по DIN 3972 ($m = 5$ мм, количество режущих зубьев равно семи, число инструментальных реек – восьми).

Параметры нарезаемого зубчатого колеса: $m = 5$ мм, $Z = 30$, $D_f = 150$ мм. Реализовывался способ осевого резания, т. е. подача режущего инструмента осуществлялась вдоль оси обрабатываемой заготовки (рис. 1).

Моделирование процесса зубообработки заключается в демонстрации червячной фрезы в процессе резания. Это дает нам возможность проследить траекторию движения режущего инструмента по отношению к обрабатываемой заготовке, вследствие этого формируются площади поперечного сечения срезаемого слоя. Величина площади поперечного сечения срезаемого слоя показывает, как загружаются режущие пластины.

Для того чтобы графическим способом осуществить моделирование процесса зубообработки, нужно в правильной последовательности расположить нарезаемое зубчатое колесо и режущий инструмент.

1. Изображается окружность, равная траектории движения первой режущей пластины при зубообработке.

2. Чертится эскиз обрабатываемой заготовки с обозначением делительного диаметра.

3. Между центрами режущего инструмента и зубчатого колеса обозначается межосевое расстояние.

4. Располагается окружность B (показывает окружной диаметр червячной фрезы по вершинам режущих зубьев) на расстоянии между центрами режущего инструмента и зубчатого колеса (см. рис. 1);

5. Окружность B переносится на определенную высоту таким образом, чтобы эта окружность только касалась профиля зубчатого колеса.

6. Осуществляется выбор величины подачи режущего инструмента на оборот обрабатываемой заготовки S (мм/об).

7. Откладывается величина подачи режущего инструмента S от центра окружности вдоль оси обрабатываемой заготовки до тех пор, пока ось режущего инструмента не будет в одной плоскости с верхним торцом обрабатываемой заготовки.

8. Перемещаем окружность по вертикали вдоль оси колеса на величину S . Таким образом, осуществляется моделирование процесса подачи фрезы. При этом, чтобы зафиксировать положение окружности при каждом перемещении на подачу S , необходимо в месте пересечения окружности и колеса изобразить вертикальную линию, которая будет символизировать величину врезания фрезы в заготовку на одну величину подачи.

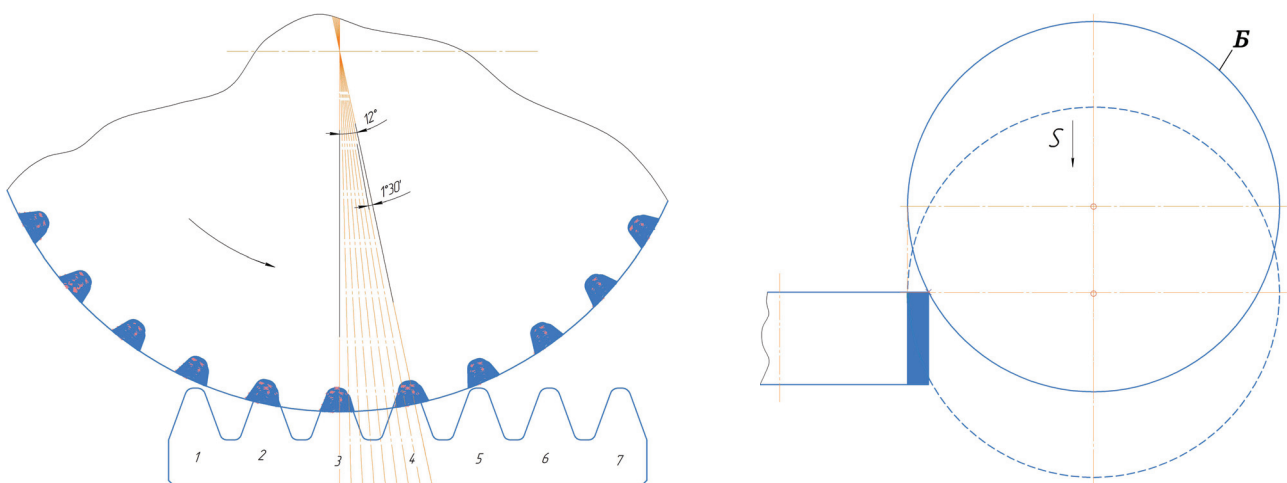


Рис. 1. Имитация процесса зубообработки червячной фрезой с производящей рейкой, изготовленной по DIN3972

Fig. 1. Simulation of the gear processing with a hob cutter with a counterpart rack manufactured in accordance with DIN3972

9. В результате таких перемещений окружности формируются траектории движений режущих пластин, полученные за все время осуществления подачи.

10. Далее определяется угловой шаг поворота колеса S_k . Данная характеристика дает информацию об угле поворота обрабатываемой заготовки при врезании в корпус следующей по счету пластины.

В процессе осуществления численного моделирования для червячных фрез с производящей

рейкой, изготовленной по прогрессивной схеме резания (рис. 2), производились замеры площадей поперечного сечения срезаемого слоя.

Результаты и их обсуждение

По результатам замеров полученных площадей поперечного сечения срезаемых слоев для стандартной и прогрессивной схем резания осуществлялось построение графиков работы зубьев [35, 36], из которых можно констатировать

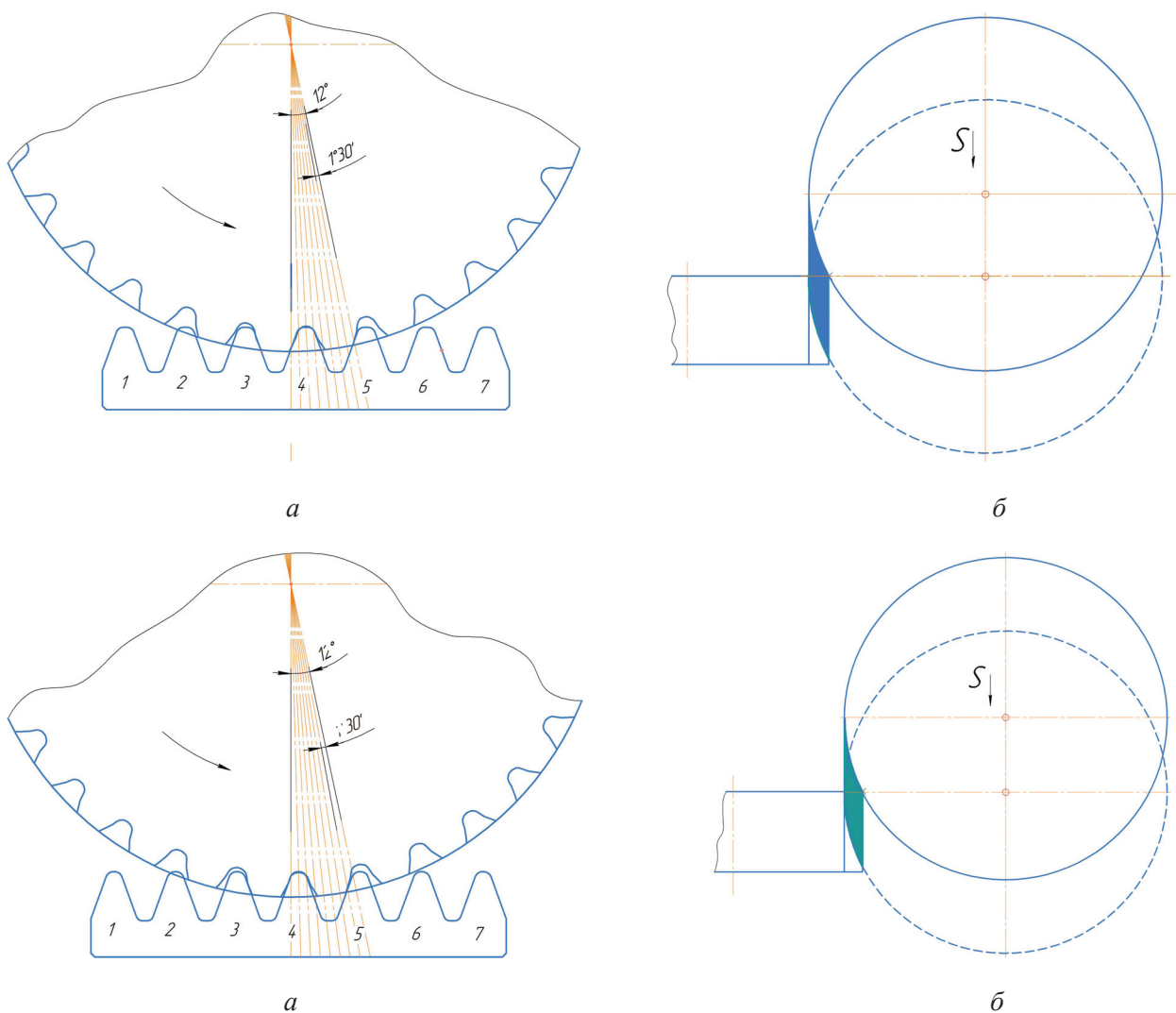


Рис. 2. Имитация процесса зубообработки червячной фрезой с производящей рейкой, изготовленной по прогрессивной схеме резания:

a, б – имитация процесса зубообработки червячной фрезой для заниженного исходного контура инструментальной рейки (e1); *в, г* – имитация процесса зубообработки червячной фрезой для зауженного исходного контура инструментальной рейки (e2)

Fig. 2. Simulation of the gear processing with a hob cutter with a counterpart rack manufactured in accordance with the progressive scheme of cutting:

a, б – simulation of the gear processing with a hob cutter for the underestimated initial contour of a rack-type tool (e1); *в, г* – simulation of the gear processing with a hob cutter for the narrowed initial contour of a rack-type tool (e2)

об изменениях прогрессивного фрезерования в сравнении с полнопрофильным. Нагрузка на зубья снижается, и наблюдается более равномерное ее распределение на них, что, в свою очередь, является положительным фактором для применения инструмента, оснащенного твердым сплавом WC-Co. Максимальная нагрузка на зуб № 4 смещается ближе к началу фрезерования (площадь поперечного сечения срезаемого слоя составляет порядка $1,9 \text{ мм}^2$). Максимальная площадь поперечного сечения срезаемого слоя зуба № 3 составляет $1,4 \text{ мм}^2$. Зубья № 2 и 5 задействованы меньше, чем в полнопрофильной схеме резания, площади поперечного сечения срезаемых слоев для этих зубьев не превышают $0,4 \text{ мм}^2$.

По результатам сравнительного анализа для полнопрофильной и прогрессивной схемы фрезерования можно сделать следующие выводы. 1. Если в случае полнопрофильного фрезерования площадь срезаемых слоёв постепенно увеличивается к середине времени нарезания и после этого начинает постепенно уменьшаться, то при прогрессивном резании максимальные площади срезаемых слоев находятся в самом начале резания. При этом нагрузка на прогрессивные зубья более равномерна, что более благоприятно для конструкции инструмента. 2. При прогрессивном резании уменьшается площадь поперечного сечения срезаемого слоя в сравнении с полнопрофильным резанием. Максимальная площадь у полнопрофильной фрезы составляет $2,85 \text{ мм}^2$, у прогрессивной фрезы – $1,9 \text{ мм}^2$. Уменьшение площади поперечного сечения срезаемого слоя (а соответственно и нагрузки на зубья) также способствует уменьшению износа режущих кромок зубьев. 3. В прогрессивной схеме резания больше задействованы зубья № 3 и 4, а зубья № 2 и 5 почти не нагружены в сравнении с полнопрофильной схемой. Таким образом, можно заключить, что при прогрессивном резании нагрузка на зубья будет меньше, чем при полнопрофильном благодаря разделению стружки и попеременной работе зубьев. Меньшая нагрузка снижает силы резания и тем самым повышает эффективность режущего инструмента.

Следующий важный этап исследований – осуществление конечно-элементного моделирования напряжено-деформированного состояния сменных режущих пластин в условиях полнопрофильной и прогрессивной схем резания.

Была проведена экспериментальная задача по совершенствованию конечно-элементной сетки и определено влияние количества элементов в сетке на результаты напряженного состояния в сплаве WC-Co с использованием программы конечно-элементного анализа ANSYS. Далее в программный комплекс вносились условия только тех моментов, когда во время процесса резания наблюдались самые большие площади срезаемого слоя при различных профилях производящей рейки.

Для задания корректных граничных условий нужно задать свойства материала, коэффициент Пуассона и модуль Юнга, распределенную нагрузку по передней поверхности пластины и граничные условия по заделкам.

Самые наибольшие площади поперечного сечения срезаемых слоев передней поверхностью пластины при обычной схеме зубофрезерования (производящая рейка изготовлена по DIN 3972) показаны на рис. 3.

На рис. 4 изображены самые наибольшие площади поперечного сечения срезаемых слоев передней поверхностью пластины при прогрессивной схеме зубофрезерования.

Полученные изображения цветовой градации напряжений σ_1 для твердого сплава WC-Co с производящей рейкой, изготовленной по DIN3972, показаны на рис. 5. На режущих лезвиях пластины имеются зоны растяжения и

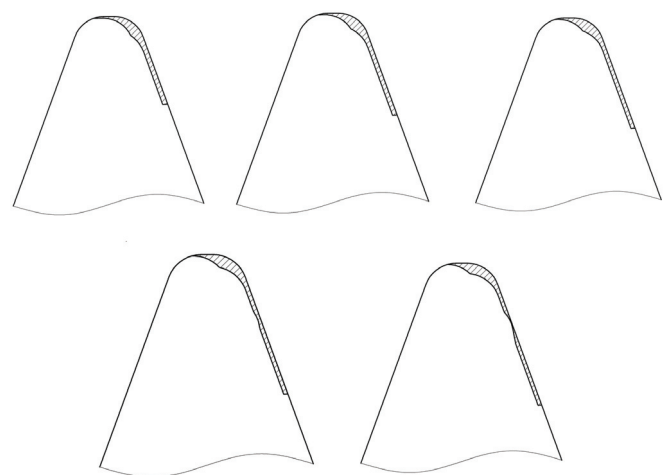


Рис. 3. Поперечные сечения срезаемых слоев для инструмента с производящей рейкой, изготовленной по DIN3972

Fig. 3. Cross-sections of the cut-off layers for the tool with a counterpart rack manufactured in accordance with DIN3972

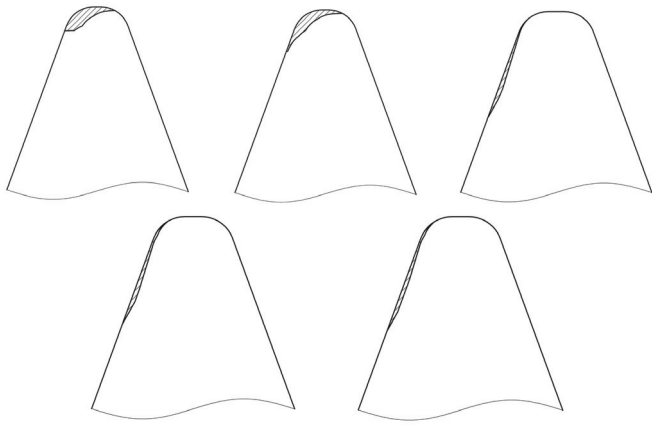


Рис. 4. Поперечные сечения срезаемых слоев для инструмента с прогрессивной схемой резания

Fig. 4. Cross-sections of the cut-off layers for the tool with the progressive scheme of cutting

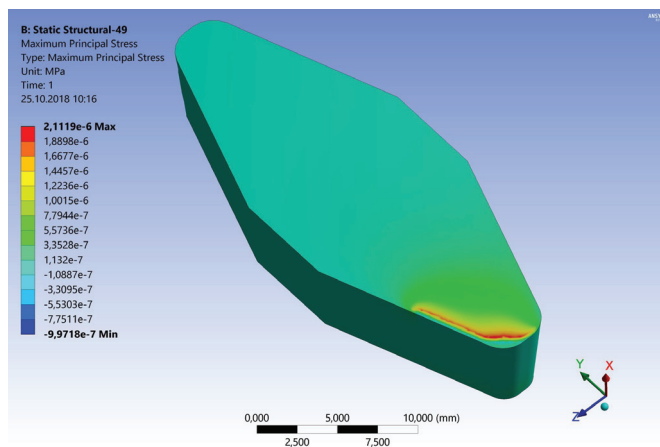


Рис. 5. Картины напряжений растяжения σ_1 для пластин из твердого сплава WC–Co с производящей рейкой, изготовленной по DIN3972 (цветовая градация напряжений растяжения σ_1)

Fig. 5. Pictures of tensile stresses σ_1 for WC–Co hard alloy plates with a counterpart rack manufactured in accordance with DIN3972 (color gradation of tensile stresses σ_1)

зоны сжатия. Концентрация напряжений растяжения находится в зоне, где стыкуются вершинная режущая кромка и входная режущая кромка. В этой области на передней поверхности будут образовываться лунки, снижающие прочность режущей кромки, что приводит к затруднению образования стружки. Соответственно наибольшее разрушение по передней и задней поверхности будет происходить именно в этой зоне, так как именно в этой области наблюдается самая большая стесненность резания.

На рис. 6 и 7 изображены полученные образцы напряжений и диаграммы распределения основных напряжений растяжения для пластин с производящей рейкой, изготовленной по прогрессивной схеме резания. Анализ закономерностей изолиний распределения напряжений σ_1 в зубьях фрезы показал, что напряжения растяжения вдоль передней поверхности твердого сплава WC–Co снижаются из-за того, что каждая пластина срезает свой участок обрабатываемого материала.

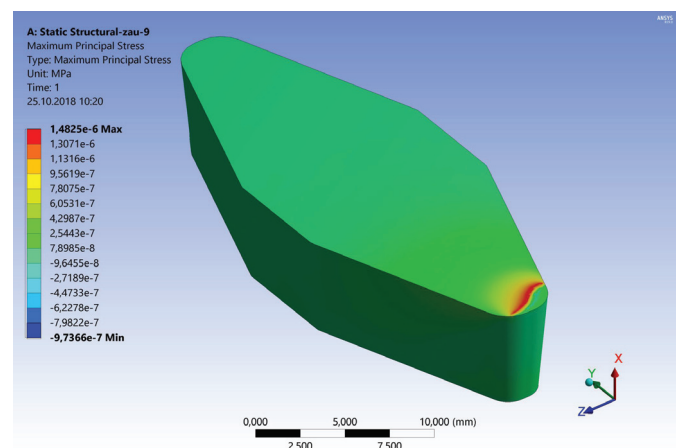


Рис. 6. Картины напряжений растяжения в твердом сплаве WC–Co с зауженным контуром e1 (цветовая градация напряжений растяжения σ_1)

Fig. 6. Pictures of tensile stresses in WC–Co hard alloy with the narrowed contour e1 (color gradation of tensile stresses σ_1)

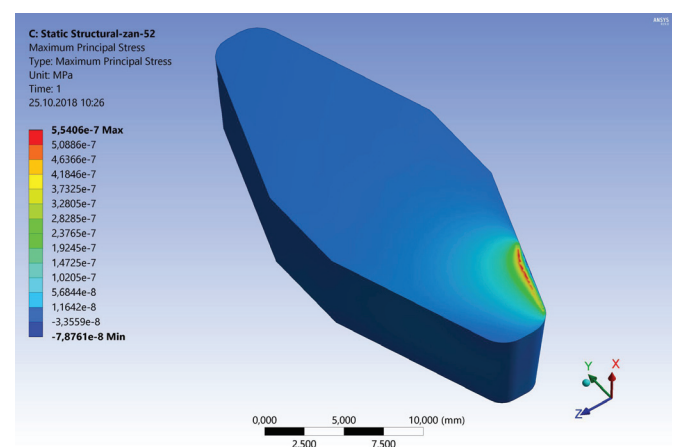


Рис. 7. Картины напряжений растяжения в твердом сплаве WC–Co с зауженным контуром e2 (цветовая градация напряжений растяжения σ_1)

Fig. 7. Pictures of tensile stresses in WC–Co hard alloy with the narrowed contour e2 (color gradation of tensile stresses σ_1)

Это связано с тем, что сначала работает режущая пластина с профилем e_1 , которая срезает обрабатываемый материал с верхней части пластины, а затем работает пластина с профилем e_2 , которая работает с боковыми режущими кромками.

Анализ показал, что с точки зрения напряженного состояния наилучшие результаты при вычислении дает инструмент с производящей рейкой, изготовленной по прогрессивной схеме резания. Таким образом, производящая рейка, изготовленная по прогрессивной схеме резания, оказывает большое влияние на напряженное состояние в твердом сплаве WC-Co.

Цветовая градация главных напряжений показывает, что все напряжения рассредоточены вдоль всей режущей кромки равномерно без ярко выявленных зон сосредоточения напряжений растяжения. Деформирование вдоль режущей кромки является однородным, без выраженных скачков. Решение трехмерных задач помогло установить, что степень деформации основной режущей кромки различна для пластин различной формы.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. По результатам исследований проведено имитационное моделирование процесса зубофрезерования с производящей рейкой, изготовленной по DIN3972, и с прогрессивной схемой резания.

2. В результате проведенного имитационного моделирования определены поперечные сечения срезаемых слоев с производящей рейкой, изготовленной по DIN3972, и с прогрессивной схемой резания.

3. Исследовано напряженно-деформированное состояние сменных многогранных пластин при различных контурах инструментальных реек, которое показало снижение главных опасных напряжений растяжений σ_1 .

Список литературы

1. Смирнов Н.Н. Зубофрезерование многозаходными червячными фрезами с различными схемами резания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1982.

2. Ничков А.Г., Шунаев Б.К. Влияние схемы резания при зубофрезеровании на износ зубьев червячной фрезы // Тезисы докладов Второй научно-технической конференции Уральского политехнического института. – Свердловск, 1968.

3. Артамонов Е.В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов / Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень: Вектор Бук, 2003. – 192 с.

4. Артамонов Е.В., Костив В.М. Инструментальные твердые сплавы и их влияние на работоспособность металлорежущих инструментов: учебное пособие. – Тюмень: ТюмГНГУ, 1998. – 136 с.

5. Ничков А.Г. Основы комплексного исследования процесса зубофрезерования и оптимизации его конструктивных и технологических параметров в простых и комбинированных схемах нарезания зубчатых колес червячными фрезами: дис. ... д-ра техн. наук. – Тула, 1991.

6. Ничков А.Г. Стойкость червячной фрезы в зависимости от схемы резания // Передовой научно-производственный опыт резания металлов: тезисы докладов конференции. – Свердловск, 1971. – С. 29–33.

7. Медведицков С.Н. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами. – М.: Машиностроение, 1981. – 106 с.

8. Ничков А.Г., Мартыненко В.А., Лоскутов В.В. Повышение стойкости червячных фрез за счет выбора рациональных параметров зубофрезерования // Проблемы совершенствования малогабаритных зубофрезерных станков: материалы конференции. – Вильнюс, 1975. – С. 129–138.

9. Zhonghe Y, Zhaohui L, Smith M.R. Mechanisms and machine theory. – Beijing, China: High Education Press, 2001.

10. Шунаев Б.К., Петрова С.П. Комбинированные схемы фрезерования зубчатых колес с радиальным врезанием червячной фрезы // Прогрессивные конструкции и методы обработки в инструментальном производстве. – Пермь, 1975.

11. Скребнев Г.Г. Определение условий рационального применения твердосплавных зуборезных фрез и возможности повышения ими производительности процесса зубофрезерования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 1995.

12. A gear cutting predictive model using the finite element method / W. Liu, D. Ren, S. Usui, J. Wadell, T.D. Marusich // Procedia CIRP. – 2013. – Vol. 8. – P. 51–56.

13. Egorov S.B., Kapitanov A.V., Loktev D.A. Modern methods and technological solutions for effective processing of gear wheels // Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 870. – P. 397–403. – doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.397.



14. Выбор оптимального процесса обработки зубчатых колес / И.В. Рубан, З.А. Годжаев, В.М. Рубан, С.Д. Зайцев // Вестник машиностроения. – 2008. – № 7. – С. 40–41.

15. *Artamonov E.V., Vasil'ev D.V.* Determining the optimal cutting speed in turning by composite cutters on the basis of the chip // Russian Engineering Research. – 2014. – Vol. 34 (6). – P. 404–405.

16. *Artamonov E.V., Kireev V.V.* Effectiveness of cutting by hods with replaceable hard-alloy plates // Russian Engineering Research. – 2014. – Vol. 37 (7). – P. 473–474.

17. *Artamonov E.V., Vasilega D.S., Tveryakov A.M.*, Determining the maximum-performance temperature of hard-alloy cutting plates // Russian Engineering Research. – 2014. – Vol. 34 (6). – P. 402–403.

18. Gear hobbing: a contribution to analogy testing and its wear mechanisms / S. Steina, M. Lechthaler, S. Krassnitzer, K. Albrecht, A. Schindler, M. Arndt // Procedia CIRP. – 2012. – Vol. 1 (1). – P. 220–225.

19. *Tokawa T., Nishimura Y., Nakamura Y.* High productivity dry hobbing system // Mitsubishi Heavy Industries. Technical Review. – 2001. – Vol. 38, N 1. – P. 27–31.

20. Обработка зубчатых колес: повышение производительности и качества / Н.А. Курочкин, Б.М. Солоницын, О.В. Таратынов, В.В. Клепиков // Грузовик. – 2005. – № 3. – С. 28–31.

21. High performance gear hobbing with powder-metallurgical high-speed-steel / В. Karpuschewski, H.-J. Knoche, M. Hipke, M. Beutner // Procedia CIRP. – 2012. – Vol. 1 (1). – P. 196–201.

22. *Паншева Н.Д., Акушская О.М.* Повышение эффективности процесса нарезания зубчатых колес // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2, ч. 2. – С. 54.

23. *Канатников Н.В., Харламов Г.А.* Повышение эффективности обработки прямозубых конических зубчатых колес // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – № 3. – С. 8–16.

24. A review of new strategies for gear production / G. Hyatt, M. Piber, N. Chaphalkar, O. Kleinhenz, M. Mori // Procedia CIRP. – 2014. – Vol. 14. – P. 72–76.

25. *Xu S., Zhang Y.* The finite element modeling and analysis of involute spur gear // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 516–517. – P. 673–677.

26. *Bahattin K.* Analysis of spur gears by coupling finite and boundary element methods // Mechanics Based Design of Structures and Machines. – 2006. – Vol. 34, iss. 3. – P. 307–324.

27. Forte P., Paoli A., Rationale A.V. A CAE approach for the stress analysis of gear models by 3D digital photoelasticity // International Journal of Interactive Design and Manufacturing. – 2015. – Vol. 9, iss. 1. – P. 31–43.

28. *Sun Q., Sun Y., Li L.* Strength analysis and tooth shape optimization for involute gear with a few teeth // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 10, iss. 1. – doi: 10.1177/1687814017751957.

29. *Miklos I.Z., Miklos C., Alic C.I.* Finite element analysis of cylindrical gear with mechanical event simulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 393. – P. 012046. – doi: 10.1088/1757-899X/393/1/012046.

30. Современные технологические подходы при изготовлении цилиндрических зубчатых колес в условиях мелкосерийного производства и особенности расчета и проектирования зуборезного инструмента / В.П. Балков, Л.И. Каменецкий, А.С. Кирютин, Е.А. Негинский, О.С. Отт, Д.Н. Пищулин // Металлообработка. – 2015. – № 4 (88). – С. 2–6.

31. *Tsai S.-J., Ye S.-Y.* A computerized approach for loaded tooth contact analysis of planetary gear drives considering relevant deformations // Mechanism and Machine Theory. – 2018. – Vol. 122. – P. 252–278. – doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.12.026.

32. *Lyu Y., Chen Y., Lin Y.* The design formulae for skew line gear wheel structures oriented to the additive manufacturing technology based on strength analysis // Mechanical Sciences. – 2017. – Vol. 8, iss. 2. – P. 369–383. – doi: 10.5194/ms-8-369-2017.

33. Machinability improvement of gear hobbing via process simulation and tool wear predictions / X. Dong, C. Liao, Y.C. Shin, H.H. Zhang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 86, iss. 9–12. – P. 2771–2779.

34. *Srinivasan N., Shunmugam M.S.* Limiting conditions in gear shaping for corrected involute gears // International Journal of Machine Tool Design and Research. – 1983. – Vol. 23, iss. 4. – P. 227–235.

35. *Artamonov E.V., Kireev V.V.* The compound hob for processing gearbox pinions used in hoist for well repairs // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 770. – P. 469–475.

36. *Artamonov E.V., Kireev V.V., Zyryanov V.A.* Improving the efficiency of hobbing mills // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37, N 5. – P. 447–449. – doi: 10.3103/S1068798X17050057.

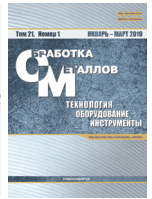
Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Modelling by a Method of Finite Elements for Determination of Stress-Deformed State in Retrofittable Hob Cutter with Indexable Inserts

Dmitrij Vasilega^a, Vitalii Kireev^b, Vitaliy Zyryanov^{c,*}

Tyumen Industrial University, 38 Volodarskogo, Tyumen, 625000, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-7618-7906>, d_vasilega@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-2285-1036>, kireevvv@tyuiu.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-8191-3930>, zyrjanovva@tyuiu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 October 2018

Revised: 23 January 2019

Accepted: 29 January 2019

Available online: 15 March 2019

Keywords:

Gear milling

Hard alloy

Assembly hob gear

Stress-deformed condition
of cutting elements

ABSTRACT

Introduction. Tooling equipment plays a major role for machine-building enterprises. The most important part in equipping the metal-cutting tool is the replacement of the cutting part from the group of high-speed steels by the cutting part made of hard alloy, which in turn gives an increase in durability and overall performance of the cutting tool. When cutting power of the tool increases then its changeability decreases. That is the reason why it is more rational to use complete approach which takes into account designing of a tool using a hard alloy WC-Co. Designing, production and test of gear cutting tools, development of cutting modes should be carried out in relation to a particular workpiece and its material. **The purpose of the work:** to study the influence of the geometry of the removable insert on distribution of dangerous tensile stresses. **The paper studies** the results of the calculation of the stress-strain state in a removable plate made of a WC-Co material. Tension and compression zones are observed on the main cutting edge. The concentration of dangerous tension stresses is located in the transition zone between the straight side cutting edge and the top, since there is the greatest constraint on cutting in this zone. Accordingly, the greatest destruction will occur in this zone. It is important that in this part of the cutting edge there will be the largest wear on the back surface. **The research methods:** ANSYS finite-element analysis program is used to detect dangerous tensile stresses σ_1 . **Results and Discussion.** Analysis of the stress distribution isolines showed that tensile stresses along the front surface of the removable cutting insert are reduced due to the fact that each removable cutting insert cuts off its part of the material. First, a narrowed cutting insert enters the work, which cuts off the metal with the upper part of the cutting insert, and then an understated cutting insert operates, which works with side cutting edges. As a result of the study, it was found that with a progressive cutting scheme, compared to the standard one, in which the original profile of the counterpart rack was made according to DIN3972 during gear milling, dangerous tensile stresses in cutting carbide plates are significantly reduced.

For citation: Vasilega D.S., Kireev V.V., Zyryanov V.A. Modelling by a method of finite elements for determination of stress-deformed state in retrofittable hob cutter with indexable inserts. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 50–60. doi:10.17212/1994-6309-2019-21.1-50-60. (In Russian).

References

1. Smirnov N.N. *Zubofrezerovanie mnogozakhodnymi chervyachnymi frezami s razlichnymi skhemami rezaniya*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Gear milling by much screw worm mills with different schemes of cutting. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Kiev, 1982.
2. Nichkov A.G., Shunaev B.K. [Influence of the scheme of cutting at gear milling on wear of teeth of a worm mill]. *Tezisy dokladov Vtoroi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii Ural'skogo politekhnicheskogo instituta* [Proceedings of the Second Scientific and Technical Conference of the Ural Polytechnic Institute]. Sverdlovsk, 1968. (In Russian).

* Corresponding author

Zyryanov Vitaliy A., Ph.D. (Engineering) student,
 Tyumen Industrial University
 38 Volodarskogo, Tyumen, 625000, Russian Federation
 Тел.: 8 (919) 924-07-89, e-mail: zyrjanovva@tyuiu.ru



3. Artamonov E.V. *Prochnost' i rabotosposobnost' smennykh tverdospлавnykh plastin sbornykh rezhushchikh instrumentov* [Durability and operability of replaceable hard-alloy plates of the combined cutting tools]. Tyumen State Oil and Gas University. Tyumen', Vektor Buk Publ., 2003. 192 p.
4. Artamonov E.V., Kostiv V.M. *Instrumental'nye tverdye splavy i ikh vliyanie na rabotosposobnost' metallorazhushchikh instrumentov* [Tool hard alloys and their influence on operability of metal-cutting tools]. Tyumen', Tyumen State Oil and Gas University Publ., 1998. 136 p.
5. Nichkov A.G. *Osnovy kompleksnogo issledovaniya protsessa zubofrezirovaniya i optimizatsii ego konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov v prostykh i kombinirovannykh skhemakh narezaniya zubchatykh koles chervyachnymi frezami*. Diss. dokt. tekhn. Nauk [Bases of a complex research of process of gear milling and optimization of its design and process parameters in the simple and combined schemes of cutting of cogwheels worm mills. Dr. eng. sci. diss.]. Tula, 1991.
6. Nichkov A.G. [Firmness of a worm mill depending on the scheme of cutting]. *Peredovoi nauchno-proizvodstvennyi opyt rezaniya metallov: tezisy dokladov konferentsii* [Proceedings of the conference "Advanced research and production experience of metal cutting"]. Sverdlovsk, 1971, pp. 29–33. (In Russian).
7. Medveditskov S.N. *Vysokoproizvoditel'noe zubonarezanie frezami* [High-performance gear cutting by mills]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 106 p.
8. Nichkov A.G., Martynenko V.A., Loskutov V.V. [Increase in firmness of worm mills due to the choice of rational parameters of gear milling]. *Problemy sovershenstvovaniya malogabaritnykh zubofreznykh stankov: materialy konferentsii* [Problems of improvement of small-sized gear milling machines: conference of materials]. Vilnius, 1975, pp. 129–138. (In Russian).
9. Zhonghe Y, Zhaohui L, Smith M.R. *Mechanisms and machine theory*. Beijing, China, High Education Press, 2001.
10. Shunaev B.K., Petrova S.P. *Kombinirovannye skhemy frezerovaniya zubchatykh koles s radial'nym vrezaniem chervyachnoi frezy* [The combined schemes of milling of cogwheels with radial incision of a worm mill]. *Progressivnye konstruksii i metody obrabotki v instrumental'nom proizvodstve* [Progressive designs and methods of processing in tool production]. Perm, 1975.
11. Skrebnev G.G. *Opreделение uslovii ratsional'nogo primeneniya tverdospлавnykh zuboreznykh frez i vozmozhnosti povysheniya imi proizvoditel'nosti protsessa zubofrezirovaniya*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Definition of conditions of rational application of hard-alloy gear-cutting mills and possibility of increase in productivity of gear milling process by them. Autor's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Volgograd, 1995.
12. Liu W., Ren D., Usui S., Wadell J., Marusich T.D. A gear cutting predictive model using the finite element method. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 8, pp. 51–56.
13. Egorov S.B., Kapitanov A.V., Loktev D.A. Modern methods and technological solutions for effective processing of gear wheels. *Materials Science Forum*, 2016, vol. 870, pp. 397–403. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.397.
14. Ruban V.I., Godzhaev A.Z., Ruban V.M., Zaitsev S.D. *Vybor optimal'nogo protsessa obrabotki zubchatykh koles* [A choice of the tooth-wheels optimal manufacturing process]. *Vestnik mashinostroeniya = Bulletin of mechanical engineering*, 2008, no. 7, pp. 40–41.
15. Artamonov E.V., Vasil'ev D.V. Determining the optimal cutting speed in turning by composite cutters on the basis of the chip. *Russian Engineering Research*, 2014, vol. 34 (6), pp. 404–405.
16. Artamonov E.V., Kireev V.V. Effectiveness of cutting by hods with replaceable hard-alloy plates. *Russian Engineering Research*, 2014, vol. 37 (7), pp. 473–474.
17. Artamonov E.V., Vasilega D.S., Tveryakov A.M. Determining the maximum-performance temperature of hard-alloy cutting plates. *Russian Engineering Research*, 2014, vol. 34 (6), pp. 402–403.
18. Steina S., Lechthaler M., Krassnitzer S., Albrechta K., Schindlerb A., Arndta M. Gear hobbing: a contribution to analogy testing and its wear mechanisms. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1 (1), pp. 220–225.
19. Tokawa T., Nishimura Y., Nakamura Y. High productivity dry hobbing system. *Mitsubishi Heavy Industries. Technical Review*, 2001, vol. 38, no. 1, pp. 27–31.
20. Kurochkin N., Solonitsyn B.M., Taratynov O.V., Klepikov V.V. *Obrabotka zubchatykh koles: povyshenie proizvoditel'nosti i kachestva* [Processing of gears: improving productivity and quality]. *Gruzovik = Truck*, 2005, no. 3, pp. 28–31.
21. Karpuschewski B., Knoche H.-J., Hipke M., Beutner M. High performance gear hobbing with powder-metallurgical high-speed-steel. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1 (1), pp. 196–201.

22. Papsheva N.D., Akushskaya O.M. Povyshenie effektivnosti protsessa narezaniya zubchatykh koles [Improving the efficiency of gear cutting]. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, 2015, no. 2, pt. 2, p. 54.
23. Kanatnikov N.V., Kharlamov G.A. Povyshenie effektivnosti obrabotki pryamozubykh konicheskikh zubchatykh koles [Efficiency improvement of processing of straight-toothed bevel gears]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2015, no. 3, pp. 8–16.
24. Hyatt G., Piber M., Chaphalkar N., Kleinhenz O., Mori M. A review of new strategies for gear production. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 14, pp. 72–76.
25. Xu S., Zhang Y. The finite element modeling and analysis of involute spur gear. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 516–517, pp. 673–677.
26. Bahattin K. Analysis of spur gears by coupling finite and boundary element methods. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2006, vol. 34, iss. 3, pp. 307–324.
27. Forte P., Paoli A., Razionale A.V. A CAE approach for the stress analysis of gear models by 3D digital photoelasticity. *International Journal of Interactive Design and Manufacturing*, 2015, vol. 9, iss. 1, pp. 31–43.
28. Sun Q., Sun Y., Li L. Strength analysis and tooth shape optimization for involute gear with a few teeth. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10, iss. 1. doi: 10.1177/1687814017751957.
29. Miklos I.Z., Miklos C., Alic C.I. Finite element analysis of cylindrical gear with mechanical event simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 393, p. 012046. doi: 10.1088/1757-899X/393/1/012046.
30. Balkov V.P., Kamenetskii L.I., Kiryutin A.S., Neginsky E.A., Ott O.S., Pishchulin D.N. Sovremennye tekhnologicheskie podkhody pri izgotovlenii tsilindricheskikh zubchatykh koles v usloviyakh melkoseriynogo proizvodstva i osobennosti rascheta i proektirovaniya zuboreznogo instrumenta [Up to date approaches for technology of small lot cylindrical gears production and special features of gear cutting tool computing and design engineering]. *Metalloobrabotka = Metalworking*, 2015, no. 4 (88), pp. 2–6.
31. Tsai S.-J., Ye S.-Y. A computerized approach for loaded tooth contact analysis of planetary gear drives considering relevant deformations. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, vol. 122, pp. 252–278. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.12.026.
32. Lyu Y., Chen Y., Lin Y. The design formulae for skew line gear wheel structures oriented to the additive manufacturing technology based on strength analysis. *Mechanical Sciences*, 2017, vol. 8, iss. 2, pp. 369–383. doi: 10.5194/ms-8-369-2017.
33. Dong X., Liao C., Shin Y.C., Zhang H.H. Machinability improvement of gear hobbing via process simulation and tool wear predictions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 86, iss. 9–12, pp. 2771–2779.
34. Srinivasan N., Shunmugam M.S. Limiting conditions in gear shaping for corrected involute gears. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1983, vol. 23, iss. 4, pp. 227–235.
35. Artamonov E.V., Kireev V.V. The compound hob for processing gearbox pinions used in hoist for well repairs. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 770, pp. 469–475.
36. Artamonov E.V., Kireev V.V., Zyryanov V.A. Improving the efficiency of hobbing mills. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 5, pp. 447–449. doi: 10.3103/S1068798X17050057.

Conflicts of Interest

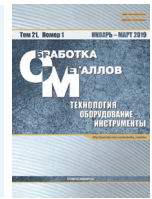
The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)



Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Улучшение технических характеристик многоцелевых станков при проектировании

Владимир Атапин^{а, *}

Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

^а  <http://orcid.org/0000-0002-5030-6054>,  atapin.49@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.06

История статьи:

Поступила: 14 сентября 2018
 Рецензирование: 12 февраля 2019
 Принята к печати: 15 февраля 2019
 Доступно онлайн: 15 марта 2019

Ключевые слова:

Многоцелевой станок
 Несущая система
 Проектирование
 Метод конечных элементов

АННОТАЦИЯ

Введение. Формирование оптимальных технических характеристик металлорежущих станков на этапе проектирования является перспективной задачей станкостроения. Для ее решения, как показывает зарубежная и отечественная практика, эффективно использовать интегрирование метода конечных элементов и методов оптимизации. **Цель работы** заключается в обобщении основных результатов, полученных при проектировании несущей системы тяжелого многоцелевого станка сверлильно-фрезерно-расточной группы с использованием метода конечных элементов и методов условной и безусловной оптимизации. Процедура проектирования включает: 1) оптимизацию несущей системы с базовыми деталями простой геометрии (стержень, пластина, оболочка); 2) оптимизацию базовой детали для определения необходимой геометрии ее поперечного сечения; 3) динамический анализ станка в целом. Рассмотренная процедура решает задачу проектирования несущей системы многоцелевого станка при выполнении условий прочности, жесткости и минимума массы для заданных точности механической обработки и сил резания. **Результаты и обсуждения.** На этапе проектирования несущей системы определены адекватные габаритные размеры базовых деталей и граничные условия (силовые и деформационные) в областях их контакта. Далее исследуется отдельная базовая деталь реальной компоновки на примере стойки с выделением малого фрагмента в зоне контакта стойки и шпиндельной бабки. Показано, что расчетное поле перемещений узлов фрагмента стойки адекватно полю перемещений соответствующих узлов стойки, полученному при ее расчете в составе несущей системы. В результате оптимизации жесткость стойки на кручение повысилась на 48 %. Для исследования динамики станка построена динамическая модель и проведены сравнительные расчеты при вынужденных колебаниях станка. Для станка с оптимальными базовыми деталями имеет место уменьшение податливости на 30 % в направлении наибольшей составляющей силы резания и снижение массы на 17 % по сравнению с серийным вариантом.

Для цитирования: Атапин В.Г. Улучшение технических характеристик многоцелевых станков при проектировании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 61–69. – doi:10.17212/1994-6309-2019-21.1-61-69.

Введение

Для обработки сложных корпусных деталей применяют сверлильно-фрезерно-расточные станки, получившие название многоцелевых станков (МС). Основные характеристики качества станков закладываются на стадии проектирования. Следовательно, разработка методов улучшения технических характеристик станков

при сокращении сроков их проектирования является актуальной задачей станкостроения.

Один из эффективных путей решения поставленной задачи – использование на этапе проектирования станков метода конечных элементов (МКЭ) и методов оптимизации. В работах [1, 2] описывается применение МКЭ для расчета напряженно-деформированного состояния базовых деталей станков, позволяющего рассмотреть ограниченное количество возможных вариантов их компоновок. В работах [3, 4] на основе МКЭ рассматривается проектирование несущих систем металлорежущих станков совместно с фундаментом и предлагаются рациональные конструкции фундаментов. Для

*Адрес для переписки

Атапин Владимир Григорьевич, д.т.н., профессор
 Новосибирский государственный технический университет
 пр. К. Маркса, 20,
 630073, г. Новосибирск, Россия
 Тел.: 8 (383) 346-17-77, e-mail: atapin@mail.ru

получения же наилучшего варианта необходимо исследовать все возможные варианты, что достигается путем использования на этапе проектирования методов оптимизации [5]. В работах [6, 7] представлен результат применения методов оптимизации к проектированию базовых деталей токарного, фрезерного и сверлильного станков, для достижения снижения массы до 20 %. В работе [8] предложен многоэтапный метод проектирования, включающий в себя моделирование базовых деталей, имеющих форму стержня, методом конечных элементов, оптимизацию и реализацию. Таким образом, использование совместно МКЭ и методов оптимизации позволяет эффективно решать задачи станкостроения. Однако в рассмотренных работах моделируются небольшие по габаритам станки. Современные тяжелые МС отличаются большими габаритами и сложным поперечным сечением базовых деталей, вследствие чего имеет место итерационный процесс разработки МС, увеличивающий сроки проектирования.

Целью настоящей работы является обобщение основных результатов, полученных при проектировании базовых деталей тяжелого многоцелевого станка (МС) (рис. 1), состоящего из двух не связанных между собой единиц, размещенных на общем фундаменте – станка сверлильно-фрезерно-расточной группы и стола. Отдельные результаты расчетов изложены в наших работах, в частности в [9–11]. Проектирование несущей системы МС предполагает: 1) ее опти-

мизацию с базовыми деталями простой формы (стержень, пластина, оболочка) для определения внутренних (силовых, деформационных) связей; 2) оптимизацию отдельной базовой детали для нахождения требуемой геометрии поперечного сечения; 3) динамический анализ станка в целом (рис. 2). Практическая реализация данной процедуры позволяет проектировать несущую систему станка, для которой выполняются условия прочности, жесткости, устойчивости, отсутствия резонанса, а также обеспечивается наименьшая масса, необходимая точность и производительность механической обработки.

Постановка задачи

Рассмотрим процедуру проектирования несущей системы станка, состоящего из стойки 1, шпиндельной бабки 2, станины 3 (рис. 3). Известны внешние размеры (высота стойки 8 м, длина станины 13 м), внешняя нагрузка (силы резания) и условия опирания.

Исходные данные для расчета:

- 1) торцовое фрезерование, наибольшая составляющая силы резания $F_y = 40$ кН, для чистовой обработки – 3 кН;
- 2) соотношение составляющих силы резания $F_x : F_y : F_z = 0,5 : 1,0 : 0,7$ по осям x, y, z соответственно;
- 3) допуски на плоскостность и прямолинейность обрабатываемой поверхности по ГОСТ 24643–81, 6-й квалитет [12];



Рис. 1. Тяжелый многоцелевой станок
Fig. 1. Heavy multipurpose machining center

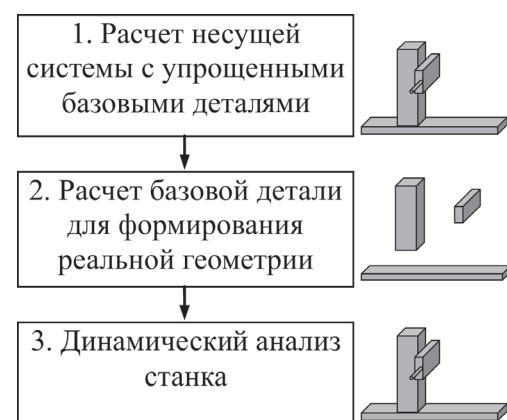


Рис. 2. Процедура проектирования базовых деталей МС

Fig. 2. The design procedure of machining center base parts

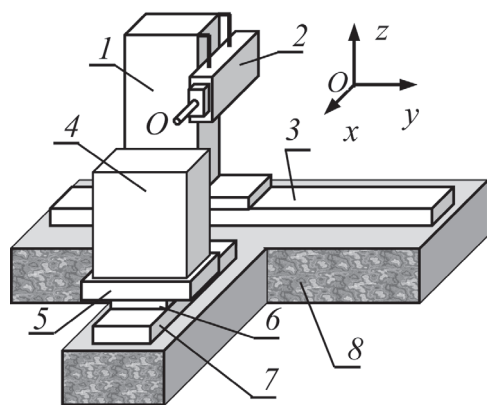


Рис. 3. Многоцелевой станок:

1 – стойка; 2 – шпиндельная бабка; 3 – станина; 4 – обрабатываемая деталь; 5 – паллета; 6 – сани стола; 7 – станина стола; 8 – фундамент

Fig. 3. Machining center:

1 – column; 2 – spindle head; 3 – framework; 4 – machined part; 5 – pallet; 6 – slewing table; 7 – table framework; 8 – foundation bed

4) станина находится на опорах (64 опоры), коэффициент жесткости опоры равен $2 \cdot 10^3$ МН/м.

При расчете несущей системы станка базовые детали моделируются плоскими конечными элементами с четырьмя узлами, поперечное сечение не имеет ребер жесткости, вырезов, утолщений стенок и др. Шпиндель моделируется пространственным стержневым конечным элементом. Для расчета упругих деформаций в подвижных стыках [13, 14] используется элемент соединения Frictionless ANSYS [15] (рис. 4).

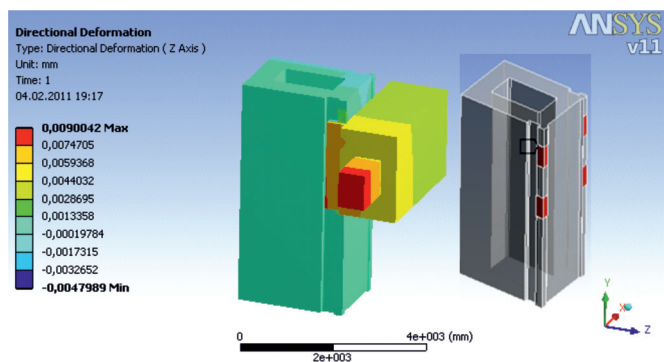


Рис. 4. Расчет контактных деформаций в стыке «стойка–шпиндельная бабка»

Fig. 4. Calculation of contact deformations in the joint «column–spindle head»

Результаты и обсуждение

Расчет несущей системы с простыми по геометрии базовыми деталями

Расчет перемещений т. О шпинделя (см. рис. 3) проводится с учетом собственно упругих деформаций базовых деталей и упругих деформаций в подвижных стыках для чистовой обработки. Перемещения т. О шпинделя в результате упругих деформаций в стыках составляют $\delta_{ст x} = 13,89$ мкм; $\delta_{ст y} = 8,11$ мкм; $\delta_{ст z} = 5,45$ мкм в направлении осей x, y, z .

За переменную проектирования при оптимизации принимаем толщину профиля t отдельной базовой детали. Требуется минимизировать массу конструкции $M(t)$ при ограничениях на прочность (напряжения) и жесткость (перемещения т. О). Задача оптимального проектирования:

$$M(t) = \min \sum_{i=1}^n \rho_i V_i(t) \quad (1)$$

при ограничениях:

$$h_1(t) = 1 - \frac{\sigma_{\text{eqv}}(t)}{\sigma_{\text{allow}}} \geq 0, \quad (2)$$

$$h_2(t) = 1 - \frac{\delta_x(t)}{\delta_{x \text{ allow}}} \geq 0, \quad (3)$$

$$h_3(t) = 1 - \frac{\delta_y(t)}{\delta_{y \text{ allow}}} \geq 0, \quad (4)$$

$$h_4(t) = 1 - \frac{\delta_z(t)}{\delta_{z \text{ allow}}} \geq 0, \quad (5)$$

переменные проектирования:

$$h_5(t) = V_i(t) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

где n – количество конечных элементов; ρ – плотность; V – объем конечного элемента с номером i ; $\sigma_{\text{eqv}}, \sigma_{\text{allow}}$ – эквивалентное и допускаемое напряжение; $\delta_x, \delta_y, \delta_z, \delta_{x \text{ allow}}, \delta_{y \text{ allow}}, \delta_{z \text{ allow}}$ – расчетные и допускаемые перемещения т. О по осям x, y, z соответственно.

Значения $\delta_{x \text{ allow}}, \delta_{y \text{ allow}}, \delta_{z \text{ allow}}$ для несущей системы определяются отклонениями от плоскостности и прямолинейности обработанной поверхности. Для расчета полагаем, что шпиндельная бабка находится в крайнем верхнем положении (5 м), а стойка – в средней части станины напротив стола. Для данных расчетных

условий отклонение от плоскостности и прямолинейности равно 60 мкм [12]. В общем балансе перемещений в зоне резания МС на долю станка приходится до 70 %. Принимая коэффициент запаса по жесткости $n = 1,5$, получаем, что отклонение от плоскостности и прямолинейности для станка равно 28 мкм. Вычитая из этого отклонения перемещения $t. O$ в результате упругих деформаций в подвижных соединениях [11], получаем, что $\delta_{x \text{ allow}} = 14,11$ мкм, $\delta_{y \text{ allow}} = 19,89$ мкм, $\delta_{z \text{ allow}} = 22,55$ мкм.

Задача условной оптимизации (1)–(6) решается методом штрафных функций [16, 17] на основе уравнения

$$\varphi(t, r) = M(t) + r \sum_{j=1}^J [1/h_j(t)]$$

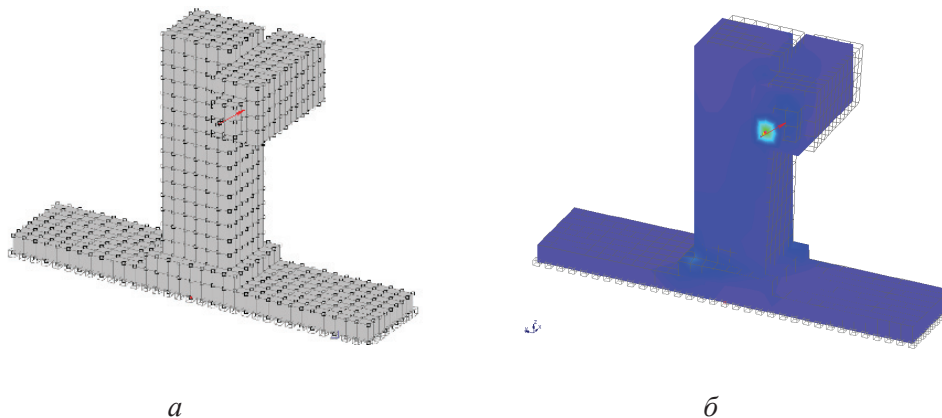


Рис. 5. Исходное (а) и деформированное (б) состояние несущей системы

Fig. 5. Initial (a) and deformed (b) states of the system carriers

Таблица 1

Table 1

Оптимизация несущей системы
The optimization of the carrier system

Показатель	Серийное исполнение	Оптимизация
Габариты (в плоскости), м:		
– стойка (x–y)	2,0 × 2,46	1,8 × 2,6
– шпиндельная бабка (y–z)	1,3 × 2,20	1,7 × 2,0
– ползун (y–z)	0,6 0,80	0,8 × 0,8
Отклонения $t. O$ (расчет/норма):		
– по оси x	0,52	0,67
– по оси y	1,0	1,0
– по оси z	0,51	0,54
Масса, т	169,9	158,2

в сочетании с методом ДФП, который является одним из наиболее эффективных методов безусловной оптимизации.

Результаты расчета несущей системы представлены на рис. 5. Для стойки характерно сложное сопротивление, включающее в себя изгиб и кручение. В табл. 1 приведены результаты расчета для оптимальной несущей системы в сравнении с серийным исполнением. В результате оптимизации для основных базовых деталей установлены силовые и деформационные граничные условия. Вследствие большого объема данных эти сведения в статье не рассматриваются. Частично они будут приведены при расчете отдельной базовой детали (стойки) на следующем этапе. Кроме того, получены улучшения по размерам поперечного сечения базовых деталей и снижение общей массы станка на 6,9 %.

Расчет отдельной базовой детали

Данный расчет рассмотрим на примере стойки, как наиболее нагруженной базовой детали. В связи со сложным поперечным сечением стойки (ребра жесткости, вырезы, замкнутые полости и др.) и большими габаритными размерами целесообразно выделить малый фрагмент стойки на уровне шпиндельной бабки (рис. 6), который обеспечивает кинематическую неизменяемость конструкции и учет возможных нарушений ее работоспособности. Такой подход приводит к уменьшению размерности расчетной модели, снижению времени расчета, что существенно при решении итерационных задач оптимизации.

Для выделенного малого фрагмента стойки в табл. 2 показано поле перемещений в местах контакта шпиндельной бабки со стойкой, полученное ранее при расчете несущей системы. Для моделирования геометрии конструкции используются 189 пластинчатых конечных элементов (КЭ), 159 узлов. Дополнительно в узлах 1–12 вводятся упругие связи, значения коэффициентов жесткости которых автоматически добавляются в матрицу жесткости конструкции. Расчетная модель малого фрагмента стойки строится

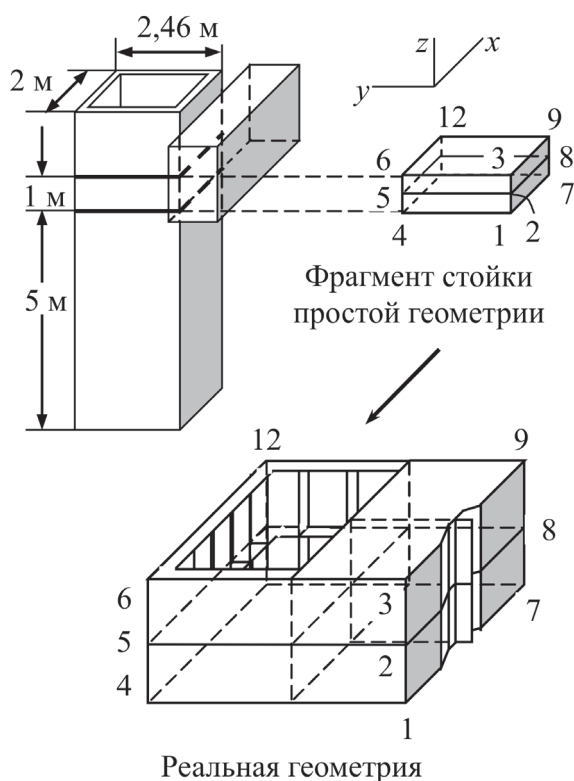


Рис. 6. Фрагмент стойки и ее реальная геометрия

Fig. 6. Column fragment and its real geometry

по аналогии с моделью (1)–(6). В результате решения определяется толщина стенки и ребра (переменные проектирования). В табл. 3 приведены расчетные показатели для оптимального фрагмента стойки, в табл. 4 – расчетное поле перемещений узлов фрагмента стойки.

Таким образом, результаты расчетов, приведенные в табл. 4, адекватны результатам выделенного малого фрагмента стойки с простым поперечным сечением (см. табл. 2). Кроме того, показано, что серийной стойке (толщина стенки

Таблица 2

Table 2

Поле перемещений узлов фрагмента стойки The displacements field of the column fragment nodes

Узел	Перемещение по оси, м, 10^{-5}		
	x	y	z
1	0,340	-0,394	0,0265
2	0,396	-0,421	0,0360
3	0,432	-0,439	0,0400
4	0,189	-0,378	0,1300
5	0,218	-0,416	0,1240
6	0,236	-0,435	0,1220
7	0,335	-0,095	-0,1034
8	0,392	-0,122	-0,1090
9	0,428	-0,141	-0,1110
10	0,186	-0,097	0,0080
11	0,217	-0,123	0,0140
12	0,235	-0,142	0,0160

Таблица 3

Table 3

Результаты расчета фрагмента стойки The results of the column fragment calculation

Параметр	Условия расчета			
	Наибольшая сила резания		Сила резания при эксплуатации*	
	$n = 1,5$	$n = 1,0$	$n = 1,5$	$n = 1,0$
Толщина в плоскости, м:				
xz, yz	0,0797	0,0527	0,0463	0,0284
xu	0,0923	0,0830	0,0565	0,0415
Масса, т	15,30	11,62	9,04	6,08

*Условия эксплуатации: чистовая обработка, фреза диаметром 250 мм, число зубьев 20, глубина резания 0,5 мм, частота вращения шпинделя 170 мин⁻¹.

Таблица 4

Table 4

Расчетное поле перемещений узлов оптимального фрагмента стойки (рис. 6)

The calculated field of displacements of the optimal column fragment nodes (Fig. 6)

Узел	Перемещение по оси, м, 10^{-5}		
	x	y	z
1	0,341	-0,378	0,0255
2	0,387	-0,408	0,0310
3	0,414	-0,423	0,0326
4	0,187	-0,343	0,1303
5	0,219	-0,364	0,1304
6	0,240	-0,380	0,1304
7	0,336	-0,198	-0,0953
8	0,387	-0,226	-0,0947
9	0,418	-0,243	-0,0948
10	0,186	-0,182	0,0095
11	0,221	-0,213	0,0115
12	0,243	-0,231	0,0130

в плоскостях xz , yz составляет 0,030 м, в плоскости xy – 0,045 м, масса – 6,46 т) отвечает коэффициент запаса по жесткости несколько больше 1,0, что для практики явно недостаточно. В результате оптимизации жесткость стойки на кручение повысилась на 48 % (угол поворота равен 0,078 рад, а у стойки до оптимизации – 0,150 рад).

Динамический анализ станка

Исследование динамики несущей системы станка является заключительным этапом в процедуре его проектирования. Основная цель здесь состоит в разработке адекватной динамической модели, корректность которой должна быть обоснована экспериментом [18]. Однако при проектировании широко применяются и сравнительные динамические расчеты на базе простейших моделей.

Для проведения сравнительных динамических расчетов для несущей системы станка принята стержневая динамическая модель (рис. 7). Несущую систему моделируют 20 стержней, 2 стыка. Стержни 1–2, ..., 5–6 моделируют шпиндельную бабку, стержни 7–12, ..., 14–15 – стойку, остальные стержни моделируют станину. Шпиндельная бабка подвешена на упругих тросах в узлах 3 и 5, тросы прикрепляются в узлах 10 и 11, входящих в состав стержневой системы 7–8, ..., 9–11.

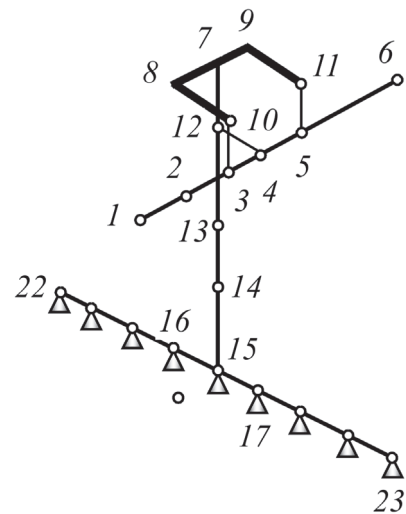


Рис. 7. Динамическая модель несущей системы

Fig. 7. Dynamic model of the system carriers

Расчетные условия аналогичны условиям, описанным в работах [19, 20]. На несущую систему действует сила резания $F(t) = F \sin \omega t$, приложенная в узле 1, где ω – частота вращения шпинделя.

В табл. 5 содержатся основные результаты исследования. Характеристики серийного станка приведены в сравнении с аналогичными характеристиками станка с оптимальными базовыми деталями для двух собственных частот, близких к вынужденной частоте переменной силы резания ($\omega = 2,83$ Гц при числе оборотов шпинделя 170 мин⁻¹). В результате для несущей системы станка с оптимальными базовыми деталями имеем уменьшение податливости по оси y (наибольшая составляющая силы резания) на 30 % и массы на 17 %.

Выводы

Рассмотренная процедура проектирования несущей системы многоцелевого станка позволяет при заданных нормах точности и произво-

Таблица 5

Table 5

Результаты динамических расчетов (серийная/ оптимальная)

Results of dynamic calculations (serial/ optimal)

№ п/п	Форма колебаний	Податливость по осям			Масса
		K_x	K_y	K_z	
1	1	0,91	1,30	1,00	1,17
2	2	1,15	1,20	1,15	



длительности механической обработки создавать базовые детали несущей системы, которые удовлетворяют условиям прочности, жесткости и имеют наименьшую массу. Процедура проектирования включает в себя: 1) оптимизацию несущей системы с базовыми деталями, поперечное сечение которых представляется простыми моделями формы (стержень, пластина, оболочка), для определения внутренних (силовых, деформационных) связей; 2) оптимизацию отдельной базовой детали для нахождения требуемой геометрии поперечного сечения; 3) динамический анализ станка в целом. Показано, что, например, при проектировании стойки можно повысить ее жесткость на кручение на 48 %. Динамический анализ станка с оптимальными базовыми деталями показал, что имеет место уменьшение податливости на 30 % в направлении наибольшей составляющей силы резания и снижение массы на 17 % по сравнению с серийным вариантом.

Список литературы

1. *Lull B.* Statische und dynamische berechnung von werkzeugmaschinengestellen // *Maschinenbautechnik.* – 1977. – Vol. 26, N 1. – P. 10–13.
2. *Roscher A.* Berechnung der dynamischen eigenschaften von werkzeugmaschinengestellen mit hilfe der methode der finiten elemente // *Maschinenbautechnik.* – 1978. – Vol. 27, N 4. – P. 156–160.
3. *Kameswara Rao N.S.V.* Foundation design: theory and practice. – Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd., 2011. – 544 p. – ISBN 978-0-470-82534-1.
4. *Bhatia K.G.* Foundations for industrial machines and earthquake effects // *ISET Journal of Earthquake Technology.* – 2008. – Vol. 45, N 1–2. – P. 13–29.
5. *Haug E.J., Choi K.K., Komkov V.* Design sensitivity analysis of structural systems. – Orlando, Florida: Academic Press, 1986. – 381 p. – (Mathematics in Science and Engineering; vol. 177).
6. *Rao S.S., Grandhi R.V.* Optimum design of radial drilling machine structure to satisfy static rigidity and natural frequency requirements // *Journal of Mechanical Design.* – 1983. – Vol. 105, iss. 2. – P. 236–241. – doi: 10.1115/1.3258515.
7. *Reddy C.P., Rao S.S.* Automated optimum design of machine-tool structures for static rigidity, natural frequencies and regenerative chatter stability // *Journal of Manufacturing Science and Engineering.* – 1978. – Vol. 100, iss. 2. – P. 137–146. – doi: 10.1115/1.3439401.
8. *Yoshimura M., Takeuchi Y., Hitomi K.* Design optimization of machine-tool structures considering manufacturing cost, accuracy and productivity // *Journal of Mechanical Design.* – 1984. – Vol. 106, iss. 4. – P. 531–537. – doi: 10.1115/1.3258606.
9. *Atapin V.V., Kurlaev N.V.* Rational design of the column of a heavy multipurpose machining center // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2016. – Vol. 126. – P. 012012. – doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012012.
10. *Atapin V.G., Bataev A.A.* Pallet optimization of the heavy rotary table load carrying system // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2016. – Vol. 126. – P.012011. – doi:10.1088/1757-899X/126/1/012011.
11. *Атапин В.Г.* Расчетное проектирование несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* – 2011. – № 3 (52). – С. 27–34.
12. *Гжиров Р.И.* Краткий справочник конструктора. – Л.: Машиностроение, 1983. – 464 с.
13. *Дёмкин Н.Б.* Контактное шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.
14. *Левина З.М., Решетов Д.Н.* Контактная жесткость машин. – М.: Машиностроение, 1971. – 264 с.
15. *Lawrence K.L.* ANSYS Workbench Tutorial Release 11. – Schroff Development Corporation, 2007. – 236 p.
16. *Ravindran A., Ragsdell K.M., Reklaitis G.V.* Engineering optimization: methods and applications. – 2nd ed. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. – 688 p. – ISBN-10 0-471-55814-1. – ISBN-13 978-0-471-55814-9.
17. *Bunday B.D.* Basic optimization methods. – London: Edward Arnold Publ., 1984. – 136 p. – ISBN-13 978-0-713-13506-0. – ISBN 0-713-13506-9.
18. *Каминская В.В.* Основные направления развития расчетов несущих систем станков // *Автоматизация проектирования и технологической подготовки производства в станкостроении.* – М.: ЭНИМС, 1985. – С. 54–63.
19. *Каминская В.В., Кушнир Э.Ф.* Автоматизированный расчет несущих систем металлорежущих станков. – М.: ЭНИМС, 1990. – 59 с.
20. *Кудинов В.А.* Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.

Конфликт интересов

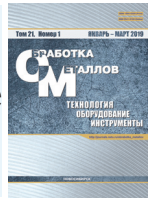
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Автор. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Improving the Technical Characteristics of Machining Center at the Design Stage

Vladimir Atapin^{a, *}

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

^a <http://orcid.org/0000-0002-5030-6054>, atapin.49@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 September 2018

Revised: 12 February 2019

Accepted: 15 February 2019

Available online: 15 March 2019

Keywords:

Machining center

System carriers

Design

Finite element method

ABSTRACT

Introduction. The development of optimal technical characteristics of machine-tools at the design stage is a long-range objective of the machine-tool industry. To solve this problem, a technology for designing basic details of heavy machining center with using of the finite element method and optimization methods are proposed. The design procedure includes: 1) calculation of the system carriers with basic details of simple geometry (rod, plate, shell), 2) calculation of the base part to determine the required geometry of its cross section, 3) dynamic analysis of the machine-tool as a whole. **The purpose of this work** is to present the main results of the design of the system carriers of the heavy machining center of a drilling, milling and boring group. **Results and discussion.** At the design stage of the system carriers, the adequate overall dimensions of the base parts and the boundary conditions (force and deformation) in the areas of its contact are determined. At the second stage, a separate basic part of the actual layout is explored using the column as an example with the selection of a small fragment in the contact zone of the column and the spindle head. It is shown that the calculated field of displacements of the nodes of the column fragment is adequate to the field of displacements of the corresponding nodes of the column, obtained by calculating it as part of the system carriers. As a result of the optimization, the torsional stiffness of the column is increased by 48%. To study the dynamics of the machine, a dynamic model is built and comparative calculations with forced oscillations of the machine is carried out. For a machine with optimal base parts, there is a reduction in compliance by 30% in the direction of the greatest component of the cutting force and a decrease in mass by 17% in comparison with the serial version.

For citation: Atapin V.G. Improving the technical characteristics of machining center at the design stage. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 61–69. doi:10.17212/1994-6309-2019-21.1-61-69. (In Russian).

References

1. Lull B. Statische und dynamische berechnung von werkzeugmaschinenstellen. *Maschinenbautechnik*, 1977, vol. 26, no. 1, pp. 10–13.
2. Roscher A. Berechnung der dynamischen eigenschaften von werkzeugmaschinenstellen mit hilfe der methode der finiten elemente. *Maschinenbautechnik*, 1978, vol. 27, no. 4, pp. 156–160.
3. Kameswara Rao N.S.V. *Foundation design: theory and practice*. Singapore, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2011. 544 p. ISBN 978-0-470-82534-1.
4. Bhatia K.G. Foundations for industrial machines and earthquake effects. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 2008, vol. 45, no. 1–2, pp. 13–29.
5. Haug E.J., Choi K.K., Komkov V. *Design sensitivity analysis of structural systems. Mathematics in Science and Engineering*. Vol. 177. Orlando, Florida, Academic Press, 1986. 381 p.

* Corresponding author

Atapin Vladimir G., D.Sc. (Engineering), Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 630073, Novosibirsk, Russian Federation
 Tel.: 8 (383) 346-17-77, e-mail: atapin@mail.ru

6. Rao S.S., Grandhi R.V. Optimum design of radial drilling machine structure to satisfy static rigidity and natural frequency requirements. *Journal of Mechanical Design*, 1983, vol. 105, iss. 2, pp. 236–241. doi: 10.1115/1.3258515.
7. Reddy C.P., Rao S.S. Automated optimum design of machine-tool structures for static rigidity, natural frequencies and regenerative chatter stability. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1978, vol. 100, iss. 2, pp. 137–146. doi: 10.1115/1.3439401.
8. Yoshimura M., Takeuchi Y., Hitomi K. Design optimization of machine-tool structures considering manufacturing cost, accuracy and productivity. *Journal of Mechanical Design*, 1984, vol. 106, iss. 4, pp. 531–537. doi: 10.1115/1.3258606.
9. Atapin V.V., Kurlaev N.V. Rational design of the column of a heavy multipurpose machining center. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126, p. 012012. doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012012.
10. Atapin V.G., Bataev A.A. Pallet optimization of the heavy rotary table load carrying system. *IOP IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126, p. 012011. doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012011.
11. Atapin V.G. Raschetnoe proektirovanie nesushchikh konstruktivnykh tyazhelykh mnogotsel'nykh stankov [Settlement designing of bearing designs of heavy multi-purpose machine tools]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2011, no. 3 (52), pp. 27–34.
12. Gzhiron R.I. *Kratkii spravochnik konstruktora* [Quick reference designer]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1983. 464 p.
13. Demkin N.B. *Kontaktirovanie sherokhovatykh poverkhnostei* [Contacting rough surfaces]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 227 p.
14. Levina Z.M., Reshetov D.N. *Kontakt'naya zhestkost' mashin* [Contact rigidity of machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 264 p.
15. Lawrence K.L. *ANSYS Workbench Tutorial Release 11*. Schroff Development Corporation, 2007. 236 p.
16. Ravindran A., Ragsdell K.M., Reklaitis G.V. *Engineering optimization: methods and applications*. 2nd ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2006. 688 p. ISBN-10 0-471-55814-1. ISBN-13 978-0-471-55814-9.
17. Bunday B.D. *Basic optimization methods*. London, Edward Arnold Publ., 1984. 136 p. ISBN-13 978-0-713-13506-0. ISBN 0-713-13506-9.
18. Kaminskaya V.V. Osnovnye napravleniya razvitiya raschetov nesushchikh sistem stankov [The main directions of development of calculations carrier systems of machine tools]. *Avtomatizatsiya proektirovaniya i tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva v stankostroenii* [Automation of design and technological preparation of production in the machine tool industry]. Moscow, ENIMS Publ., 1985, pp. 54–63.
19. Kaminskaya V.V., Kushnir E.F. *Avtomatizirovannyi raschet nesushchikh sistem metallovezhushchikh stankov* [Automated calculation of carrier systems machine tools]. Moscow, ENIMS Publ., 1990. 59 p.
20. Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Dynamics of machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 359 p.

Conflicts of Interest

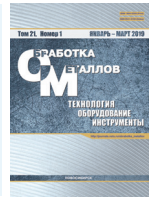
The author declare no conflict of interest.

© 2019 The Author. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Исследование влияния легирующих элементов на структуру и свойства серых чугунов, работающих в условиях ударно-фрикционного износа

Денис Габец^а, Андрей Марков^б

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, г. Барнаул, 656038, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0003-0304-4407>, gabets22@mail.ru, ^б <https://orcid.org/0000-0002-3101-9711>, andmarkov@inbox.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669.15-196.55

История статьи:

Поступила: 15 марта 2018
 Рецензирование: 28 ноября 2018
 Принята к печати: 10 декабря 2018
 Доступно онлайн: 15 марта 2019

Ключевые слова:

Легирующие чугуны
 Ударно-фрикционный износ
 Износостойкость
 Мартенсит
 Легирующие никелем
 Легирующие молибденом
 Износостойкий чугун
 Графит

АННОТАЦИЯ

Введение. В современных условиях развития промышленности эффективным методом повышения эксплуатационной надежности серых чугунов, работающих в сложных режимах ударно-фрикционного износа, является их комплексное легирование. Применение технологии легирования позволяет добиться значительного увеличения механических свойств за счет изменения структуры и характера распределения графита в чугуне. Цель данного исследования заключается в установлении зависимостей влияния легирующих элементов на эксплуатационные свойства серого чугуна, работающего в условиях ударно-фрикционного износа. **Методы исследования.** В статье представлен процесс изготовления чугуна с применением технологии легирования. Исследована микроструктура и механические свойства разработанного чугуна ЧМН-35М. Проведены фрактографические исследования поверхности после испытаний чугуна на ударный изгиб. Определение износостойкости проводили на специально изготовленных образцах методом сравнения весового износа со стандартными материалами. **Результаты и обсуждения.** В ходе выполнения исследования удалось установить влияние концентрации добавок никеля и молибдена на механические свойства разработанного чугуна. Выявлено, что легирование серого чугуна никелем от 0,5 до 0,8 % и молибденом от 0,6 до 0,9 % является оптимальным и приводит к увеличению механических свойств и твердости в пределах допустимых отраслевыми стандартами. Так, предел прочности разработанного износостойкого чугуна составляет от 395 до 450 МПа, а твердость находится в пределах от 276 до 318 НВ. Установлено, что применение технологии легирования способствует формированию структуры с более равномерным распределением графитных включений, что способствует увеличению величины предела прочности сплава в условиях одноосного статического растяжения. Проведен анализ результатов фрактографических динамических разрушенных образцов, механизм разрушения серийного и легированного чугуна одинаков, разрушение образцов происходит по хрупкому типу с явным преобладанием межзеренного разрушения, поверхность разрушения в легированном чугуне однороднее. Трибологические исследования разработанного материала показывают, что износостойкость легированного чугуна выше серийного СЧ35 на 50 %.

Для цитирования: Габец Д.А., Марков А.М. Исследование влияния легирующих элементов на структуру и свойства серых чугунов, работающих в условиях ударно-фрикционного износа // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 70–81. – doi:10.17212/1994-6309-2019-21.1-70-81.

Введение

В современных условиях развития машиностроения остро стоит вопрос надежности и долговечности узлов, работающих в сложных режимах ударно-фрикционного износа. Детали тормозных систем, рабочие части горнодобыва-

ющих и рудоперерабатывающих машин, детали тележек грузовых вагонов должны обеспечивать высокую надежность при воздействии ударных нагрузок (иметь высокие механические свойства) и высокую износостойкость в различном диапазоне температур. При этом они должны удовлетворять строгим требованиям стандартов в целях обеспечения необходимой твердости и механических свойств материалов. Одной из таких деталей является колпак скользуна тележки грузового вагона. Колпак может быть литой чугуновой или штампованной стальной.

*Адрес для переписки

Габец Денис Александрович, инженер НИС
 Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
 пр. Ленина, 46, г. Барнаул, 656038, Россия
 Тел.: 89635332000, e-mail: gabets22@mail.ru

В качестве недорогих и эффективных материалов для такого вида деталей могут применяться серые и высокопрочные чугуны. Высоких эксплуатационных показателей чугуна можно достичь при формировании перлитной или ферритно-перлитной структуры, содержащей равномерно распределенные графитные включения [1 и 2]. Одним из наиболее эффективных способов получения таких чугунов является комплексное легирование. В качестве легирующих элементов могут применяться ванадий, молибден, никель, хром, кремний, фосфор и др. [3].

Основное влияние на механические и фрикционные свойства чугунов оказывает количество, форма и распределение графита в структуре. При работе чугуна в условиях ударно-фрикционного износа графит играет двойную роль. С одной стороны, он является непрочной составляющей и может выступать концентратором зарождения трещины, а с другой – углерод в виде графита играет роль твердой смазки, что способствует уменьшению сопротивления силам трения. Кроме того, графит путем заполнения мелких пор выравнивает удельные нагрузки, действующие на трущихся поверхностях деталей [4].

Исследования режимов работы, технических характеристик, материалов изготовления и служебных свойств деталей, работающих в сложных режимах ударно-фрикционного износа, проводились отечественными и зарубежными специалистами начиная с XX века и по сегодняшний день. Однако публикаций, посвященных исследованиям влияния легирования серых чугунов на его эксплуатационные свойства, связанные с интенсивным износом и динамическими нагрузками, крайне мало.

Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния легирующих элементов на свойства серых чугунов, работающих в условиях ударно-фрикционного износа.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

1. Анализ влияния легирующих элементов на строение и механические свойства серого чугуна.

2. Испытание чугуна на ударный изгиб. Оценка разрушения, проведение фрактографических исследований динамически разрушенных образцов.

3. Сравнительные триботехнические испытания образцов из чугуна ЧМН-35М, серого чугуна СЧ35, сталей 09Г2С и 30ХГСА.

Методика исследований

Основные требования к получаемому путем легирования износостойкому чугуну – относительно низкая себестоимость за счет снижения концентрации дорогих легирующих элементов. При этом механические свойства разрабатываемого материала должны быть достаточно высокими для работы в условиях ударно-фрикционного износа (временное сопротивление при растяжении – не менее 350 МПа, твердость 250...300 НВ). Анализ существующих технологий получения износостойких ударопрочных чугунов показал, что имеется зависимость роста механических и прочностных свойств с увеличением процентного содержания никеля и молибдена [2 и 6].

В качестве базового материала для исследований был выбран серый чугун СЧ35 (ГОСТ 1412–85), легированный никелем и молибденом. Отличительная особенность данного сплава – его высокие эксплуатационные и износостойкие свойства. Основное применение данного чугуна – изготовление литых деталей тележки грузового вагона, работающих в условиях ударно-фрикционного износа, таких как фрикционный клин и колпак скользуна. Для корректировки процентного содержания никеля и молибдена, а также проведения исследования влияния легирующих элементов на механические свойства материала на ООО «Алтайский сталелитейный завод» было изготовлено по 30 экспериментальных образцов чугуна с различным процентным содержанием никеля и молибдена.

Процесс изготовления образцов опытной партии для исследования влияния концентрации никеля и молибдена на механические свойства чугуна заключается в следующем: в печь производилась завалка шихты категории 4А по ГОСТ 2787–75 в объеме 0,1. После расплава и науглероживания шихты производился забор пробы для определения химического состава сплава. Далее производилась корректировка состава сплава в печи (науглероживателем МУ-90) и доведение содержания химического состава материалов в расплаве до требуемых значений эксперимента.

После растворения углерода проводилось легирование, на зеркало металла вводилось поэтапно необходимое количество ферромолибдена

и ферроникеля. Предел показателей содержания легирующих элементов в чугуне по требованиям эксперимента варьировался: по никелю от 0 до 1,2 %, по молибдену от 0 до 1,3 %. Далее производилось увеличение температуры в печи до 1400 °С с введением расчетного взвешенного количества молибдена и никеля в соответствии с шихтовым листом.

После положительного заключения лаборатории по химическому составу к индукционной печи подавали разогретый разливочный ковш, закрепленный на электронных весах. Температура металла перед сливом из печи достигала 1435...1450 °С. Время заливки форм и образцов составляло 5 мин.

Согласно отраслевым требованиям к материалам деталей тележки грузового вагона твердость должна находиться в пределах от 250 до 300 *HB*, а предел прочности при растяжении – не менее 350 МПа.

На основе полученных результатов скорректирована рецептура легирующих элементов, разработаны технические условия (ТУ 0812-001-10036140–2014) на химический состав и механические свойства, приведенные в табл. 1 и 2, материалу отливки присвоен индекс ЧМН-

35М, а также получен патент на изобретение № 2562554 [5].

Для оценки свойств разработанного материала были изготовлены образцы для исследования химического состава, структуры и механических свойств. С целью подтверждения результатов были получены заключения по химическому составу и механическим свойствам от четырех независимых лабораторий, усредненные данные представлены в табл. 3 и 4.

Исследование микроструктуры чугуна проводилось в соответствии с ГОСТ 3443 на микроскопе Nikon Eclipse MA200 методом сравнения с эталонными шкалами. Форму, размер, распределение и площадь графитных включений определяли при увеличении в 100 крат на нетравленном шлифе. Тип металлической основы чугуна и дисперсность перлита определяли после травления в 4 %-м спиртовом растворе азотной кислоты при увеличении в 500 крат.

Фрактографические исследования осуществляли на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM 6460LV при увеличениях до 1000 крат. Исследовали поверхность разрушения образцов после испытаний на ударный изгиб.

Таблица 1

Table 1

Химический состав чугуна марки ЧМН-35М
Chemical composition of the iron CHMN-35M

Марка Чугуна / Grade	Массовая доля элементов, % Fe – остальное Main elements' weight content, % Fe – other								
	C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	Cu	P	S
ЧМН-35М / CHMN-35M	2,5...2,9	1,3...1,5	0,7...1,0	0,6...0,9	0,5...0,8	≤0,3	≤0,3	≤0,2	≤0,1

Таблица 2

Table 2

Механические свойства чугуна марки ЧМН-35М
Mechanical properties of the iron CHMN35

Марка Чугуна / Grade	Временное сопротивление при растяжении, МПа, не менее / Tensile strength, MPa, at least	Твердость по Бринеллю, <i>HB</i> / Brinell hardness, <i>HB</i>	
		не менее / At least	не более / At most
ЧМН-35М / CHMN-35M	350	250	300

Допускается превышение минимального значения временного сопротивления при растяжении не более чем на 100 МПа (10 кгс/мм²) / The minimum value of the tensile strength can exceed not more than 100 MPa

Полученный химический состав чугуна марки ЧМН-35М
The resulting chemical composition of cast iron CHMN-35M

ЧМН-35М / CHMN-35M	Массовая доля элементов, % Fe – остальное Main elements' weight content, % Fe – other								
	C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	Cu	S	P
Средний / Average	2,71	1.41	0,76	0,716	0,685	0,059	0,035	0,043	0,025

Полученные механические свойства чугуна марки ЧМН-35М
Received mechanical properties of the cast iron CHMN35

Марка Чугуна / Grade	Временное сопротивление при растяжении, МПа, не менее / Tensile strength, MPa, at least	Твердость по Бринеллю, <i>HB</i> / Brinell hardness, <i>HB</i>	
		от / from	до / before
ЧМН-35М / CHMN-35M	395	276	318

Трибологическую оценку чугуна проводили с помощью машины трения модели 2168 УМТ. Для установления зависимости износа материалов были специально изготовлены образцы (рис. 1), представляющие собой пару трения «вал – колодка» (рис. 2). В качестве испытательного оборудования используется машина трения модели 2168 УМТ. Исследования выполнялись с использованием специально изготовленных образцов, представляющих собой пару «вал – колодка». Образцы в виде вала были изготовлены из серийного серого чугуна марки СЧ35 и чугуна марки ЧМН-35М. В качестве контртела выступают колодки, изготовленные из стали 20ГЛ,

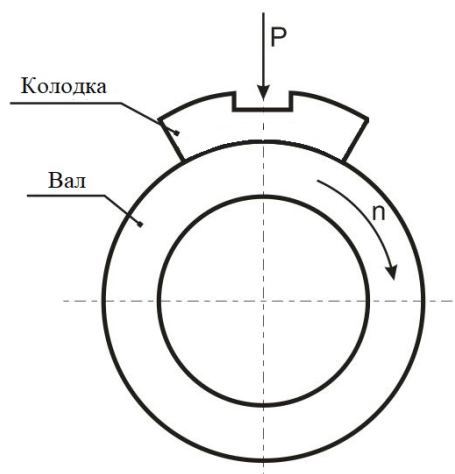


Рис. 2. Схема испытания

Fig. 2. The test scheme



Рис. 1. Фотография образцов

Fig. 1. Photo samples

30ХГСА и 09Г2С. Данные материалы используются при изготовлении деталей и узлов тележек грузовых вагонов, работающих в условиях сухого трения скольжения.

Испытания на ударный изгиб осуществлялись на маятниковом копре МК-30 в соответствии с ГОСТ 9454–78 на образцах (*KCU*) и (*KCV*) при комнатной температуре.

Результаты и их обсуждение

В ходе проведения эксперимента была выявлена зависимость влияния процентного содержания никеля и молибдена на механические

свойства разрабатываемого чугуна. Исследование механических свойств образцов чугуна, легированного никелем в пределах от 0 до 1,24 %, свидетельствует о том, что рациональное содержание никеля в чугуне находится в пределах от 0,5 до 0,8 %. При легировании никелем менее 0,5 % снижаются твердость и механические свойства материала, а при увеличении массовой доли элемента более 0,8 % твердость и механические свойства практически не изменяются (рис. 3 и 4).

Исследование механических свойств образцов чугуна, легированного молибденом в преде-

лах от 0 до 1,32 %, свидетельствует о том, что рациональное содержание молибдена в чугуне находится в пределах от 0,6 до 0,9 %. При легировании молибденом менее 0,6 % снижается твердость и механические свойства материала. Увеличение содержания молибдена более 0,9 % приводит к повышению твердости более 300 *HV*, что не удовлетворяет требованиям эксперимента (рис. 5). Предел прочности при растяжении с увеличением содержания молибдена более 0,9 % увеличивается незначительно (рис. 6) [3, 7, 8].

Поскольку свойства чугунов во многом определяются структурой его основы и графит-

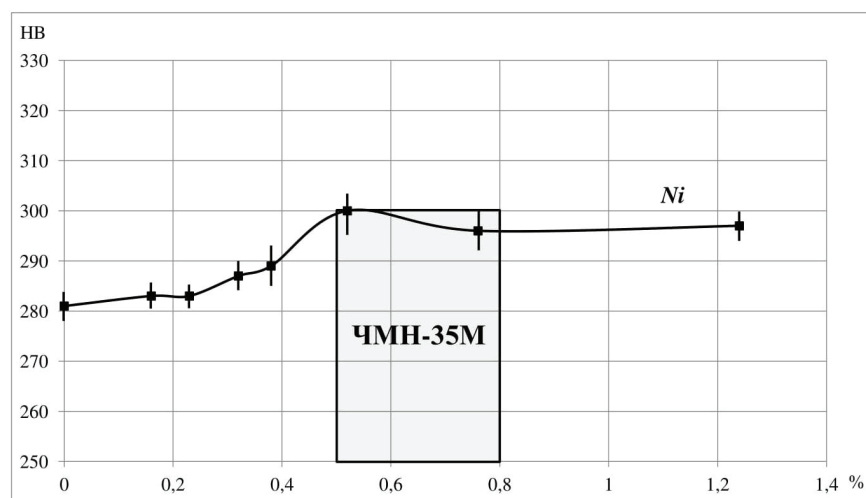


Рис. 3. Влияние никеля на твердость чугуна ЧМН-35М

Fig. 3. The effect of nickel on the hardness of cast iron CHMN-35M

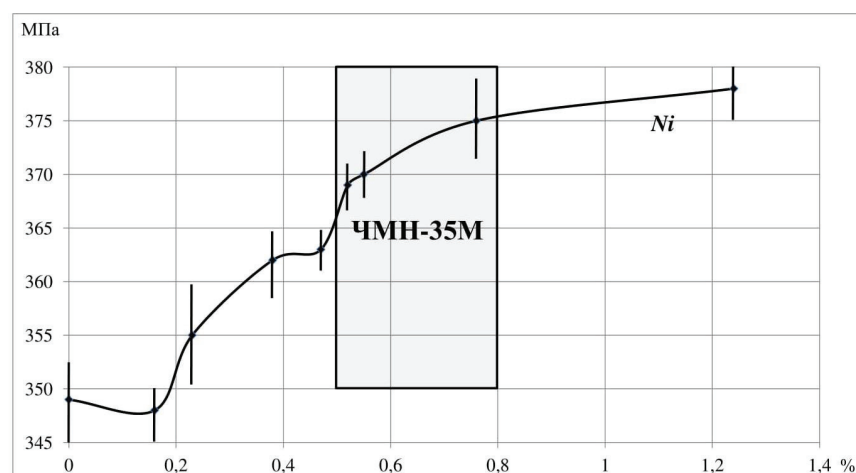


Рис. 4. Влияние никеля на предел прочности при растяжении чугуна ЧМН-35М

Fig. 4. The effect of nickel on tensile strength of cast iron CHMN-35M

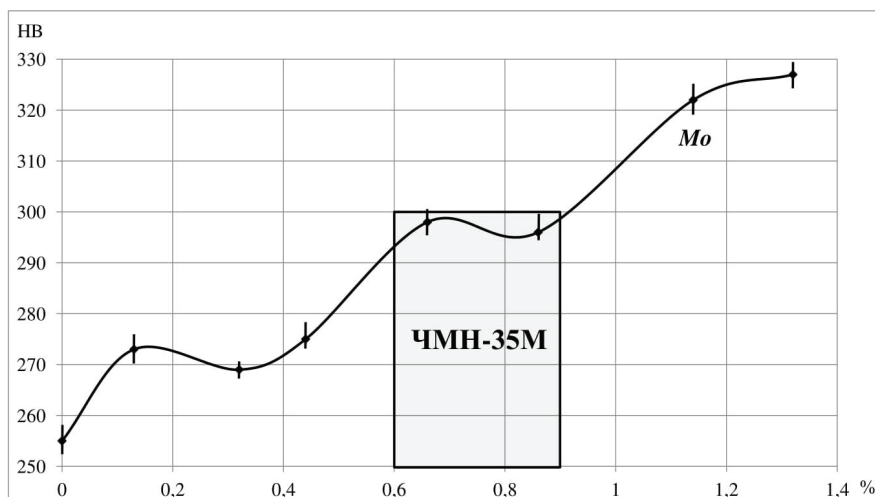


Рис. 5. Влияние молибдена на твердость чугуна ЧМН-35М

Fig. 5. The effect of molybdenum on the hardness of cast iron ChMN-35M

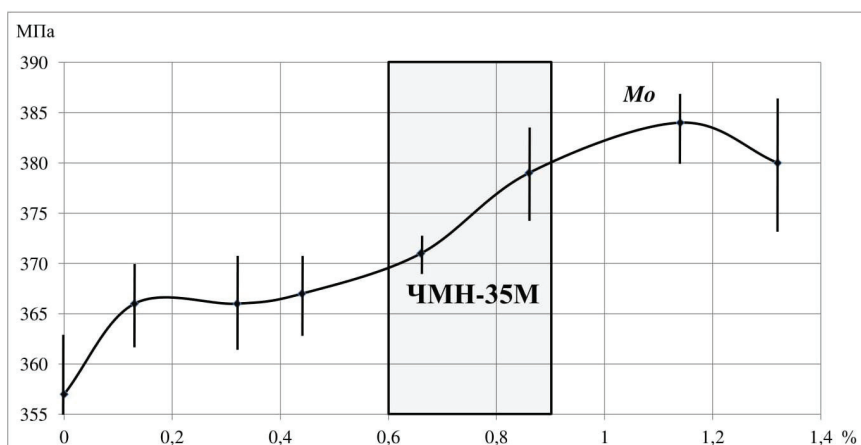


Рис. 6. Влияние молибдена на предел прочности при растяжении чугуна ЧМН-35М

Fig. 6. The effect of molybdenum on tensile strength of cast iron ChMN-35M

ной фазы, был проведен сравнительный анализ структурного состояния образцов после механических испытаний.

Распределение графитных включений в чугуне СЧ35 – смешанное междендритное неравномерное (рис. 7, а). В чугуне ЧМН-35М – смешанное (равномерное и участки неравномерного) распределение графита (рис. 7, б). Металлическая основа чугуна СЧ35 полностью перлитная (рис. 8, а). Основные отличия легированного чугуна заключаются в структуре металлической основы: наличие перлита и феррита (рис. 8, б). Микроанализ чугунов по величине центров кристаллизации свидетельствует о более дисперсной металлической основе чугуна ЧМН-35М (рис. 9, а и б) [8–12].

Результаты исследования образцов на ударный изгиб представлены в табл. 5; характер разрушения – макрорупкий. Из приведенных в табл. 5 данных видно, что легированный чугун, так же как и чугун марки СЧ 35, не чувствителен к концентраторам напряжений. Ударная вязкость образцов практически одинакова. Это обусловлено наличием графитных включений, которые из-за низкой прочности при разрушении могут рассматриваться как микротрещины [12–14].

Механизм разрушения чугуна СЧ35 (рис. 10, а) и легированного чугуна ЧМН-35М (рис. 10, б) одинаковый как в области зарождения, так и в области распространения трещины. Разрушение проходит по хрупкому механизму с явным преобладанием межзеренного разрушения [15].

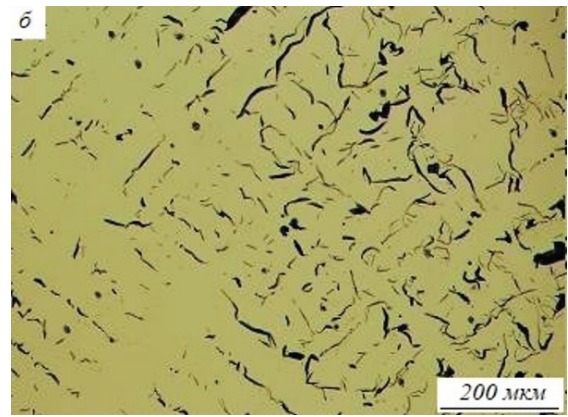
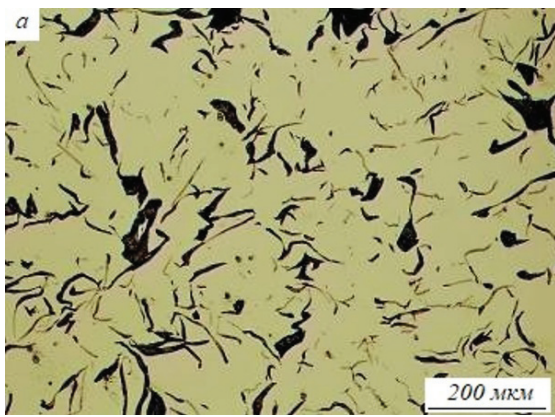


Рис. 7. Распределение графита:

a – смешанное и неравномерное в чугуна СЧ35; *б* – смешанное в чугуна ЧМН-35М

Fig. 7. Graphite distribution:

a – mixed and nonuniform in SCH35 cast iron; *б* – mixed in CHMN-35M cast iron

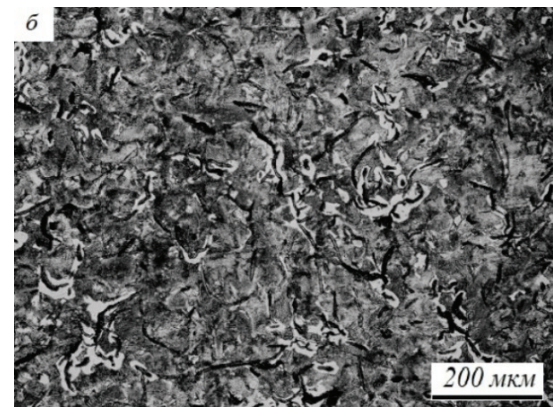
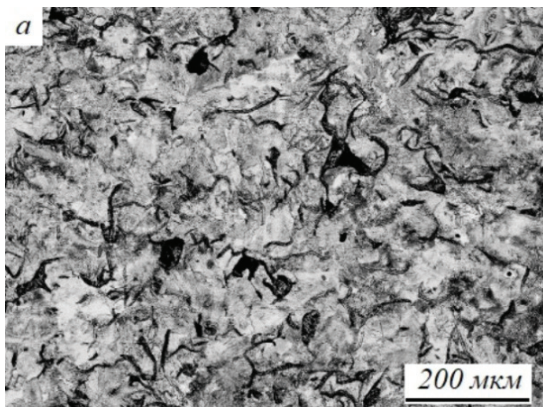


Рис. 8. Основа:

a – перлитная в чугуна СЧ35; *б* – перлитно-ферритная в чугуна ЧМН-35М

Fig. 8. Matrix:

a – pearlite in SCH35 cast iron; *б* – pearlite-ferritic in iron-stone CHMN-35M

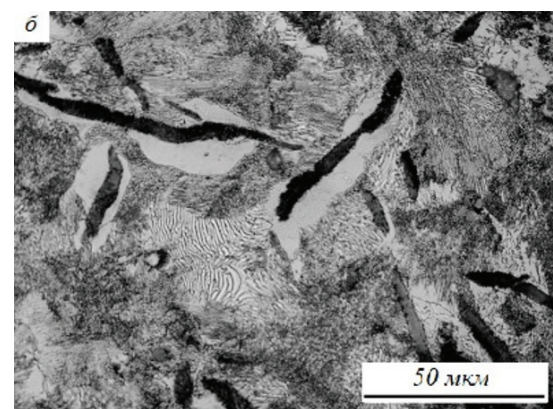
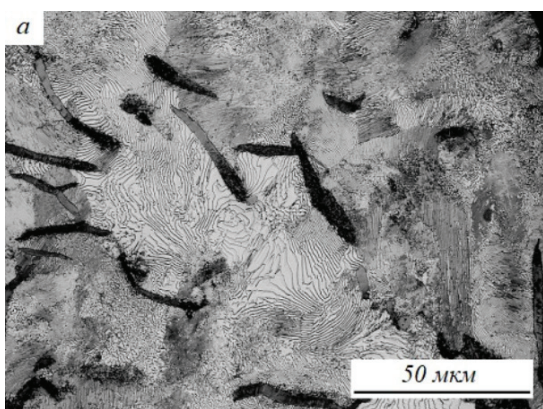


Рис. 9. Дисперсность:

a – перлита в чугуна СЧ35; *б* – перлита и феррита в чугуна ЧМН-35М

Fig. 9. Dispersion:

a – pearlite in cast iron SCH35; *б* – pearlite and ferrite in PMN-35M iron

Результаты испытаний на ударный изгиб
Impact test results

№ п/п	Марка чугуна / Grade	Ударная вязкость <i>KCU</i> , Дж/см ² / Impact strength <i>KCU</i> , J/cm ²	Ударная вязкость <i>KCV</i> , Дж/см ² / Impact strength <i>KCV</i> , J/cm ²
1	ЧМН-35М / CHMN-35M	107...112	102...108
2	СЧ35 / SCH35	89...95	95...101

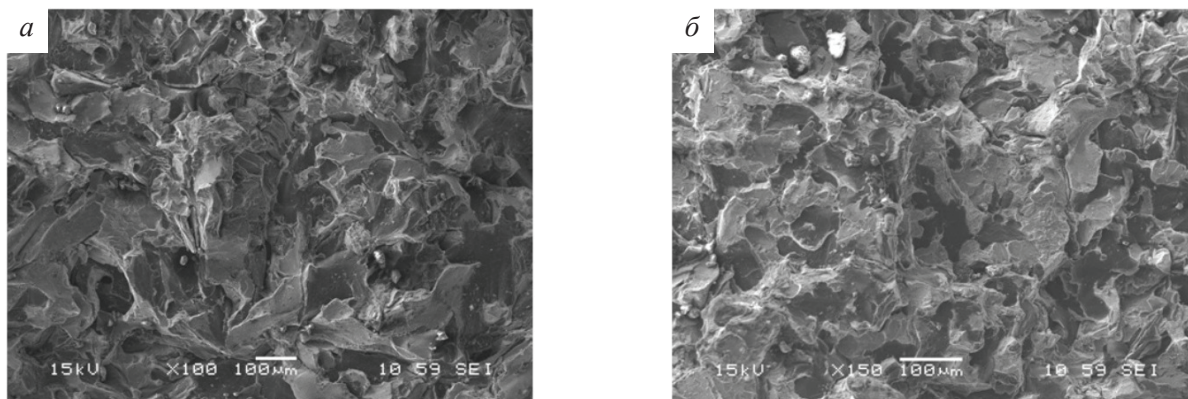


Рис. 10. Фрактограмма излома после испытаний на ударный изгиб:

а – чугуна СЧ35; *б* – чугуна ЧМН-35М

Fig. 10. Fracture pattern after impact testing:

а – cast iron SCH35; *б* – FMN-35M cast iron

В изломах присутствуют фасетки хрупкого скола, их размер в области зарождения и распространения трещины практически одинаковый. В легированном чугуне ЧМН-35М строение поверхности разрушения однороднее, размер фасеток скола примерно в 1,5 раза мельче, что связано с более дисперсной металлической основой чугуна [3, 16].

Проведен ряд сравнительных триботехнических исследований для установления зависимости весового износа от длины пути в результате взаимодействия трущихся поверхностей. Результаты определения износостойкости (потери массы) «вала» и «колодки» представлены в табл. 6 [17–19].

Результаты сравнительных трибологических испытаний показывают, что износостойкость валов из чугуна ЧМН-35М значительно выше, чем валов из чугуна СЧ35, а коэффициент трения в парах трения чугунов практически одинаков за счет присутствия в структуре графита. Анализ суммарного износа пар трения говорит о том,

что износостойкость разработанного чугуна в парах трения со сталями 30ХГСА и 20ГЛ выше примерно на 50 %. На основании сравнения результатов испытаний можно утверждать, что чугун ЧМН-35М полностью соответствует эксплуатационным требованиям, что подтверждается испытаниями на износостойкость.

Выводы

1. Исследование влияния легирующих элементов в чугуне ЧМН-35М выявило зависимость влияния концентрации никеля и молибдена на твердость и механические свойства разработанного материала. Ввод никеля от 0,5 до 0,8 % и молибдена от 0,6 до 0,9 % является наиболее рациональным и способствует преобразованию структуры сплава, образованию более дисперсной металлической основы, что сопровождается равномерным распределением графитовых включений и повышением комплекса механических свойств материала от 350 до 395 МПа.

Результаты определения износостойкости
Results of ware resistance study

№ п/п	Пара трения (колодка – вал) / Friction pair (hob – shaft)	Коэффициент трения / Friction coefficient	Масса весового износа, г / Weight wear mass, g		Суммарный износ, г / Accumulative wear of friction couples, g
			колодка / hob	вал / shaft	
1	СЧ35 – 30ХГСА / SCH35 – 30HGSA	0,11...0,13	0,12	1,01	1,13
2	ЧМН-35М – 30ХГСА / CHMN-35M – 30HGSA	0,10...0,12	0,05	0,51	0,56
3	СЧ35 – 20ГЛ / SCH35 – 20GL	0,12...0,13	0,04	0,98	1,02
4	ЧМН-35М – 20ГЛ / CHMN-35M – 20GL	0,11...0,12	0,12	0,66	0,78
5	СЧ35 – 09Г2С / SCH35 – 09G2S	0,13...0,14	0,45	0,35	0,80
6	ЧМН-35М – 09Г2С / CHMN-35M – 09G2S	0,11...0,12	0,13	0,56	0,69

2. Анализ результатов фрактографических исследований динамически разрушенных образцов свидетельствует о том, что механизмы разрушения серого чугуна СЧ35 и разработанного легированного износостойкого чугуна ЧМН-35М имеют одинаковый характер как в зонах зарождения, так и в зонах распространения трещин. Разрушение образцов происходит по хрупкому типу с явным преобладанием межзеренного механизма. Поверхности разрушения образцов из ЧМН-35М более однородные, размер фасеток скола составляет от 20 до 60 мкм, что примерно в 1,5 раза мельче, чем у чугуна СЧ35.

3. Результаты триботехнических испытаний свидетельствуют о высокой износостойкости разработанных материалов. В условиях сухого трения скольжения износостойкость разработанного сплава по сравнению с образцами из стандартного чугуна СЧ35 выше примерно на 50 %.

Список литературы

1. *Гиршович Н.Г.* Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. – М.: Машиностроение, 1966. – 562 с.
2. *Чигарев В.В., Рассохин Д.А., Лоза А.В.* Изменение структуры и свойств литого металла легированием в отливках из чугуна и стали // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – 2010. – Вип. 21. – С. 61–66.

3. *Габец Д.А., Марков А.М., Габец А.В.* Исследование влияния химического состава и структуры на механические свойства чугуна ЧМН-35М // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 100–106.

4. Making spheroidal graphite cast iron by the LS-process / A.I. Belyakov, L.A. Petrov, V.V. Kaminskij, T.A. Akhunov, V.P. Ershov // Литейное производство. – 1997. – № 5. – С. 20–21.

5. Патент 2562554 Российская Федерация. Чугун / А.В. Габец, Д.А. Габец. – № 2014118635; заявл. 08.05.2014; опубл. 12.08.2015, Бюл. № 25. – 5 с.

6. *Корниенко Э.Н., Бикулов Р.А.* Тяжелая лигатура для получения высокопрочного чугуна // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 2. – С. 3–5.

7. Управление износостойкостью ответственных узлов и деталей подвижного состава: монография / А.В. Габец, А.М. Марков, Д.А. Габец, Е.О. Чертовских. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2016. – 213 с. – ISBN 978-5-7568-1188-9.

8. Влияние модифицирования на структуру и свойства чугуна и стали для прокатных валков / В.А. Корвин, И.О. Леушин, Р.Н. Палавин, А.С. Киров // Литейщик России. – 2011. – № 12. – С. 15–17.

9. *Семенов В.И., Чайкин А.В.* Фазовые и структурные изменения в чугуне после модифицирования // Металлургия машиностроения. – 2006. – № 5. – С. 14–18.

10. *Комаров О.С., Розенберг Е.В., Урбанович Н.И.* Особенности модифицирования различных типов же-

лезоуглеродистых сплавов // Литье и металлургия. – 2015. – № 2 (79). – С. 24–28.

11. *Габец Д.А., Марков А.М., Габец А.В.* Специальный модифицированный чугун марки ЧМН-35М для тяжело нагруженных деталей тележки грузового вагона // Тяжелое машиностроение. – 2016. – № 1–2. – С. 23–26.

12. *Boulifaa M.I., Hadji A.* Effect of alloying elements on the mechanical behavior and wear of austempered ductile iron // Mechanics and Industry. – 2015. – Vol. 16, iss. 3. – P. 304. – doi: 10.1051/meca/2015002.

13. *Ларин Т.В., Асташкевич Б.М., Транковская Г.Р.* Влияние ванадия, меди, алюминия на износостойкость и фрикционные свойства фосфористого чугуна для тормозных колодок // Вестник ВНИИЖТ. – 1986. – № 8. – С. 40–42.

14. *Vijeesh V., Prabhu K.N.* Review of microstructure evolution in hypereutectic AL-SI alloys and its effect on wear properties // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2014. – Vol. 67, iss. 1. – P. 1–18. – doi: 10.1007/s12666-013-0327-x.

15. Effect of fluctuation and modification on microstructure and impact toughness of 20 WT.% CR hypereutectic white cast iron / X. Zhi, J. Xing, H. Fu, Y. Gao // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. – 2008. – Vol. 39, iss. 6. – P. 391–393. – doi: 10.1002/mawe.200700219.

16. *Габец А.В., Марков А.М., Габец Д.А.* Моделирование эксплуатационных свойств деталей, изготовленных из специального чугуна ЧМН-35М // Ползуновский вестник. – 2016. – № 2. – С. 36–44.

17. *Гурей Т.А.* Повышение износостойкости чугунных деталей поверхностным упрочнением // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2016. – № 74. – С. 48–52. – Яз. укр.

18. *Xu T., Hu C., Xie D.* Effect of re modification and heat treatment on formation and growth of thermal fatigue crack in wear resistant cast iron containing low alloy // Journal of Rare Earths. – 2003. – Vol. 21, Suppl. – P. 202–205.

19. Повышение износостойкости фрикционных деталей из серого чугуна / Б.В. Борщ, А.В. Габец, А.В. Сухов, Г.А. Филиппов // Сталь. – 2014. – № 1. – С. 66–68.

Конфликт интересов

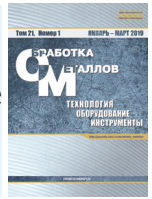
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Study of the Influence of Alloying Elements on the Structure and Properties of Gray Cast Iron Operating under Conditions of Shock-Friction Wear

Denis Gabets^a, Andrei Markov^b

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

^a <https://orcid.org/0000-0003-0304-4407>, gabets22@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-3101-9711>, andmarkov@inbox.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 March 2018

Revised: 28 November 2018

Accepted: 10 December 2018

Available online: 15 March 2019

Keywords:

Alloying and modification of cast iron

Shock-frictional wear

Wear resistance

Martensite

Alloying with nickel

Alloying with molybdenum

Wear resistant cast iron

Graphite

ABSTRACT

Introduction. The solution on improving the speed and volume of cargo transportation by railway transport is connected with increased requirements to critical parts of the rolling stock. One of such details is a side bearing cap. The cap is installed on the support in the truck bolster and designed to hold a car body of the lateral forces. **Method.** The previous studies have shown that gray cast iron, in particular, SCH35 grade, is an effective material with satisfactory performance properties under high loads. Gray cast iron contains graphite which in the frictional couples can serve as cutting oil. However, these properties are not always sufficient for the buffing loading conditions, subjected to the slid bearing cap. **Results and Discussion.** Achieved results and the patent search allowed declaring the resulting iron as an invention (patent number 2562554). In the course of the investigation, it is possible to establish the influence of the concentration of alloying elements of nickel and molybdenum on the mechanical properties of the developed cast iron. The quality of the new iron and its characteristics are assessed within laboratory and stand tests. Polished sections analysis of non-etching samples allowed identifying graphitic phase. Study of metal matrix has shown that metal backing of the cast iron has perlite alongside with acicular perlite. Besides, this iron CHMN-35M metal matrix has perlite-ferritic metal backing. As reflected by the results, in all combinations iron of CHMN-35M grade has shown the best (approximately in 1.5 times) wear resistance in comparison with SCH35 iron. Therefore, the total value of accumulative wear (hob and shaft wear) in couples with CHMN-35M iron is also lower.

For citation: Gabets D.A., Markov A.M. Study of the influence of alloying elements on the structure and properties of gray cast iron operating under conditions of shock-friction wear. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 70–81. doi: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-70-81. (In Russian).

References

1. Girshovich N.G. *Kristallizatsiya i svoistva chuguna v otlivkakh* [Crystallization and properties of iron in casts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 562 p.
2. Chigarev V.V., Rassokhin D.A., Loza A.V. *Izmenenie struktury i svoistv litogo metalla legirovaniem v otlivkakh iz chuguna i stali* [Modification of the structure and properties of cast metal by means of alloying in castings, made of iron and steel]. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki = Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Technical sciences*, 2010, iss. 21, pp. 61–66.
3. Gabets D.A., Markov A.M., Gabets A.V. *Issledovanie vliyaniya khimicheskogo sostava i struktury na mekhanicheskie svoistva chuguna ChMN-35M* [Investigation of chemical composition and material structure influence on mechanical properties of special cast iron]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii = Actual problems in machine building*, 2017, vol. 4, no. 4, pp. 100–106.
4. Belyakov A.I., Petrov L.A., Kaminskij V.V., Akhunov T.A., Ershov V.P. *Making spheroidal graphite cast iron by the LS-process. Liteinoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 1997, no. 5, pp. 20–21.

* Corresponding author

Gabets Denis A., Research Engineer,
 I.I. Polzunov Altai State Technical University,
 46 Lenina avenue,
 Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation
 Tel.: 89635332000, e-mail: gabets22@mail.ru

5. Gabets A.V., Gabets D.A. *Chugun* [Cast iron]. Patent RF, no. 2562554, 2015.
6. Kornienko E.N., Bikulov R.A. Tyazhelaya ligatura dlya polucheniya vysokoprochnogo chugun [Heavy alloy for obtaining spheroidal graphite iron]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii* = *Blanking productions in mechanical engineering*, 2009, no. 2, pp. 3–5.
7. Gabets A.V., Markov A.M., Gabets D.A., Chertovskikh E.O. *Upravlenie iznosostoikost'yu otvetstvennykh uzlov i detalei podvizhnogo sostava* [Wear-resistance properties control of units and details of the rolling stock]. Barnaul, Polzunov Altai State Technical University Publ., 2016. 213 p. ISBN 978-5-7568-1188-9.
8. Korovin V.A., Leushin I.O., Palavin R.N., Kirov A.S. Vliyanie modifitsirovaniya na strukturu i svoistva chuguna i stali dlya prokatnykh valkov [Influence of modification to structure and properties of iron and steel for cast rolls]. *Liteishchik Rossii* = *Foundrymen of Russia*, 2011, no. 12, pp. 15–17.
9. Semenov V.I., Chaikin A.V. Fazovye i strukturnye izmeneniya v chugune posle modifitsirovaniya [Phase and structural changes in cast iron upon inoculation]. *Metallurgiya mashinostroeniya* = *Metallurgy of Machinery Building*, 2006, no. 5, pp. 14–18.
10. Komarov O.S., Rozenberg E.V., Urbanovich N.I. Osobennosti modifitsirovaniya razlichnykh tipov zhelezouglerodistykh splavov [Features modifying various types of iron-carbon alloys]. *Lit'e i metallurgiya* = *Foundry Production and Metallurgy*, 2015, no. 2 (79), pp. 24–28.
11. Gabets D.A., Markov A.M., Gabets A.V. Spetsial'nyi modifitsirovannyi chugun marki ChMN-35M dlya tyazhelo nagruzhennykh detalei telezhki gruzovogo vagona [Special modified pig iron brand CHMN-35M for heavily-loaded parts of freight-car truck]. *Tyazheloe mashinostroenie* = *Russian Journal of Heavy Machinery*, 2016, no. 1–2, pp. 23–26.
12. Boulifaa M.I., Hadji A. Effect of alloying elements on the mechanical behavior and wear of austempered ductile iron. *Mechanics and Industry*, 2015, vol. 16, iss. 3, p. 304. doi: 10.1051/meca/2015002.
13. Larin T.V., Astashkevich B.M., Trankovskaya G.R. Vliyanie vanadiya, medi, alyuminiya na iznosostoikost' i friktsionnye svoistva fosforistogo chuguna dlya tormoznykh kolodok [Influence of vanadium, cuprum, aluminum to wear-resistance and fractional properties of phosphoric iron for clasp blocks]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* = *Vestnik of the Railway Research Institute*, 1986, no. 8, pp. 40–42.
14. Vijeesh V., Prabhu K.N. Review of microstructure evolution in hypereutectic AL-SI alloys and its effect on wear properties. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2014, vol. 67, iss. 1, pp. 1–18. doi: 10.1007/s12666-013-0327-x.
15. Zhi X., Xing J., Fu H., Gao Y. Effect of fluctuation and modification on microstructure and impact toughness of 20 WT.% CR hypereutectic white cast iron. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2008, vol. 39, iss. 6, pp. 391–393. doi: 10.1002/mawe.200700219.
16. Gabets A.V., Markov A.M., Gabets D.A. Modelirovanie ekspluatatsionnykh svoistv detalei izgotovlennykh iz spetsial'nogo chuguna ChMN-35M [Modeling of working properties of details comprised of special iron ChMN-35M]. *Polzunovskii vestnik* = *Polzunov Bulletin*, 2016, no. 2, pp. 36–44.
17. Hurey T. Increase of wear resistance of cast iron parts by surface hardening. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* = *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 2016, no. 74, pp. 48–52. (In Ukrainian).
18. Xu T., Hu C., Xie D. Effect of re modification and heat treatment on formation and growth of thermal fatigue crack in wear resistant cast iron containing low alloy. *Journal of Rare Earths*, 2003, vol. 21, Suppl., pp. 202–205.
19. Borshch B.V., Gabets A.V., Sukhov A.V., Filippov G.A. Povyshenie iznosostoikosti friktsionnykh detalei iz serogo chuguna [Increasing the wear resistance of friction grey cast iron components]. *Stal'* = *Steel in Translation*, 2014, no. 1, pp. 66–68. (In Russian).

Conflicts of Interest

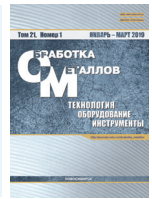
The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Исследование влияния режимов фокусировки лазерного излучения на геометрические и механические свойства металлокерамических треков

Александр Гольшев^{1, 2, а, *}, Анатолий Оришич^{1, 2, б}

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0002-4243-0602>, alexgol@itam.nsc.ru, ^б <https://orcid.org/0000-0003-0551-0213>, laser@itam.nsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793

История статьи:

Поступила: 23 ноября 2018
 Рецензирование: 18 января 2019
 Принята к печати: 29 января 2019
 Доступно онлайн: 15 марта 2019

Ключевые слова:

Лазерная наплавка
 Оптимизация
 Металлокерамика
 Микротвердость
 Законы подобия
 Карбид вольфрама

Финансирование

Часть работы, связанная с настройкой методики оптимизации наплавки, отработкой технологии получения качественных образцов и поиск обобщенных параметров, выполнена за счет гранта Российского научного фонда, проект № 18-79-00052 «Исследование послойного лазерного формирования функционально-градиентных металлокерамических структур, включающих в себя В4С, TiC и TiB₂, используя импульсно-периодическое лазерное излучение».

АННОТАЦИЯ

Введение. Аддитивные технологии (АТ) – способ изготовления изделий путем послойного наращивания материала любой геометрии. Эта технология играет важную роль в изготовлении функциональных изделий или в восстановлении их изношенных частей с высокими прочностными свойствами. Металлокерамические структуры, включающие в себя карбид вольфрама и никелевый сплав, широко используются в трибологических применениях для защиты компонентов, которые подвергаются высокой интенсивности износа, таких как режущий инструмент, сверление и механическая обработка, горная промышленность. **Цель работы:** проведение оптимизации режимов лазерной наплавки металлокерамических единичных треков для получения монолитной наплавленной структуры с максимальной твердостью. **В работе исследовано** влияние лазерного излучения на геометрические и механические характеристики формируемых дорожек при использовании порошковой смеси на основе сплавов никеля 60 % вес. NiCrBSi и карбида вольфрама 40 % вес. WC. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что большое влияние на форму и механические характеристики влияет режим фокусировки лазерного излучения (режим кинжального проплавления или режим теплопроводности) относительно поверхности начального слоя порошковой смеси. Получено, что при использовании в качестве независимой переменной параметра p/\sqrt{V} для режима кинжального проплавления ($\Delta f = -3$), все данные ширины треков w и глубины проплава Hm можно описать едиными зависимостями. Показано, что в наплавленном треке при режиме теплопроводности (режим фокусировки $\Delta f = \pm 20$) наблюдается равномерное распределение керамических частиц, характеризующихся наибольшим значением микротвердости. Получено, что наплавленная металлокерамическая структура обладает в 4...5 раз большим значением микротвердости 850,4 HV0.1 по сравнению с подложкой 178 HV0.1.

Для цитирования: Гольшев А.А., Оришич А.М. Исследование влияния режимов фокусировки лазерного излучения на геометрические и механические свойства металлокерамических треков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 82–92. – doi:10.17212/1994-6309-2019-21.1-82-92.

*Адрес для переписки

Гольшев Александр Анатольевич, к.ф.-м.н., н.с.,
 Институт теоретической и прикладной механики
 им. С.А. Христиановича СО РАН
 ул. Институтская, 4/1,
 630090, г. Новосибирск, Россия
 Тел.: 8 923 252-00-12, e-mail: alexgol@itam.nsc.ru

Введение

Существующая потребность для промышленности в высокофункциональных легких деталях со сложной геометрической формой привела к увеличению интереса во всем мире к аддитивным технологиям (АТ) [1 и 2]. Благодаря использованию различных видов АТ стало

возможным выращивание детали из широкого диапазона материалов, таких как металлы, полимеры, керамика и т. д. На сегодняшний день АТ нашли множество применений во многих областях промышленности, таких как аэрокосмическая, автомобильная, медицинская, электронная отрасль и др. [3 и 4].

В настоящее время известно более десяти различных способов или технологий послойного синтеза деталей. Например, электронно-лучевое плавление, селективное лазерное спекание, селективное лазерное плавление (SLM) и другие, причем с каждым годом разрабатываются все новые способы. SLM-технология является наиболее широко используемой и универсальной аддитивной технологией. В процессе селективного лазерного плавления сфокусированный лазерный пучок перемещается по заданной траектории и нагревает частички наплавляемого порошка. Таким образом, в месте воздействия лазерного луча происходит расплавление материала и образуется небольшая «ванна» расплава, которая при охлаждении затвердевает. Далее наносится новый слой, и процесс лазерного сканирования повторяется, пока не сформируется 3D-изделие. Характеристики процесса плавления материала и формирование «ванны» расплава зависят от целого ряда параметров, таких как мощность излучения лазера, скорость сканирования, размер пучка, толщина наносимого слоя и др.

Получаемые детали, формируемые SLM-методом, демонстрируют повышенные механические, трибологические и коррозионные свойства по сравнению с их аналогами [5]. Например, в работах [6] сообщается, что выращенная с помощью АТ деталь из нержавеющей стали 316L может соответствовать и даже превосходить механические свойства отливки. Однако для достижения желаемых механических свойств необходимо тщательно контролировать технологические параметры АТ [7].

Несмотря на многие преимущества, SLM-технология имеет некоторые недостатки. Локализованное нагревание и охлаждение вызывает резкий градиент температуры, который, в свою очередь, приводит к образованию термических напряжений [8]. Это может привести к дефектам, таким как образование трещин, деформациям и ухудшению качества поверхности, как

сообщает Vastola et al. [9]. Однако энергетические параметры играют ключевую роль, так как оказывают наибольшее влияние на морфологию расплава и, следовательно, на стабильность процесса, что сказывается на качестве создаваемой детали [10 и 11]. Для достижения желаемых металлургических свойств требуется оптимальный выбор параметров лазерной обработки [12 и 13], а именно мощность лазерного излучения, размер пятна пучка, скорость лазерного сканирования и др.

Для улучшения характеристик формируемых изделий используются металлматричные композитные (ММК) покрытия. Их желаемые механические свойства могут быть получены с помощью соответствующей комбинации подкреплений и металлических матриц. В настоящее время разработаны несколько видов ММК, в том числе на основе Al-, Ti-, Fe-, Cu-, Mg и Ni, армированные либо волокнами, либо частицами карбидов [14].

Покрытия на основе никелевых сплавов характеризуются повышенной коррозионной стойкостью, отличной стойкостью к адгезионному и абразивному износу и значительно расширяют применение в технике [15–17]. Так, покрытия, формируемые из сплавов на основе Ni, широко используются для улучшения характеристик таких изделий, как турбины, износостойкие пластины и рулоны для прокатных станов, поверхность которых подвержена сильным износостойким условиям. Резервом повышения износостойкости покрытий является создание на их основе композиций с карбидным упрочнением, например, с карбидом вольфрама (WC). Карбид вольфрама характеризуется превосходной износостойкостью в сочетании с высокой термостойкостью и хорошей смачиваемостью расплавленным металлом [18]. В результате металлокерамические структуры, включающие в себя карбид вольфрама и никелевый сплав, широко используются в трибологических применениях для защиты компонентов, которые подвергаются высокой интенсивности износа, таких как режущий инструмент, сверление и механическая обработка, горная промышленность [19]. Отметим, что если режимы нанесения металлматричных композитных покрытий достаточно подробно исследованы, то влияние армирования частицами карбидов, особенно при

высокой концентрации керамики, на режимы оптимального лазерного воздействия требуют детального исследования. В настоящей работе проводится оптимизация режимов лазерной наплавки металлокерамических единичных треков для получения монолитной наплавленной структуры с максимальной твердостью. Исследуется влияние лазерного излучения на геометрические и механические характеристики формируемых дорожек при использовании порошковой смеси на основе сплавов никеля NiCrBSi с содержанием карбида вольфрама (WC).

Методика исследований

На подложку в виде пластины (толщина 5 мм, размер 50 × 50 мм) из нержавеющей стали марки 12X18Н10Т наплавлялась металлокерамическая порошковая смесь. В качестве наплавляемого материала использовалась порошковая смесь фирмы «Техникорд», состоящая из двух видов порошков: 40 % карбида вольфрама (WC) и 60 % системы Ni–Cr–B–Si. На рис. 1 представлена фотография используемой порошковой смеси. Видно, что частицы керамики WC обладают осколочной формой, а частицы Ni–Cr–B–Si – сферической со средним размером 40 мкм.

Эксперименты проводились на созданном в ИТПМ СО РАН АЛТК «Сибирь 4» [20]. АЛТК «Сибирь 4» включает в себя непрерывный CO₂-лазер мощностью до 5000 Вт и параметром качества пучка $K = 0,7$ и компьютерную систему управления лазером и технологическим столом. Лазерное излучение с помощью линзы из ZnSe

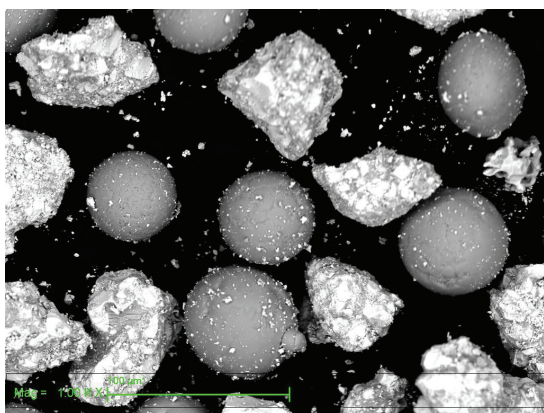


Рис. 1. Фотография порошковой смеси:

40 % WC и 60 % Ni–Cr–Si–B

Fig. 1. Powder mixture photo:

40 % WC, 60 % Ni–Cr–Si–B

с фокусным расстоянием 254 мм фокусировалось в глубь материала, на поверхность и над материалом. Перетяжка фокуса располагалась на разных расстояниях от верхней поверхности подложки (рис. 2), диаметр пятна на поверхности при $\Delta f = \pm 20$ мм составлял примерно 2 мм. Наплавка осуществлялась в защитной атмосфере гелия, подававшегося через сопло.

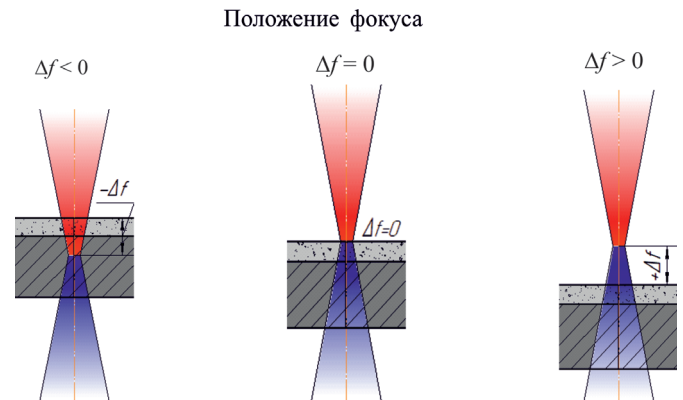


Рис. 2. Схематическое изображение режимов фокусировки

Fig. 2. Schematic of focusing modes

Формируемые треки исследовались на оптическом конфокальном микроскопе Olympus LEXT OLS 3000. Измерения микротвердости проводились по Виккерсу на микротвердомере Wilson Hardness Group Tukon1102 с нагрузкой 100 г.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены фотографии единичных треков (вид сверху) при разных режимах фокусировки при постоянных остальных параметрах (скорость 0,7 м/мин, мощность 1000 Вт, толщина слоя 1 мм).

Из рис. 3 видно, что в большинстве случаев наплавленный валик обладает нестабильной геометрической формой. Однако следует выделить режимы $\Delta f = -3, -6$ мм, при которых наплавленные треки имеют однородный вид по всей длине.

Выберем режим фокусировки $\Delta f = -3$ мм и исследуем микроструктуру наплавочных треков при разных параметрах наплавки. На рис. 4 представлены шлифы поперечных сечений наплавленных дорожек при разной скорости сканирования и мощности лазерного излучения.

На рис. 4 показано, что все треки имеют в зоне проплава поры. Стоит отметить, что для

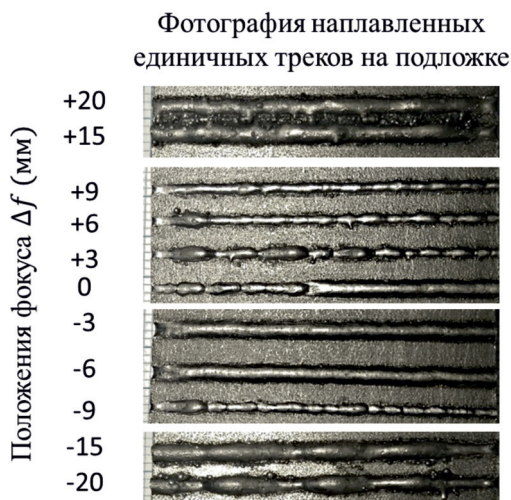


Рис. 3. Фотографии наплавленных единичных треков при переменном положении фокуса Δf ($V = 0,7$ м/мин и $P = 1000$ Вт)

Fig. 3. Photos of cladded unit tacks at the variable position of focus Δf ($V = 0.7$ m/min and $P = 1,000$ W)

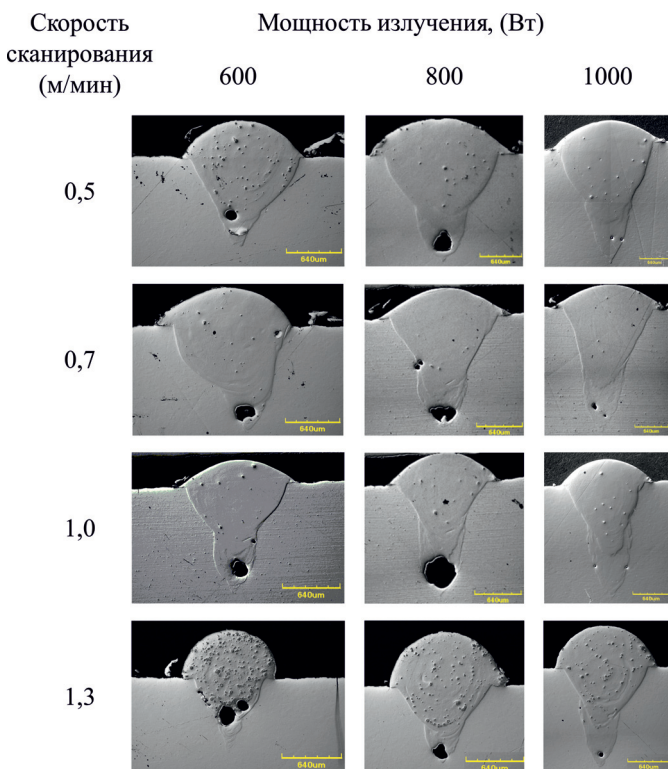


Рис. 4. Влияние мощности и скорости на сечение наплавленного одиночного валика при перетяжке положения фокуса $\Delta f = -3$ мм

Fig. 4. Influence of power and velocity on the cross section of the unit cladded bed as the focus position waist $\Delta f = -3$ mm

каждого значения мощности излучения при максимальной скорости сканирования в материале трека содержится больше нерасплавленных частиц карбида вольфрама.

Минимальная зона проплава среди экспериментальных треков, наплавленных при $\Delta f = -3$ мм, оказалась при максимальной скорости $V = 1,3$ м/мин и минимальной мощности $P = 600$ Вт.

Как видно из рис. 5, ширина трека и глубина проплава имеют аналогичные зависимости от параметров наплавки. Экспериментальные точки достаточно разбросаны и не позволяют произвести обобщение данных для получения полной картины зависимости геометрических характеристик наплаваемых валиков от энергетических параметров. Однако в работах [21 и 22] при исследовании лазерной резки показано, что введение размерных и безразмерных комбинаций позволяет эффективно обобщать полученные данные.

Технология наплавки основана на тепловом воздействии на материал лазерным излучением. Из уравнения теплопроводности можно определить связь температуры материала $T(x, y, z, t)$ с плотностью мощности лазерного излучения q_0 . Это позволяет ввести понятие порогового значения плотности мощности излучения такого, при котором температура поверхности тела в центре облученной области к моменту окончания воздействия излучения τ достигает заданного значения [23].

При анализе полученных данных удобно использовать формулу, определяющую максимальную температуру тела при нагреве его лазерным излучением (на поверхности тела в центре облучаемой области в виде круга радиусом r_0 в момент окончания воздействия [23]):

$$T = \frac{2AP\sqrt{a\tau}}{\pi r_0^2 k} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) + T_0, \quad (1)$$

где A – коэффициент поглощения поверхности; P [Вт] – мощность излучения; r_0 [мм] – радиус пятна лазерного излучения на поверхности; τ – длительность воздействия: $\tau = \frac{2r_0}{V}$; a [m^2/c] –

температуропроводность материала; k [$\text{Вт}/(\text{m} \cdot \text{C}^\circ)$] – теплопроводность материала; T_0 [$^\circ\text{C}$] – начальная температура.

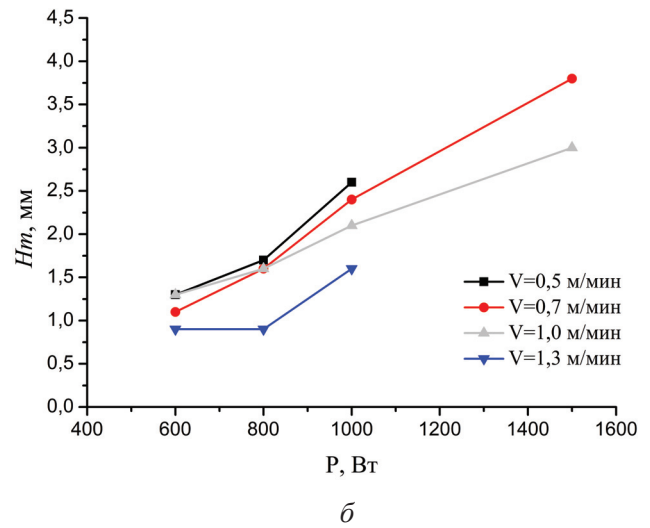
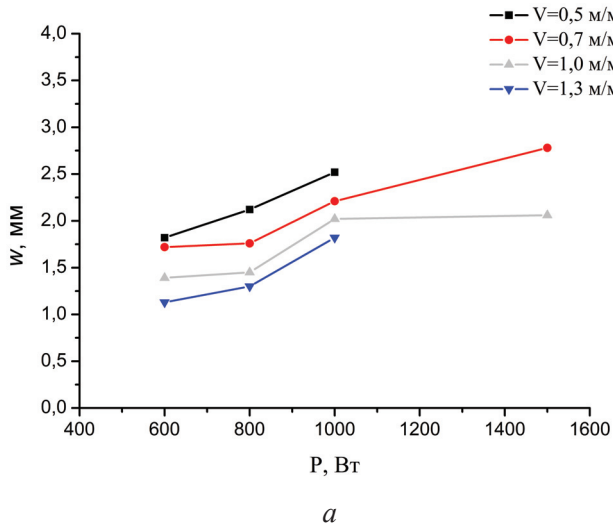


Рис. 5. Зависимость ширины трека w (а) и глубины проплава трека Hm (б) от мощности излучения P при режиме фокусировки $\Delta f = -3$ мм

Fig. 5. Track width w (a) and penetration depth Hm (б) versus the radiation power P the focusing mode $\Delta f = -3$ mm

При слабом влиянии теплопроводности $\frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} > 1$ функцией $ierfc \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}}$ можно пренебречь, и для температуры получим

$$T = \frac{PA \sqrt{a} \sqrt{2r_0}}{\pi r_0^2 \sqrt{V}} + T_0 \quad (2)$$

Так как в экспериментах большинство параметров оставались неизменными (кроме мощности лазерного излучения и скорости сканирования), то уравнение можно записать в следующем виде:

$$T = \frac{P}{\sqrt{V}} \text{const} + \text{const} \quad (3)$$

Таким образом, особый интерес представляет обобщение полученных данных от комбинационного параметра P/\sqrt{V} .

На рис. 6 и 7 проведено обобщение экспериментальных данных, которые представлены на рис. 5, в зависимости от параметра P/\sqrt{V} , определяемого экспериментально контролируруемыми величинами.

Из рис. 6 и 7 видно, что при использовании в качестве независимой переменной параметра P/\sqrt{V} все данные ширины треков w и глубины проплава Hm можно описать едиными зависимостями. При аппроксимации эксперименталь-

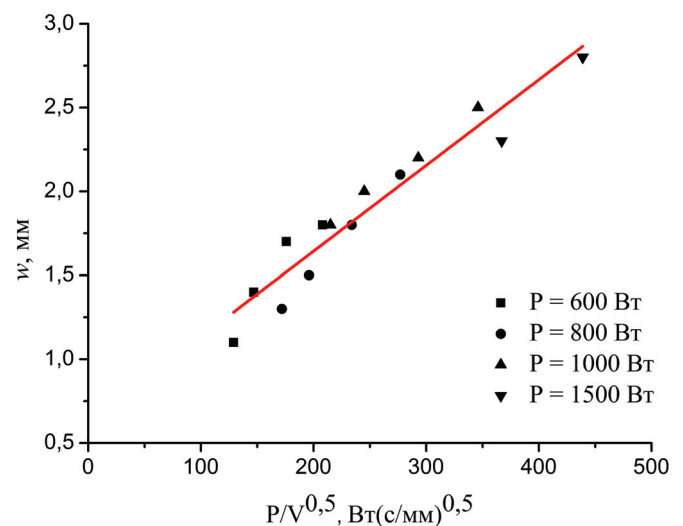


Рис. 6. График ширины трека w от P/\sqrt{V}

Fig. 6. Graph of the track width w vs P/\sqrt{V}

ных точек наблюдается линейная зависимость, которую можно записать в виде

$$w = 0,620 + 0,005(P/\sqrt{V}), \quad (4)$$

$$Hm = -0,368 + 0,009(P/\sqrt{V}). \quad (5)$$

Рассмотрим микроструктуру наплавленных треков при разных положениях фокуса. На рис. 8 представлены шлифы поперечных сечений наплавленных дорожек при разных положениях фокуса при постоянной скорости

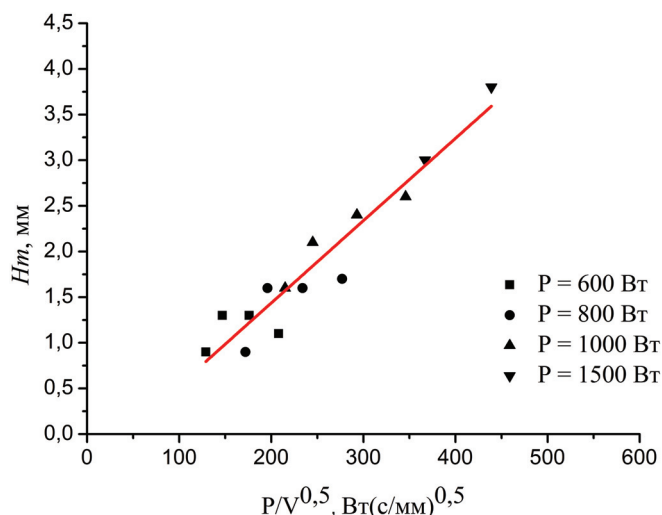


Рис. 7. График глубины проплава трека Hm от P/\sqrt{V}
 Fig. 7. Graph of the track penetration depth Hm vs P/\sqrt{V}

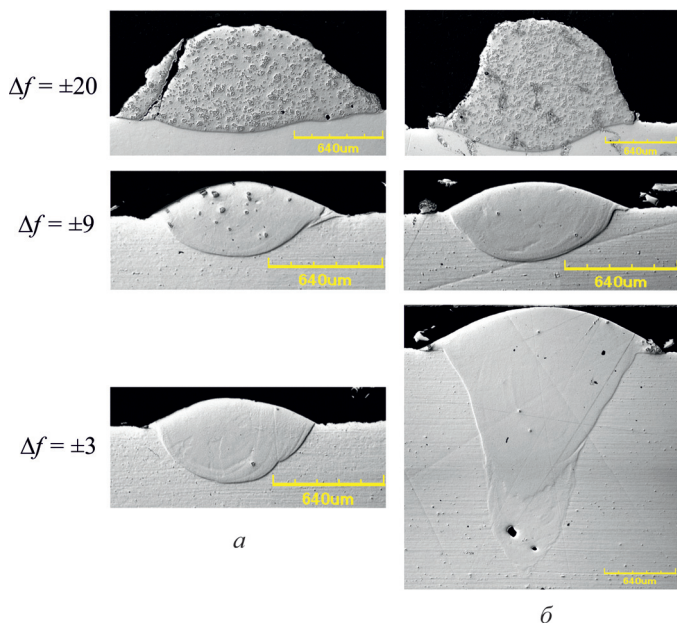


Рис. 8. Фотографии поперечных шлифов единичных треков при переменном положении фокуса Δf ($V = 0,7$ м/мин, $P = 1000$ Вт):

a – перетяжка пучка располагается выше поверхности слоя $\Delta f > 0$; b – перетяжка пучка располагается ниже поверхности слоя $\Delta f < 0$)

Fig. 8. Photos of the sections of unit tracks at the variable focus positions Δf ($V = 0,7$ м/мин, $P = 1,000$ W):

a – the beam waist is above the layer surface $\Delta f > 0$; b – the beam waist is below the layer surface $\Delta f < 0$)

сканирования 0,7 м/мин и мощности лазерного излучения 1000 Вт.

На рис. 8 показано, что для случая расфокусированного пучка ($\Delta f = \pm 20, \pm 15$ мм) в матери-

але трека содержится больше нерасплавленных частиц карбида вольфрама по сравнению с режимом, когда на порошок воздействуем сфокусированным пучком. Можно предположить, что частицы карбида вольфрама растворяются в металлической связке при воздействии излучением с высокой плотностью мощности (с высокой интенсивностью излучения).

Определим микротвердость наплавленных металлокерамических треков. Введем параметр – коэффициент перемешивания D :

$$D = \frac{F_{\text{п}}}{F_{\text{н}} + F_{\text{п}}}, \quad (6)$$

где $F_{\text{н}}$ – площадь наплава; $F_{\text{п}}$ – площадь проплава.

На рис. 9 представлены экспериментальные значения микротвердости от коэффициента перемешивания D . Из графика видно, что с уменьшением коэффициента перемешивания увеличивается микротвердость материала, так, при $D = 0,76$ число микротвердости равно всего 330 $HV0.1$, а при $D = 0,12$ достигает 830 $HV0.1$.

Экспериментальные значения представляют собой линейную зависимость и описываются уравнением

$$HV0.1 = 925,372 - 6,722D. \quad (7)$$

На рис. 10 представлена зависимость параметра микротвердости от режима фокусировки

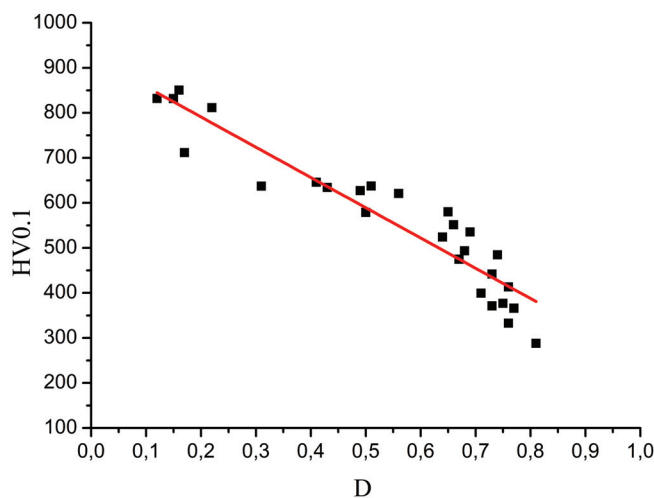


Рис. 9. Микротвердость единичных треков в зависимости от коэффициента перемешивания

Fig. 9. Microhardness of unit tracks versus the mixing coefficient

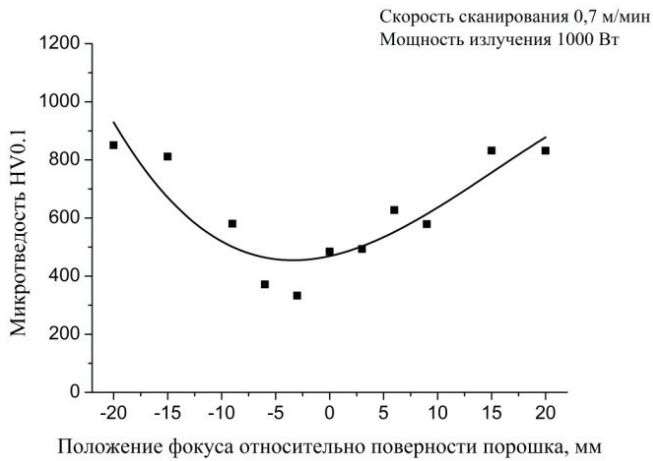


Рис. 10. Микротвердость единичных треков в зависимости от положения фокуса

Fig. 10. Microhardness of unit tracks versus the focus position

($-20 \text{ мм} < \Delta f < +20 \text{ мм}$). Видно, что минимальная микротвердость достигается при $\Delta f = -3 \text{ мм}$, а затем симметрично возрастает.

Выводы

Таким образом, проведено комплексное исследование влияния параметров лазерной наплавки на микроструктуру и микротвердость формируемых единичных металллокерамических треков. Установлено, что большое влияние на форму и механические характеристики оказывает режим фокусировки лазерного излучения относительно поверхности начального слоя порошковой смеси. Получено, что при использовании в качестве независимой переменной параметра P/\sqrt{V} , для режима кинжального проплавления ($\Delta f = -3 \text{ мм}$) ширины треков w и глубины проплава Hm можно описать едиными зависимостями. Получено, что наплавленная металллокерамическая структура обладает в 4...5 раза большим значением микротвердости 850,4 HV0.1 по сравнению с подложкой 178 HV0.1.

Список литературы

1. 4D printing of high performance shape memory polymer using stereolithography / Y.C. Choong, S. Maleksaedi, H. Eng, J. Wei, P. Su // *Materials & Design*. – 2017. – N 126. – P. 219–225. – doi: 10.1016/j.matdes.2017.04.049.
2. Gan M., Wong C. Properties of selective laser melted spodumene glass-ceramic // *Journal of the Euro-*

pean Ceramic Society. – 2017. – Vol. 37 (13). – P. 4147–4154. – doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.04.060.

3. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms / D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe // *International Materials Reviews*. – 2012. – Vol. 57, iss. 3. – P. 133–164. – doi: 10.1179/1743280411Y.0000000014.

4. Lu Q., Wong C. Additive manufacturing process monitoring and control by non-destructive testing techniques: challenges and in-process monitoring // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2018. – Vol. 13, iss. 2. – P. 39–48. – doi: 10.1080/17452759.2017.1351201.

5. Tribological and corrosion properties of Al-12Si produced by selective laser melting / K. Prashanth, B. Debalina, Z. Wang, P. Gostin, A. Gebert, M. Calin, J. Eckert // *Journal of Materials Research*. – 2014. – Vol. 29, iss. 17. – P. 2044–2054. – doi: 10.1557/jmr.2014.133.

6. 316L stainless steel mechanical and tribological behavior – a comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting / F. Bartolomeu, M. Buciumeanu, E. Pinto, N. Alves, O. Carvalho, F.S. Silva, G. Miranda // *Additive Manufacturing*. – 2017. – N 16. – P. 81–89. – doi: 10.1016/j.addma.2017.05.007.

7. Simultaneous enhancements of strength and toughness in an Al-12Si alloy synthesized using selective laser melting / J. Suryawanshi, K. Prashanth, S. Scudino, J. Eckert, O. Prakash, U. Ramamurty // *Acta Materialia*. – 2016. – N 7/5. – P. 285–294. – doi: 10.1016/j.actamat.2016.06.009.

8. Nickel A.H., Barnett D.M., Prinz F.B. Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing // *Materials Science and Engineering: A*. – 2001. – N 317 (1–2). – P. 59–64. – doi: 10.1016/S0921-5093(01)01179-0.

9. Controlling of residual stress in additive manufacturing of Ti6Al4V by finite element modeling / G. Vastola, G. Zhang, Q.X. Pei, Y.W. Zhang // *Additive Manufacturing*. – 2016. – N 12. – P. 231–239. – doi: 10.1016/j.addma.2016.05.010.

10. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V / L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs, J. Van Humbeeck, J.P. Kruth // *Acta Materialia*. – 2010. – Vol. 58. – P. 3303–3312. – doi: 10.1016/j.actamat.2010.02.004.

11. The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts / P. Hanzl, M. Zetek, T. Baksa, T. Kroupa // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 100. – P. 1405–1413. – doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.510.

12. Multiple material additive manufacturing – part 1: a review / M. Vaezi, S. Chianrabutra, B. Mellor, S. Yang // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2013. – Vol. 8. – P. 19–50. – doi: 10.1080/17452759.2013.778175.

13. Creation of heterogeneous materials on the basis of B₄C and Ni powders by the method of cold spraying with subsequent layer-by-layer laser treatment / V.M. Fomin, A.A. Golyshev, V.F. Kosarev, A.G. Malikov, A.M. Orishich, N.S. Ryashin, A.A. Filippov, V.S. Shikalov // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2017. – Vol. 58, iss. 5. – P. 947–955. – doi: 10.1134/S0021894417050224.

14. *Miracle D.B.* Metal matrix composites from science to technological significance // *Composites Science and Technology*. – 2005. – Vol. 65, N 15–16. – P. 2526–2540. – doi: 10.1016/j.compscitech.2005.05.027.

15. An experimental study of the wear performance of NiCrBSi thermal spray coatings / J. Rodriguez, A. Martin, R. Fernandez, J.E. Fernandez // *Wear*. – 2003. – N 255 (7–12). – P. 950–955. – doi: 10.1016/S0043-1648(03)00162-5.

16. Comparative examination of the microstructure and high temperature oxidation performance of NiCrBSi flame sprayed and pack cementation coatings / D. Chaliampalias, G. Vourlias, E. Pavlidou, S. Skolianos, K. Chrissafis, G. Stergioudis // *Applied Surface Science*. – 2009. – Vol. 255, iss. 6. – P. 3605–3612. – doi: 10.1016/j.apsusc.2008.10.006.

17. High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni composite coatings / C. Guo, J. Zhou, J. Chen, J. Zhao, Y. Yu, H. Zhou // *Wear*. – 2011. – Vol. 270, iss. 7–8. – P. 492–498. – doi: 10.1016/j.wear.2011.01.003.

18. Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi–WC coatings on stainless steel / M. Tobar, C. Alvarez, J. Amado, G. Rodriguez, A. Yanez //

Surface and Coatings Technology. – 2006. – N 200. – P. 6313–6317. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.11.093.

19. Dry reciprocating sliding friction and wear response of WC-Ni cemented carbides / K. Bonny, P. Baets, J. Vleugels, S. Huang, B. Lauwers // *Tribology Letters*. – 2008. – Vol. 31, iss. 3. – P. 199–209. – doi: 10.1007/s11249-008-9352-z.

20. Experimental investigation of the oxygen-assisted laser cutting of low-carbon steel by the fiber and CO₂ lasers at minimal roughness / A.M. Orishich, A.A. Golyshev, A.G. Malikov, V.B. Shulyat'ev // *Quantum Electronics*. – 2014. – Vol. 44, iss. 10. – P. 970–974. – doi: 10.1117/12.2037477.

21. Experimental comparison of laser energy losses in high-quality laser-oxygen cutting of low-carbon steel using radiation from fibre and CO₂ lasers / A.M. Orishich, A.A. Golyshev, A.G. Malikov, V.B. Shulyat'ev // *Quantum Electronics*. – 2015. – Vol. 45, iss. 9. – P. 873–878. – doi: 10.1070/QE2015v045n09ABEH015739.

22. High-quality laser cutting of stainless steel in inert gas atmosphere by ytterbium fibre and CO₂ lasers / A.M. Orishich, A.A. Golyshev, A.G. Malikov, V.B. Shulyat'ev // *Quantum Electronics*. – 2014. – Vol. 44, iss. 3. – P. 233–238. – doi: 10.1070/QE2014v-044n03ABEH015320.

23. Низкотемпературная плазма. Т. 18. Высокоэнергетические процессы обработки материалов / О.П. Солоненко, А.П. Алхимов, В.В. Марусин, Х.М. Рахимьянов, А.М. Оришич, Р.А. Салимов, В.Г. Щукин, В.Ф. Косарев; отв. ред. М.Ф. Жуков, В.М. Фомин. – Новосибирск: Наука, 2000. – 425 с. – ISBN 5-02-031528-1.

Конфликт интересов

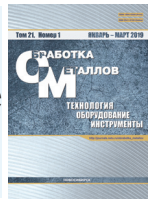
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Study of the Laser Radiation Focusing Modes Effect on Geometrical and Mechanical Properties of Metal-Ceramic Tracks

Alexander Golyshev^{1, 2, a, *}, Anatoly Orishich^{1, 2, b}

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

² Novosibirsk State University, 1 Pirogova street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-4243-0602>, alexgol@itam.nsc.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0551-0213>, laser@itam.nsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 23 November 2018

Revised: 18 January 2019

Accepted: 29 January 2019

Available online: 15 March 2019

Keywords:

Laser cladding

Optimization

Metal ceramics

Microhardness

Scaling laws

Tungsten carbide

Funding

A part of the work related to the adjustment of the cladding optimization technique, improvement of the technology of production of high-quality samples and searching for generalized parameters has been supported by the grant of the Russian Scientific Foundation "Investigation of multilayer laser formation of functional gradient cermet structures including B₄C, TiC and TiB₂, using pulsed-periodic laser radiation" № 18-79-00052.

ABSTRACT

Introduction. Additive technologies (AT) present the method to produce particles by means of layered build-up of materials with any geometry. This technology plays important role in the manufacture of functional articles or in the recovery of worn parts with high strength capacity. Metal-ceramic structures including tungsten carbide and nickel alloy are widely used in tribological practices to protect the components under high-intensity wear, such as cutting tools, drilling and mechanical processing, in mining industry. **The aim of the work** is to optimize the laser cladding of metal-ceramic single tracks to obtain a monolithic weld structure with maximum hardness. **The paper investigates** the effect of the laser radiation on geometrical and mechanical characteristics of the formed tracks using a powder mixture based on nickel alloys (NiCrBSi) 60 % by weight and tungsten carbide (WC) 40 % by weight. **Results and Discussion.** It is established that the shape and mechanical characteristics are strongly influenced by the mode of laser radiation focusing (the mode of keyhole penetration or the mode of thermal conductivity) relative to the surface of the initial layer of the powder mixture. It is also found that when the parameter p/\sqrt{v} is used as an independent variable, every factors of the track width w and penetration depth Hm can be described with consistent dependencies for the keyhole mode. It is demonstrated that in the clad track, in the thermal conductivity mode (the focusing mode $f = \pm 20$), one observes the uniform distribution of ceramic particles featuring the maximal value of microhardness. It is found that the clad metal-ceramic structure has 4-5 times higher value of microhardness (850.4 HV0.1) than the substrate (178 HV0.1).

For citation: Golyshev A.A., Orishich A.M. Study of the laser radiation focusing modes effect on geometrical and mechanical properties of metal-ceramic tracks. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 82–92. doi: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-82-92. (In Russian).

* Corresponding author

Golyshev Alexander A., Ph.D. (Physics and Mathematics), Researcher
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS,
4/1 Institutskaya str.,
630090, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: 8 923-252-00-12, e-mail: alexgol@itam.nsc.ru

References

1. Choong Y.C., Maleksaeedi S., Eng H., Wei J., Su P. 4D printing of high performance shape memory polymer using stereolithography. *Materials & Design*, 2017, no. 126, pp. 219–225. doi: 10.1016/j.matdes.2017.04.049.
2. Gan M., Wong C. Properties of selective laser melted spodumene glass-ceramic. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, vol. 37, iss. 13, pp. 4147–4154. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.04.060.
3. Gu D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*, 2012, vol. 57, iss. 3, pp. 133–164. doi: 10.1179/1743280411Y.0000000014.
4. Lu Q., Wong C. Additive manufacturing process monitoring and control by non-destructive testing techniques: challenges and in-process monitoring. *Virtual and Physical Prototyping*, 2018, vol. 13, iss. 2, pp. 39–48. doi: 10.1080/17452759.2017.1351201.
5. Prashanth K., Debalina B., Wang Z., Gostin P., Gebert A., Calin M. Eckert J. Tribological and corrosion properties of Al-12Si produced by selective laser melting. *Journal of Materials Research*, 2014, vol. 29, iss. 17, pp. 2044–2054. doi: 10.1557/jmr.2014.133.
6. Bartolomeu F., Buciumeanu M., Pinto E., Alves N., Carvalho O., Silva F.S., Miranda G. 316L stainless steel mechanical and tribological behavior – a comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting. *Additive Manufacturing*, 2017, no. 16, pp. 81–89. doi: 10.1016/j.addma.2017.05.007.
7. Suryawanshi J., Prashanth K., Scudino S., Eckert J., Prakash O., Ramamurty U. Simultaneous enhancements of strength and toughness in an Al-12Si alloy synthesized using selective laser melting. *Acta Materialia*, 2016, no. 7/5, pp. 285–294. doi: 10.1016/j.actamat.2016.06.009.
8. Nickel A.H., Barnett D.M., Prinz F.B. Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, no. 317 (1–2), pp. 59–64. doi: 10.1016/S0921-5093(01)01179-0.
9. Vastola G., Zhang G., Pei Q.X., Zhang Y.W. Controlling of residual stress in additive manufacturing of Ti6Al4V by finite element modeling. *Additive Manufacturing*, 2016, no. 12, pp. 231–239. doi: 10.1016/j.addma.2016.05.010.
10. Thijs L., Verhaeghe F., Craeghs T., Humbeek J. Van, Kruth J.P. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, pp. 3303–3312. doi: 10.1016/j.actamat.2010.02.004.
11. Hanzl P., Zetek M., Baksa T., Kroupa T. The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 100, pp. 1405–1413. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.510.
12. Vaezi M., Chianrabutra S., Mellor B., Yang S. Multiple material additive manufacturing – part 1: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 2013, vol. 8, pp. 19–50. doi: 10.1080/17452759.2013.778175.
13. Fomin V.M., Golyshev A.A., Kosarev V.F., Malikov A.G., Orishich A.M., Ryashin N.S., Filippov A.A., Shikalov V.S. Creation of heterogeneous materials on the basis of B4C and NI powders by the method of cold spraying with subsequent layer-by-layer laser treatment. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2017, vol. 58, iss. 5, pp. 947–955. doi: 10.1134/S0021894417050224.
14. Miracle D.B. Metal matrix composites from science to technological significance. *Composites Science and Technology*, 2005, vol. 65, no. 15–16, pp. 2526–2540. doi: 10.1016/j.compscitech.2005.05.027.
15. Rodriguez J., Martin A., Fernandez R., Fernandez J.E. An experimental study of the wear performance of NiCrBSi thermal spray coatings. *Wear*, 2003, no. 255 (7–12), pp. 950–955. doi: 10.1016/S0043-1648(03)00162-5.
16. Chaliampalias D., Vourlias G., Pavlidou E., Skolianos S., Chrissafis K., Stergioudis G. Comparative examination of the microstructure and high temperature oxidation performance of NiCrBSi flame sprayed and pack cementation coatings. *Applied Surface Science*, 2009, vol. 255, iss. 6, pp. 3605–3612. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.10.006.
17. Guo C., Zhou J., Chen J., Zhao J., Yu Y., Zhou H. High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni composite coatings. *Wear*, 2011, vol. 270, iss. 7–8, pp. 492–498. doi: 10.1016/j.wear.2011.01.003.
18. Tobar M., Alvarez C., Amado J., Rodriguez G., Yanez A. Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi–WC coatings on stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 2006, no. 200, pp. 6313–6317. doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.11.093.
19. Bonny K., Baets P., Vleugels J., Huang S., Lauwers B. Dry reciprocating sliding friction and wear response of WC-Ni cemented carbides. *Tribology Letters*, 2008, vol. 31, iss. 3, pp. 199–209. doi: 10.1007/s11249-008-9352-z.

20. Orishich A.M., Golyshev A.A., Malikov A.G., Shulyat'ev V.B. Experimental investigation of the oxygen-assisted laser cutting of low-carbon steel by the fiber and CO₂ lasers at minimal roughness. *Quantum Electronics*, 2014, vol. 44, iss. 10, pp. 970–974. doi: 10.1117/12.2037477.

21. Orishich A.M., Golyshev A.A., Malikov A.G., Shulyat'ev V.B. Experimental comparison of laser energy losses in high-quality laser-oxygen cutting of low-carbon steel using radiation from fibre and CO₂ lasers. *Quantum Electronics*, 2015, vol. 45, iss. 9, pp. 873–878. doi: 10.1070/QE2015v045n09ABEH015739.

22. Orishich A.M., Golyshev A.A., Malikov A.G., Shulyat'ev V.B. High-quality laser cutting of stainless steel in inert gas atmosphere by ytterbium fibre and CO₂ lasers. *Quantum Electronics*, 2014, vol. 44, iss. 3, pp. 233–238. doi: 10.1070/QE2014v044n03ABEH015320.

23. Solonenko O.P., Alkhimov A.P., Marusin V.V., Rakhimyanov Kh.M., Orishich A.M., Salimov R.A., Shchukin V.G., Kosarev V.F. *Nizkotemperaturnaya plazma. T. 18. Vysokoenergeticheskie protsessy obrabotki materialov* [Temperature plasma. Vol. 18. High-energy processes of material treatment]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 425 p. ISBN 5-02-031528-1.

Conflicts of Interest

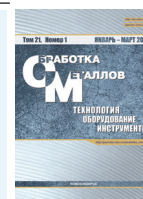
The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov




Исследование структурных факторов, обеспечивающих повышение механических свойств поверхностных слоев, модифицированных импульсным электронно-пучковым облучением





Игорь Коноваленко^{1, 2, a, *}, Евгений Шилько^{1, 3, b}, Владимир Овчаренко^{1, c}, Сергей Псахье^{1, d}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, г. Томск, 634050, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0001-9396-0219>,  igkon@ispms.tsc.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0002-8381-061X>,  shilko@ispms.ru,

^c  <http://orcid.org/0000-0003-1776-1212>,  ove45@mail.ru, ^d  <http://orcid.org/0000-0002-3447-0487>,  sp@ispms.tsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.422.5; 539.5; 539.3

История статьи:

Поступила: 09 ноября 2018

Рецензирование: 24 января 2019

Принята к печати: 29 января 2019

Доступно онлайн: 15 марта 2019

Ключевые слова:

Импульсное электронно-пучковое облучение

Наноструктурированные слои
Повышение механических свойств
TiC-NiCr

Численное моделирование
Метод подвижных клеточных автоматов

Финансирование

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Российской академии наук на 2013–2020 гг. (приоритетное направление III.23).

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время значительная часть режущих элементов обрабатывающего оборудования производится из композиционных материалов на основе металлической матрицы с дисперсными керамическими включениями. Как правило, такие композиты синтезируют методами порошковой металлургии из смеси порошков с характерным размером частиц от нескольких единиц микрометров до нескольких десятков микрометров. Известно, что механические свойства (прочность, твердость и вязкость разрушения) поверхностных слоев таких композиционных материалов, определяющие ресурс работы всего элемента, существенно уступают свойствам этих же материалов с характерными размерами армирующих керамических частиц десятки-сотни нанометров. Одним из успешных путей решения данной проблемы является модификация структуры поверхностных слоев уже готового композита с микроразмерными керамическими включениями методом высокоэнергетического импульсного электронно-пучкового облучения в плазме инертных газов. В предшествующих работах авторами показано, что такая обработка приводит к многократному измельчению структуры и ее качественному изменению – смене стохастической упаковки частиц на регулярную столбчатую с преимущественной ориентацией керамических элементов по нормали к поверхности. Изменение этих параметров внутренней структуры определяет существенное изменение комплекса механических свойств поверхностных слоев и требует детального параметрического изучения. **Целью работы** являлось численное исследование влияния ключевых структурных параметров модифицированного поверхностного слоя, а именно типа упаковки, размеров и неравносности керамических частиц, на его прочность и вязкость разрушения. **Результаты и обсуждение.** Проведенный численный анализ показал, что ключевыми факторами, определяющими повышение комплекса механических свойств модифицированных поверхностных слоев, являются упаковка и геометрия керамических включений. Многократное уменьшение размеров включений, изменение их формы от равноосной к существенно неравноосной и регулярная упаковка с преимущественной ориентацией включений по нормали к поверхности приводят к изменению характера распределения напряжений в условиях сжатия (от дисперсного к «каркасному»), усложнению траектории роста трещин и увеличению пути их распространения. Следствием этого является увеличение прочности, предела текучести и коэффициента деформационного упрочнения поверхностных слоев. Показано, что управлением степенью неравносности керамических включений в поверхностном слое можно добиться баланса таких конкурирующих характеристик, как прочность и вязкость разрушения.

Для цитирования: Исследование структурных факторов, обеспечивающих повышение механических свойств поверхностных слоев, модифицированных импульсным электронно-пучковым облучением / И.С. Коноваленко, Е.В. Шилько, В.Е. Овчаренко, С.Г. Псахье // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 93–107. – doi:10.17212/1994-6309-2019-21.1-93-107.

*Адрес для переписки

Коноваленко Игорь Сергеевич, канд. физ.-мат. наук,
 Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
 пр. Академический, 2/4,
 634055, г. Томск, Россия,
 Тел.: 8 (3822) 286-975, e-mail: igkon@ispms.tsc.ru

Введение

В настоящее время режущие элементы обрабатывающего оборудования изготавливаются из металлокерамических композиционных материалов, синтезируемых методами порошковой

металлургии [1]. Срок эксплуатации таких элементов зависит от многих факторов, основными из которых являются прочность, твердость и износостойкость их поверхностных слоев толщиной до двухсот микрометров. Существует несколько эффективных путей повышения этих характеристик. Наиболее распространенным из них является использование для синтеза композитов порошков с субмикронными и наноразмерными округлыми частицами с низким содержанием дефектов. Применение таких порошковых смесей позволяет получать объемные низкопористые композиты с высокими механическими характеристиками [2 и 3]. Однако ввиду низкой смачиваемости керамических наночастиц и их склонности к образованию кластеров создание объемных металло-матричных нанокомпозитов требует использования сложных и дорогостоящих технологий синтеза.

В то же время достижение высоких значений механических характеристик металлокерамических элементов (твердости, прочности и вязкости разрушения) существенно только для поверхностной области композита. Поэтому альтернативным подходом является изменение механических характеристик поверхностных слоев уже готовых композиционных образцов, получаемых из смеси достаточно крупных (микроразмерных) порошков с использованием традиционных технологий. Изменения механических свойств поверхностных слоев композиционных материалов можно достичь путем нанесения композиционных покрытий (в том числе наноструктурных), характеризующихся высокими значениями твердости и вязкости разрушения [4–13], или модификацией структуры поверхностных слоев [14–19].

При всех своих достоинствах метод создания покрытий имеет существенный недостаток, а именно образует «скачок» теплофизических и механических свойств на границе между покрытием и подложкой, что вызывает концентрацию напряжений на интерфейсе и отслаивание покрытия. Указанные проблемы не присущи методам упрочнения поверхностных слоев металлокерамик с микроразмерными керамическими включениями посредством обработки их концентрированными потоками энергии, например методу высокоэнергетического импульсного электронно-пучкового облучения в плазмах

инертных газов [20]. Такое высокоэнергетическое воздействие обеспечивает высокоскоростной нагрев и охлаждение поверхностных слоев (толщиной до 50 мкм) и приводит к многократному измельчению структуры и формированию вторичных керамических фаз субмикроскопического и наноскопического масштаба (наноструктурированию) [21–23]. Ключевой особенностью такой обработки является формирование в поверхностных слоях регулярной ориентированной упаковки столбчатых упрочняющих частиц [20].

Результаты экспериментальных исследований показывают, что особенности структуры и механических свойств поверхностных слоев композита существенно зависят от характеристик высокоэнергетического облучения и выбора плазмообразующего инертного газа. Управляя этими параметрами, можно варьировать такие характеристики поверхностных слоев, как, например, размеры упрочняющих керамических включений, их пространственная «упаковка», прочность и износостойкость, в широких пределах [20]. Для создания поверхностных слоев с определенными значениями механических, трибологических и структурных характеристик необходимо понимание характера зависимости механических свойств от каждого из ключевых параметров структуры в отдельности и в сочетании с другими параметрами [24–28]. Определение зависимостей такого рода экспериментальными методами чрезвычайно затруднительно. Поэтому настоящая работа посвящена численному изучению роли ключевых факторов, обеспечивающих направленное увеличение механических свойств модифицированных электронно-пучковым облучением поверхностных слоев металлокерамик.

Методика исследований

Численное моделирование проводилось на основе метода подвижных клеточных автоматов (*MCA*), подробное математическое описание формализма которого приведено в работах [29 и 30]. Метод *MCA* относится к классу вычислительных методов дискретных элементов [31 и 32]. В настоящей работе механический отклик подвижных клеточных автоматов, моделирующих керамические включения и связующее,

описывался на основе использования обобщенного закона Гука для изотропных материалов и ассоциированного закона пластического течения с критерием Мизеса (последний использовался только для металлической матрицы).

Для моделируемого металлокерамического композиционного материала использовались величины упругих модулей для карбида титана и никрома и характеристики кривой упрочнения для NiCr, определенные в работах [33 и 34]. В частности, модуль Юнга и коэффициент Пуассона для NiCr составляли $E = 217$ ГПа и $\nu = 0,3$, для TiC значения этих параметров равны $E = 440$ ГПа и $\nu = 0,19$. Керамические включения полагались упруго-хрупкими. Никельхромовое связующее моделировалось как упругопластический материал.

Разрушение компонентов модельного металлокерамического композита описывалось с использованием двухпараметрического критерия Друккера-Прагера [35], широко применяемого для описания разрушения материалов, величина сдвиговой прочности которых существенно зависит от локального давления. В настоящей работе в качестве параметров этого критерия использовались значения прочности материала в условиях одноосного сжатия (σ_c) и растяжения (σ_t). Для NiCr использовались следующие значения этих параметров: $\sigma_c^{\text{NiCr}} = \sigma_t^{\text{NiCr}} =$

$= 1000$ МПа (критерий разрушения Мизеса), для TiC: $\sigma_c^{\text{TiC}} = 2200$ МПа, $\sigma_t^{\text{TiC}} = 550$ МПа. Детальное описание численной реализации указанных моделей пластичности и прочности в рамках метода MSA приведено в работах [29 и 30].

Межфазные границы описывались с использованием модели «бесконечно тонкой» межфазной границы [36]. В работе использована реализация непотенциальной модели Жубеля–Бейлора [37 и 38]. Для границ раздела частиц TiC и связующего NiCr использовались параметры критерия прочности, отвечающие NiCr.

Численное исследование механического поведения поверхностных слоев композита NiCr–TiC в основном и модифицированном состоянии осуществлялось на основе моделирования деформирования и разрушения двумерных представительных объемов микроскопического масштаба в условиях одноосного сжатия. Построение компьютерных моделей микромасштабных представительных объемов поверхностных слоев металлокерамического композита в исходном состоянии и после высокоэнергетической обработки осуществлялось на основе специально разработанного стохастического алгоритма. Пример микроструктуры реального композита (TiC – 50 % объемных) в исходном состоянии и соответствующая ей микромасштабная модель композита представлены на рис. 1.

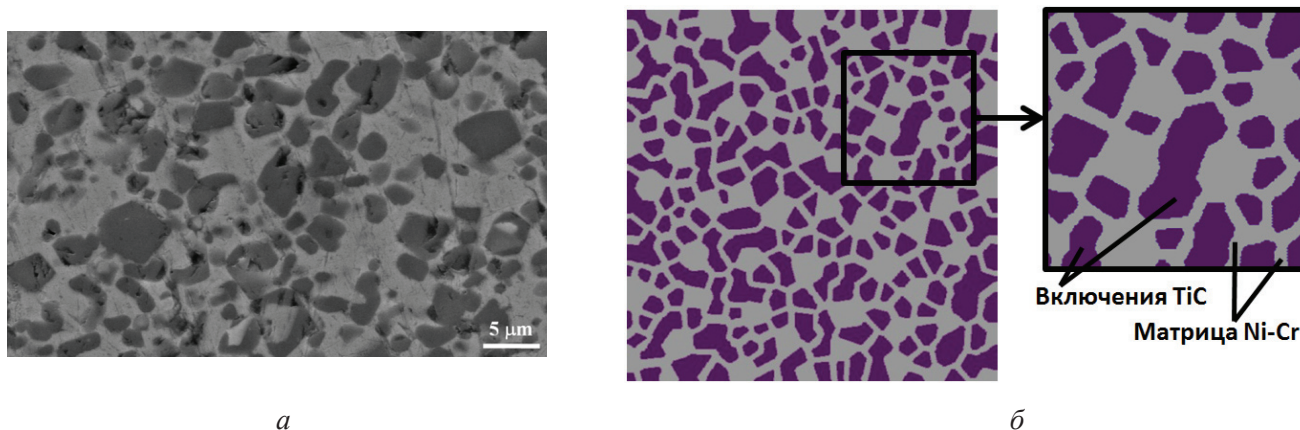


Рис. 1. Типичная микроструктура дисперсно-упрочненного металлокерамического композита: матрица – сплав NiCr, упрочняющие частицы – TiC. Исходная структура композиционного материала TiC–NiCr (а) и фрагмент компьютерной модели типичного представительного микрообъема (б). Здесь и далее фиолетовым цветом окрашены модельные включения TiC, серым – матрица NiCr

Fig. 1. Typical microstructure of a metal-ceramic composite based on a nickel-chromium alloy reinforced with dispersed particles of titanium carbide in the initial state (a) and a fragment of a computer model of a typical representative microvolume of the composite (b). Hereinafter, TiC inclusions are colored in violet, NiCr matrix is gray

Средние значения размера включений и расстояния между ними составляют соответственно 3,3 и 0,7 мкм, верхняя граница линейных размеров включений – 9 мкм. Модельный образец имеет размеры 50×50 мкм, размер клеточного автомата составляет 0,1 мкм. Специальные расчеты показали, что уменьшение величины шага пространственной дискретизации образца (размера автомата) в сравнении с приведенным значением не приводит к существенному изменению характеристик механического отклика и разрушения.

Для выявления влияния геометрических характеристик керамического компонента (размеров керамических включений, их неравноосности и типа упаковки) на механическое поведение модифицированных поверхностных слоев композита (в том числе на прочность и вязкость разрушения) в работе проведено компьютерное изучение деформации и разрушения поверхностных слоев в условиях сжатия. Построены представительные 2D-микрообъемы модифицированных поверхностных слоев металлокерамического композита

TiC–NiCr, характеризующиеся ориентированной (столбчатой) структурой неравноосных субмикронных керамических включений и концентрацией карбида титана 50 % об. (их примеры приведены на рис. 2). Размер модельных образцов составлял 11×11 мкм, размер клеточного автомата – 0,025 мкм. Отметим, что размер автоматов, используемых для создания компьютерной модели модифицированных поверхностных слоев, в четыре раза меньше размера автоматов в модели исходной микроструктуры композита. Такое различие величины шага пространственной дискретизации обусловлено кратным уменьшением линейных размеров ключевых элементов структуры поверхностного слоя композита (керамических включений и прослоек металлического связующего) в результате его высокоэнергетической обработки. Специальные расчеты, проведенные для модельных образцов модифицированных поверхностных слоев композита, показали, что дальнейшее уменьшение размера автомата не приводит к существенному изменению механического поведения образцов.

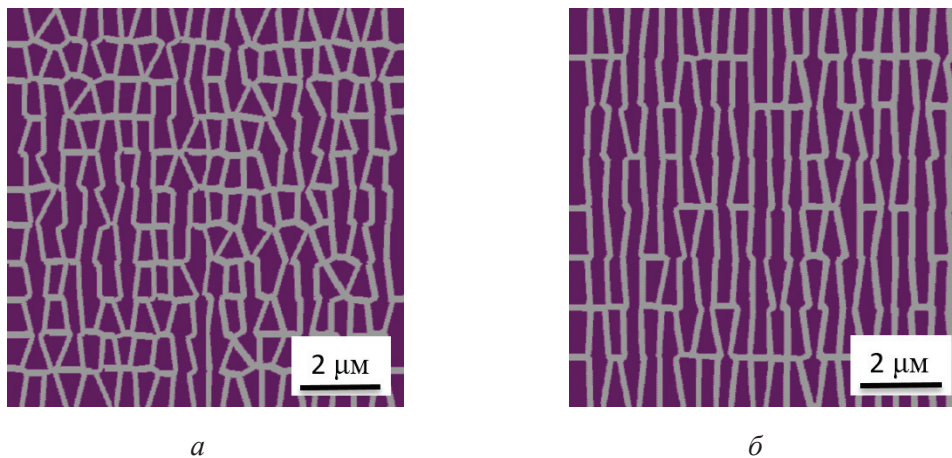


Рис. 2. Типичные представительные 2D-модельные микрообъемы модифицированного поверхностного слоя металлокерамического композита TiC–NiCr. Образцы характеризуются различными значениями высоты включений (при одинаковом среднем размере основания 0,42 мкм):

a – среднее значение высоты включений 1,46 мкм, соотношение средних размеров основания и высоты 1/3,5; *б* – среднее значение высоты включений 3 мкм, соотношение средних размеров основания и высоты $\sim 1/7$

Fig. 2. Typical examples of representative 2D-model microvolumes of a modified surface layer of a TiC–NiCr metal-ceramic composite. Samples are characterized by different values of the height of inclusions (with the same average base size of 0.42 μm):

a – the average value of the height of inclusions is 1.46 μm , the ratio of average sizes of the base and height is 1/3.5; *b* – the average value of the height of inclusions is 3 μm , the ratio of the average sizes of the base and height is $\sim 1/7$

Исследование механических характеристик представительных объемов осуществлялось путем моделирования одноосного сжатия с постоянной малой скоростью. Сжатие осуществлялось в направлении длинной оси неравноосных включений. Торцевые поверхности сжимаемых образцов были закреплены.

Сравнительный анализ особенностей механического отклика представительных микрообъемов исходных и модифицированных поверхностных слоев композита в условиях одноосного сжатия осуществлялся с использованием следующих механических характеристик.

1. Удельное значение силы сопротивления сжатию, отвечающее началу стадии необратимого деформирования образца. Данная характеристика также именуется пределом упругости σ_y . Величина σ_y определяется из диаграммы одноосного нагружения как напряжение, при котором величина необратимой деформации образца достигает величины $2 \cdot 10^{-4}$.

2. Максимальное значение удельной силы сопротивления образца сжатию, которое интерпретируется как прочность на сжатие σ_c .

3. Удельное (в расчете на единицу объема материала) значение работы механического нагружения A_{fr} , затраченной на разрушение образца. Рассчитывается как площадь под диаграммой сжатия образца от начала нагружения до деформации, при которой образец фрагментируется магистральной трещиной. Данная характеристика далее условно именуется работой разрушения.

4. Удельное (в расчете на единицу объема материала) значение работы механического нагружения A_{crack} , затраченной на формирование магистральной трещины в образце путем объединения внутренних микротрещин, размеры которых сопоставимы с размерами керамических включений. Рассчитывается как площадь под участком диаграммы сжатия образца от деформации, отвечающей максимуму сопротивления (σ_c) до деформации, соответствующей фрагментации образца. Параметр A_{crack} характеризует вязкость разрушения материала на мезомасштабном уровне.

Результаты и их обсуждение

Влияние упаковки и соотношения размеров керамических включений

На основе экспериментальных исследований [22] показано, что поверхностные слои композита с ориентированной упаковкой субмикронных неравноосных керамических включений обладают более высокими значениями микротвердости и прочности в сравнении с поверхностными слоями в исходном состоянии. Результаты моделирования показали, что это является следствием изменения характера распределения объемных и сдвиговых напряжений в поверхностном слое при изменении типа упаковки включений TiC и соотношения их линейных размеров.

В качестве иллюстрации на рис. 3 приведены примеры распределения средних напряжений

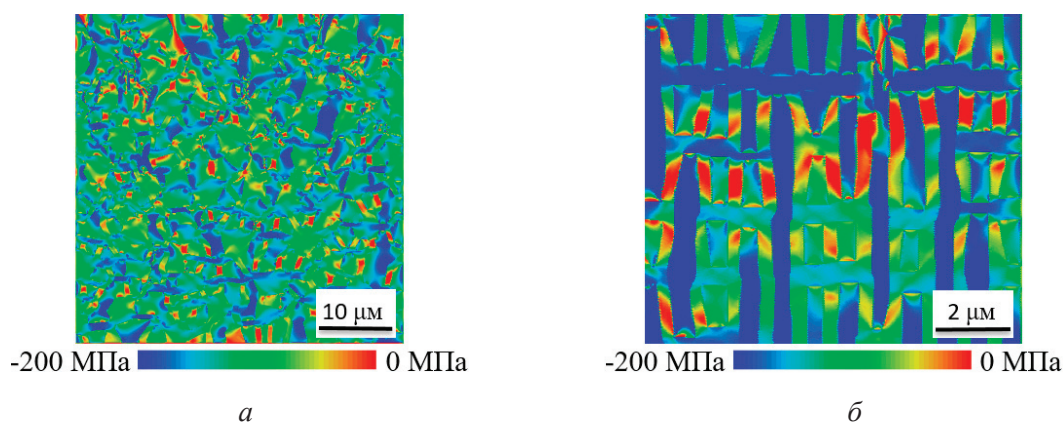


Рис. 3. Типичные распределения среднего напряжения в представительных объемах поверхностных слоев металлокерамического композита в исходном (а) и модифицированном (б) состоянии

Fig. 3. Typical distributions of the mean stress in representative volumes of the surface layers of the metal-ceramic composite in the initial (a) and modified (b) states

в представительных объемах поверхностного слоя композита в исходном состоянии (с микро-размерными равноосными включениями TiC) и с модифицированной структурой (соотношение средних размеров основания и высоты в образце составляло 1/7) в условиях одноосного сжатия. Можно видеть, что в исходном композите распределение объемных напряжений носит дисперсный характер [39]: несущей основой материала является матрица пластичного металлического связующего, а включения выступают в качестве локальных концентраторов сжимающих объемных напряжений (рис. 3, а). Характерные значения средних сжимающих напряжений приблизительно вдвое выше, чем в связующем. В то же время распределение средних напряжений в объеме модифицированных поверхностных слоев имеет качественно отличный характер (рис. 3, б). Оно является регулярным, и несущим компонентом композита здесь выступают неравноосные включения. Наиболее длинные включения являются «несущими опорами конструкции» и испытывают максимальные сжимающие напряжения, в то время как характерные значения сжимающих объемных напряжений в расположенных между ними «коротких» (не несущих) включениях в несколько раз меньше.

Аналогичным является и изменение характера распределения эквивалентного напряжения в поверхностном слое при изменении геометрии и упаковки керамических включений (рис. 4). На

рис. 4, а показано, что в образце, характеризующемся исходными параметрами керамического компонента (угловатые приблизительно равноосные включения, случайно распределенные в объеме композита), включения являются локальными концентраторами сдвиговых напряжений (характерное значение эквивалентного напряжения во включениях примерно в 1,5 раза выше, чем в металлической матрице). В образце с модифицированной структурой распределение эквивалентного напряжения имеет регулярный каркасный характер (рис. 4, б). Типичная величина напряжений в наиболее вытянутых включениях («опорах конструкции») превышает величину напряжений в более коротких («не несущих») включениях до 1,5 раз и не менее чем в два раза превышает характерную величину напряжений в матрице.

Сравнение распределений сдвиговых и объемных напряжений в модельных образцах с исходной и модифицированной структурой (см. рис. 3 и 4) показывает, что близкие по величине значения напряжений в керамических включениях этих двух систем достигаются при почти вдвое различающихся осевых деформациях (в модифицированном образце при $\epsilon = 0,35\%$, в то время как в исходном образце при $\epsilon = 0,6\%$). Другими словами, скорости роста сдвиговых и объемных напряжений в керамических включениях модифицированного поверхностного слоя в процессе нагружения почти вдвое выше, чем

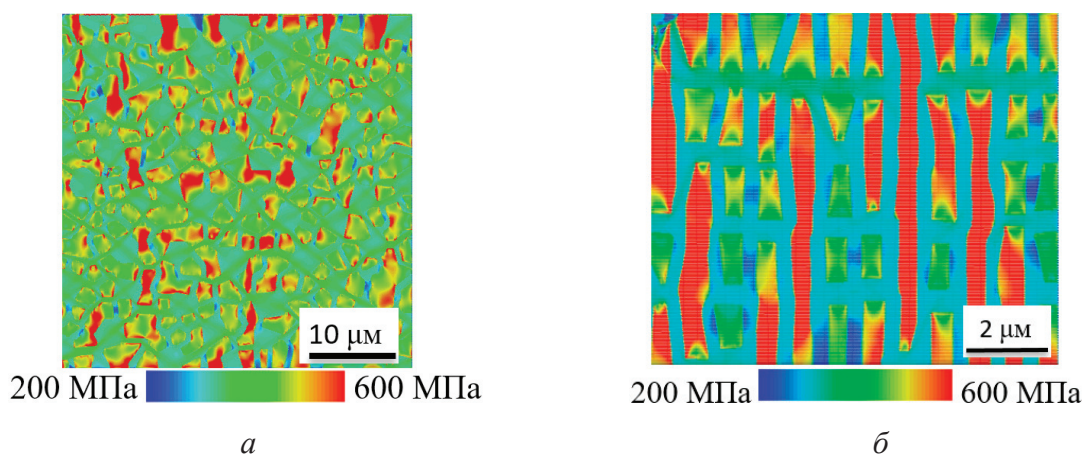


Рис. 4. Типичные распределения эквивалентного напряжения в представительных объемах поверхностных слоев металлокерамического композита в исходном (а) и модифицированном (б) состоянии

Fig. 4. Typical distributions of equivalent stress in representative volumes of the surface layers of the metal-ceramic composite in the initial (a) and modified (b) states

во включениях поверхностного слоя в исходном состоянии. В то же время анализ результатов моделирования показывает, что характерные значения эквивалентного напряжения в объеме связующего возрастают приблизительно с одинаковой скоростью по мере нагружения. Более высокая концентрация сдвиговых и объемных напряжений в объеме хрупких включений в модифицированных поверхностных слоях композита, очевидно, должна приводить к повышению как предела текучести образца (вследствие достижения более высоких интегральных напряжений к началу неупругого деформирования связующего), так и его прочности. Последнее определяется тем, что сдвиговая прочность карбида титана зависит от величины среднего напряжения и возрастает с увеличением среднего напряжения. Быстрое увеличение среднего сжимающего напряжения в регулярно упакованных неравноосных керамических включениях в процессе нагружения способствуют повышению прочности образца в условиях одноосного сжатия.

Отметим также, что поскольку твердые и хрупкие включения TiC являются концентраторами сдвиговых напряжений, при нагружении они становятся предпочтительными областями формирования микроповреждений и микротрещин сдвигового типа (эти несплошности инициируются главным образом на межфазных границах в вершинах угловатых включений). Быстрый рост сдвиговых напряжений в наиболее протяженных включениях в процессе нагружения образцов с модифицированной металлокерамической структурой способствует возникновению таких несплошностей при меньших значениях приложенной деформации (в сравнении с композитом в исходном состоянии). Таким образом, переход к регулярной «черепичной» упаковке неравноосных керамических включений может сопровождаться «охрупчиванием» механического отклика композита.

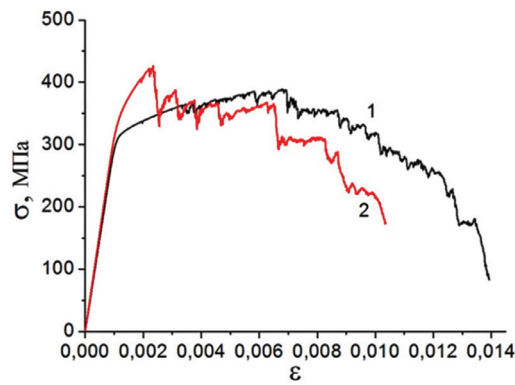
Выводы, полученные на основании анализа распределения напряжений, подтверждаются результатами анализа диаграмм одноосного сжатия рассмотренных выше представительных объемов поверхностных слоев композита в исходном и модифицированном состоянии (рис. 5, а).

Анализ показал, что изменение соотношения линейных размеров и переход к регулярной «черепичной» упаковке включений приводит

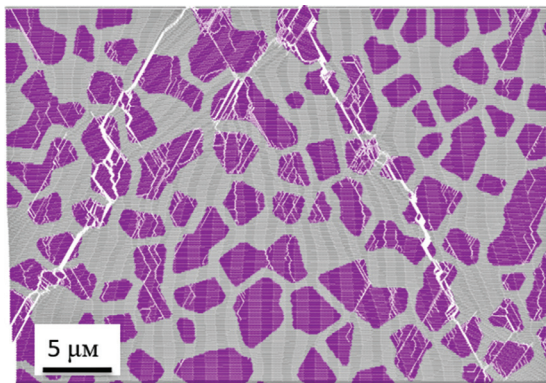
к увеличению пределов упругости и прочности образцов приблизительно на 15 %. Величина коэффициента деформационного упрочнения выросла в пять раз, однако протяженность участка деформационного упрочнения (до достижения максимального сопротивления нагружению) сокращается в несколько раз. При этом, если стадия разупрочнения образца с исходной структурой (после достижения максимального сопротивления) соответствует квазивязкому характеру разрушения, то стадия разупрочнения образца с модифицированной структурой есть набор актов локального хрупкого разрушения, реализующегося на масштабном уровне, сопоставимом с размером образца. Описанные особенности диаграмм нагружения связаны с различной внутренней структурой рассматриваемых поверхностных слоев композита, которая также обуславливает и разницу в особенностях процесса их разрушения.

В образце с исходной структурой на стадии упрочнения происходит постепенное формирование повреждений на межфазных границах и микротрещин на участках межфазных границ и в керамических включениях. Это проявляется на диаграмме нагружения в форме малых по величине локальных «сбросов» напряжения на стадии деформационного упрочнения (кривая 1, на рис. 5, а). Процесс накопления несплошностей на этой стадии нагружения распределен во всем объеме образца. При этом в связи со значительной пластичностью NiCr матрицы, обеспечивающей ее высокие релаксационные и диссипативные характеристики, образующиеся микротрещины «стопорятся» на интерфейсах TiC–NiCr. Последующая стадия разупрочнения связана с постепенным объединением «соседних» микротрещин через прослойки связующего. На данной стадии происходит локализация разрушения в форме объединения повреждений в одной или нескольких узких зонах. При этом в других областях образца разрушение существенно замедляется или прекращается. Данная стадия заканчивается формированием магистральной трещины и потерей целостности образца (рис. 5, б).

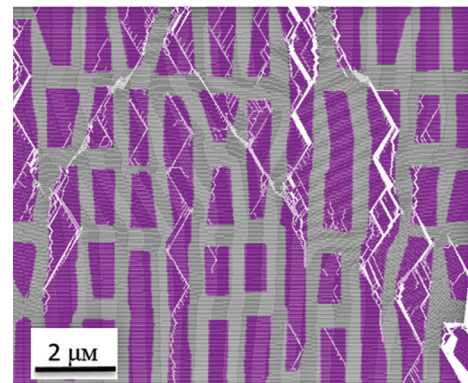
В образце с модифицированной структурой более высокая концентрация сдвиговых напряжений в наиболее протяженных («опорных») включениях приводит к зарождению поврежде-



а



б



в

Рис. 5. Диаграммы одноосного сжатия (а) и примеры разрушения представительных объемов с исходной (б) и модифицированной (в) структурой. Кривая 1 соответствует образцу со структурой (б), кривая 2 – образец со структурой (в)

Fig. 5. Diagrams of uniaxial compression (а) and examples of fracture of the representative volumes with original (б) and modified (в) structure. Curve 1 corresponds to the sample with original structure б, curve 2 shows the loading diagram of the sample with modified structure в

ний на боковых межфазных границах этих включений уже при достаточно малых приложенных деформациях. Эти повреждения быстро растут вдоль боковых межфазных границ и в объеме включений. Формирование относительно протяженных интерфейсных трещин, соосных оси нагружения, приводит к хорошо известному эффекту падения интегральной жесткости образца вследствие отслоения «несущих керамических опор» от остальной части материала или разрушения самой «опоры» [40]. Поэтому начало стадии деформационного разупрочнения композиционного материала с регулярно упакованными неравноосными керамическими включениями связано не с объединением микротрещин через прослойки связующего, а с началом «массового» формирования локальных трещин в наиболее протяженных столбчатых включениях. Этот этап разрушения проявляется на диаграмме нагруже-

ния в виде ступенчатого снижения силы сопротивления (кривая 2, рис. 5, а). Далее эти трещины постепенно объединяются через прослойки связующего в магистральную трещину (рис. 5, в).

Влияние соотношения размеров регулярно упакованных керамических включений

Для изучения влияния геометрических параметров керамических частиц на механические характеристики поверхностных слоев моделировалось одноосное сжатие представительных объемов с идентичным содержанием регулярно упакованных керамических включений, но с различными средними значениями высоты неравноосных включений и соотношениями длины основания к высоте.

Для иллюстрации влияния геометрических параметров включений на рис. 6 показаны

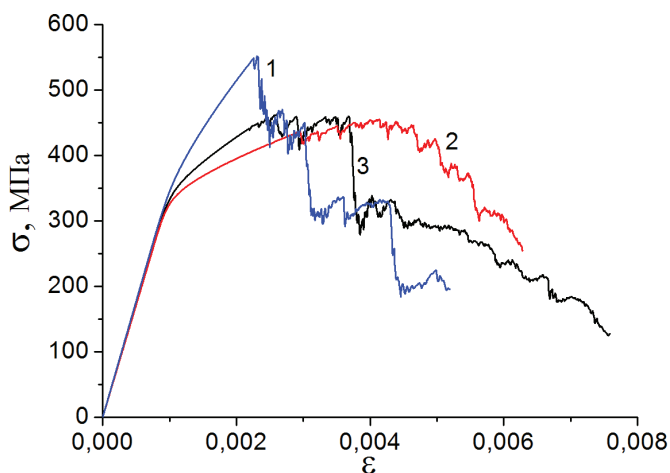


Рис. 6. Диаграммы одноосного сжатия модельных представительных микрообъемов модифицированного поверхностного слоя с различными геометрическими параметрами столбчатых керамических включений (средняя длина основания и высота включения, их соотношение):

1 – образец 1 (0,42 мкм, 3,11 мкм, 1/7); 2 – образец 2 (0,42 мкм, 1,46 мкм, 1/3,5); 3 – образец 3 (0,21 мкм, 0,65 мкм, 1/3)

Fig. 6. Diagrams of uniaxial compression of model representative microvolumes of a modified surface layer with different geometrical parameters of columnar ceramic inclusions (average base length and height of inclusion, their ratio):

1 – Sample 1 (0.42 mkm, 3.11 mkm, 1/7); 2 – Sample 2 (0.42 mkm, 1.46 mkm, 1/3.5); 3 – Sample 3 (0.21 mkm, 0.65 mkm, 1/3)

примеры диаграмм одноосного сжатия трех представительных микромасштабных образцов.

1. Образец 1, см. рис. 2, б (средняя длина основания 0,42 мкм, средняя высота столбчатого включения 3,11 мкм, среднее соотношение линейных размеров 1/7).

2. Образец 2, см. рис. 2, а (средняя длина основания 0,42 мкм, средняя высота столбчатого включения 1,46 мкм, среднее соотношение линейных размеров 1/3,5 – в два раза больше чем у образца 1).

3. Образец 3, характеризуется с уменьшенным вдвое средним значением длины основания керамических включений (0,21 мкм) и близким к образцу 2 средним соотношением линейных размеров (1/3).

Как можно видеть из рис. 6, двукратное уменьшение степени неравноосности включений в модифицированном поверхностном слое, обусловленное уменьшением их высоты (кривые 1 и 2), привело к снижению прочности на сжатие

на 20 % и более чем двукратному уменьшению коэффициента деформационного упрочнения. При этом протяженность стадии деформационного упрочнения увеличилась более чем вдвое.

Снижение высоты включений сопровождается: а) снижением концентрации напряжений во включениях (особенно в самых протяженных) и более равномерным перераспределением напряжений между включениями и пластичным связующим; б) уменьшением линейных размеров формирующихся локальных микротрещин. Снижение концентрации напряжений во включениях приводит к снижению максимальной величины удельной силы сопротивления (предела прочности) и коэффициента деформационного упрочнения. Уменьшение линейных размеров микротрещин способствует увеличению протяженности как интервала деформационного упрочнения, так и интервала разупрочнения (рис. 6). Количественно эти эффекты характеризуются возрастанием работы разрушения A_{fr} и энергии, необходимой для формирования магистральной трещины A_{crack} , не менее чем на 10 %.

Двукратное уменьшение характерных линейных размеров керамических включений при сохранении постоянного значения параметра их неравноосности (кривые 2 и 3, рис. 6) не привело к заметному изменению значений предела текучести и предела прочности образца. Наиболее значительные изменения интегрального механического отклика представительного объема связаны с уменьшением коэффициента деформационного упрочнения в 1,5 раза и увеличением работы разрушения A_{fr} на 30 % (по сравнению с образцом 2). Сравнительный анализ эволюции структуры образцов 2 и 3 в процессе нагружения показал, что это связано с изменением динамики разрушения. Так, уменьшение линейных размеров керамических включений в N раз (при неизменном значении параметра неравноосности) сопровождается увеличением количества включений на единицу площади в N^2 раз. В таком же соотношении возрастает и число пластичных прослоек NiCr, характеризующихся высокими диссипативными и релаксационными характеристиками. Поэтому динамика разрушения образца 3 существенно отличается от описанной выше для образцов 1 и 2. На стадии упрочнения происходит формирование системы коротких одиночных трещин на межфазных гра-

нищах и в объеме отдельных включений. Ввиду малой длины таких трещин и их равномерного распределения в объеме композита они не приводят к разупрочнению образца. Смена стадии интегрального деформационного упрочнения стадией разупрочнения обусловлена объединением локальных трещин в расположенных рядом частицах TiC посредством их распространения через прослойки матрицы NiCr. Локализация этого процесса приводит к формированию магистральной трещины. Указанная последовательность разрушения образцов демонстрирует качественное сходство с последовательностью разрушения представительных микрообъемов модельного металлокерамического материала в исходном состоянии.

Результаты моделирования позволили объяснить существование предпочтительного диапазона отношений линейных размеров (высоты к основанию) столбчатых включений TiC, в котором, как свидетельствуют экспериментальные данные [22], достигаются максимальные значения микротвердости, прочности и износостойкости модифицированных поверхностных слоев. Уменьшение величины отношения линейных размеров включений сопровождается сменой характера пространственного распределения сдвиговых напряжений в поверхностном слое. Так, при больших значениях этого отношения распределение сдвиговых напряжений можно охарактеризовать как «каркасное». В качестве несущего каркаса здесь выступают протяженные включения TiC, при этом концентрация напряжений в них возрастает по мере увеличения отношения высоты к основанию. Это определяет возрастание коэффициента деформационного упрочнения модифицированного поверхностного слоя, однако сопровождается снижением значения предельной деформации образцов, при которой формируется магистральная трещина. Отметим, что разрушение таких поверхностных слоев носит хрупкий характер. При малых значениях отношения высоты к основанию включений TiC возрастает работа разрушения модифицированного слоя, однако значительно снижается величина коэффициента деформационного упрочнения. Как свидетельствуют данные различных исследований, снижение деформационного упрочнения материалов сопровождается снижением его твердости [41,42], что является негативным фактором для рассматриваемого поверхностного слоя. Результаты модели-

рования показали, что переход от «каркасного» к дисперсному характеру распределения сдвиговых напряжений происходит при снижении величины отношения линейных размеров включений ниже трех. Это определяет нижнюю границу диапазона отношений линейных размеров столбчатых включений TiC, обеспечивающих повышение комплекса механических характеристик модифицированного поверхностного слоя. Верхняя граница этого диапазона определяется требованиями к оптимальному балансу этих характеристик.

Заключение

Результаты моделирования показали, что ключевыми факторами, которые определяют механические свойства наноструктурированных поверхностных слоев металлокерамических композитов, являются геометрические размеры, форма и упаковка керамических/упрочняющих включений. Создание столбчатой регулярной структуры на основе вторичных керамических частиц приводит к принципиальной смене распределения внутренних напряжений в поверхностных слоях от дисперсного к каркасному. Основными несущими элементами в этом случае является не матрица, а столбчатые включения. Концентрация напряжений и механические свойства поверхностных слоев зависят от степени неравноосности этих включений. Существует оптимум этого соотношения размеров, соответствующий балансу прочности и вязкости разрушения. Проведенный компьютерный анализ позволил выявить роль указанных факторов в повышении ключевых механических характеристик поверхностных слоев. Полученные результаты могут служить основой для прогнозирования механических свойств наноструктурированных поверхностных слоев металлокерамических композитов с заданной внутренней структурой, а также для проектирования внутренней структуры, обеспечивающей требуемые механические свойства (в том числе сочетание значений прочности и вязкости разрушения).

Список литературы

1. Mortensen A., Llorca J. Metal matrix composites // Annual Review of Materials Research. – 2010. – Vol. 40. – P. 243–270. – doi: 10.1146/annurev-matsci-070909-104511.

2. *Suryanarayana C., Al-Aqeeli N.* Mechanically alloyed nanocomposites // *Progress in Materials Science*. – 2013. – Vol. 58. – P. 383–502. – doi: 10.1016/j.pmatsci.2012.10.001.

3. *Casati R., Vedani M.* Metal matrix composites reinforced by nano-particles – a review // *Metals*. – 2014. – Vol. 4. – P. 65–83. – doi: 10.3390/met4010065.

4. *Frazier W.E.* Metal additive manufacturing: a review // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2014. – Vol. 23. – P. 1918–1928. – doi: 10.1007/s11665-014-0958-z.

5. *Kelbassa I., Wohlers T., Caffrey T.* Quo vadis, laser additive manufacturing? // *Journal of Laser Applications*. – 2012. – Vol. 24. – P. 050101/1–050101/10. – doi: 10.2351/1.4745081.

6. Nanocrystalline TiC reinforced Ti matrix bulk-form nanocomposites by Selective Laser Melting (SLM): densification, growth mechanism and wear behavior / D. Gu, Y.-C. Hagedorn, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe // *Composites Science and Technology*. – 2011. – Vol. 71. – P. 1612–1620. – doi: 10.1016/j.compscitech.2011.07.010.

7. Microstructure and tensile behavior of hybrid nano-micro SiC reinforced iron matrix composites produced by selective laser melting / B. Song, S. Dong, P. Coddet, Ch. Coddet // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2013. – Vol. 579. – P. 415–421. – doi: 10.1016/j.jallcom.2013.06.087.s.

8. *Singh H., Sidhu T.S., Kalsi S.B.S.* Cold spray technology: future of coating deposition processes // *Fracture and Structural Integrity*. – 2012. – Vol. 22. – P. 69–84. – doi: 10.3221/IGF-ESIS.22.08.

9. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives / A. Moridi, S.M. Hassani-Gangaraj, M. Guagliano, M. Dao // *Surface Engineering*. – 2014. – Vol. 36. – P. 369–395. – doi: 10.1179/1743294414Y.0000000270.

10. *Sobolev V.V., Guilemany J.M., Nutting J.* High velocity oxy-fuel spraying: theory, structure-property relationships and applications / consulting editor: S. Joshi. – David Brown Book Company, 2004. – 397 p. – ISBN 9781902653723.

11. Development of particle-reinforced nanostructured iron-based composite alloys for thermal spraying / T. Lampke, B. Wielage, H. Pokhmurska, C. Rupprecht, S. Schuberth, R. Drehmann, F. Schreiber // *Surface and Coating Technology*. – 2011. – Vol. 205. – P. 3671–3676. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.01.003.

12. *Sharma V., Pra-kash U., Kumar B.V.M.* Surface composites by friction stir processing: a review // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2015. – Vol. 224. – P. 117–134. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.04.019.

13. *Yuvaraj N., Aravindan S., Vipin S.* Fabrication of Al5083/B4C surface composite by friction stir processing and its tribological characterization // *Journal of Ma-*

terials research and technology. – 2015. – Vol. 4 (4). – P. 398–410. – doi: 10.1016/j.jmrt.2015.02.006.

14. Упрочнение поверхности и повышение износостойкости металлических материалов при обработке потоками высокотемпературной плазмы / Б.А. Калинин, В.Л. Якушин, В.И. Польский, П.С. Джумаев, К.К. Дмитриева, О.В. Емельянова, В.И. Аверин // *Физика и химия обработки материалов*. – 2010. – № 2. – С. 21–27.

15. Modification of the structural-phase of ferritic-martensitic steels by high-temperature pulsed plasma flows / V.L. Yakushin, A.T. Khein, P.S. Dzhumaev, M.G. Isaenkova, B.A. Kalin, M.V. Leont'eva-Smirnova, I.A. Naumenko, Yu.A. Perlovich, V.I. Pol'skii // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2013. – Vol. 4, iss. 5. – P. 376–384. – doi: 10.1134/S2075113313050195.

16. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов / К.К. Кадыржанов, Ф.Ф. Комаров, А.Д. Погребняк, В.С. Русаков, Т.Е. Туркебаев. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 634 с. – ISBN 5-211-05153-X.

17. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / под ред. Дж. Поута, Г. Фоти и Д. Джекобсона. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.

18. *Леонтьев П.А., Хан М.Г., Чекалова М.Т.* Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 142 с.

19. Наномодифицирование сварных соединений при лазерной сварке металлов и сплавов / А.М. Оришич, А.Н. Черепанов, В.Н. Шапеев, Н.Б. Пугачева. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. – 252 с. – ISBN 978-5-7692-1379-3.

20. *Ovcharenko V.E., Baohai Yu., Psahie S.G.* Electron-beam treatment of tungsten-free TiC/NiCr cermet. I: influence of subsurface layer microstructure on resistance to wear during cutting of metals // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2005. – Vol. 21, N 3. – P. 427–429.

21. Electron-beam Treatment of Tungsten-free TiC/NiCr cermet II: structural transformation in the subsurface layer / Yu. Baohai, V.E. Ovcharenko, S.G. Psakhie, O.V. Lapshin // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2006. – Vol. 22, N 4. – P. 511–513.

22. Modification of the structural-phase state of the surface layer of a cermet composite under electron beam irradiation in inert gas plasmas / V.E. Ovcharenko, K.V. Ivanov, Yu.F. Ivanov, A.A. Mokhovikov, Yu. Baohai // *Russian Physics Journal*. – 2017. – Vol. 59 (12). – P. 2114–2121. – doi: 10.1007/s11182-017-1022-x.

23. Формирование многомасштабной структуры в поверхностных слоях и стойкость металлокерамического сплава в условиях механических воздействий / С.Г. Псахье, В.Е. Овчаренко, А.Г. Князева, Е.В. Шилько // *Физическая мезомеханика*. – 2011. – Т. 14, № 6. – С. 23–34.

24. Nanostructured titanium-based materials for medical implants: modeling and development / L.Jr. Mishnaevsky, E. Levashov, R.Z. Valiev, J. Segurado, I. Sabirov, N. Enikeev, S. Prokoshkin, A.V. Solov'yov, A. Korotitskiy, E. Gutmanas, I. Gotman, E. Rabkin, S. Psakhie, L. Dluhoš, M. Seefeldt, A. Smolin // *Materials Science and Engineering R*. – 2014. – Vol. 81. – P. 1–19. – doi: 10.1016/j.mser.2014.04.002.
25. Laser clad ZrO_2 - Y_2O_3 ceramic/Ni-base alloy composite coatings / Y.T. Pei, J.H. Ouyang, T.C. Lei, Y. Zhou // *Ceramics International*. – 1995. – Vol. 21. – P. 131–136. – doi: 10.1016/0272-8842(95)95884-K.
26. Formation of c-axis-oriented columnar structures through controlled epitaxial growth of hydroxyapatite / W. Wang, Y. Oaki, Ch. Ohtsuki, T. Nakano, I. Hiroaki // *Journal of Asian Ceramic Societies*. – 2013. – Vol. 1. – P. 143–148. – doi: 10.1016/j.jascer.2013.03.009.
27. Increased resistance to mechanical shock of metallic materials by metal-ceramic surface coatings / C. Biniuc, B. Istrate, C. Munteanu, L. Dorin // *Key Engineering Materials*. – 2015. – Vol. 638. – P. 316–321. – doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.638.316.
28. *Chiang S.S., Marshall D.B., Evans A.G.* A simple method for adhesion measurements // *Surfaces and interfaces in ceramic and ceramic-metal systems* / ed. by J. Pask, A. Evans. – New York: Springer US, 1981. – P. 603–617. – (Materials science research; vol. 14).
29. Overcoming the limitations of distinct element method for multiscale modeling of materials with multimodal internal structure / E.V. Shilko, S.G. Psakhie, S. Schmauder, V.L. Popov, S.V. Astafurov, A.Yu. Smolin // *Computational Materials Science*. – 2015. – Vol. 102. – P. 267–285. – doi: 10.1016/j.commatsci.2015.02.026.
30. Modeling mechanical behaviors of composites with various ratios of matrix-inclusion properties using movable cellular automaton method / A.Yu. Smolin, E.V. Shilko, S.V. Astafurov, S.G. Psakhie // *Defence Technology*. – 2015. – Vol. 11. – P. 18–34. – doi: 10.1016/j.dt.2014.08.005.
31. *Potyondy D.O., Cundall P.A.* A bonded-particle model for rock // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2004. – Vol. 41. – P. 1329–1364. – doi: 10.1016/j.ijrmms.2004.09.011.
32. *Bicanic N.* Discrete element methods // *Encyclopedia of computational mechanics* / ed. by E. Stein, R. De Borst, T.J.R. Hughes. – 2nd ed. – John Wiley & Sons, Ltd, 2017. – P. 1–38. – doi: 10.1002/9781119176817.ecm2006.
33. *Petersen K.E.* Silicon as a mechanical material // *Proceedings of the IEEE*. – 1982. – Vol. 70, N 5. – P. 420–457.
34. *Dudova N., Kaibyshev R., Valitov V.* Short-range ordering and the abnormal mechanical properties of a Ni-20% Cr alloy // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2010. – Vol. 08 (6). – P. 625–633. – doi: 10.1134/S0031918X0912014X.
35. *Alejano L.R., Bobet A.* Drucker–Prager criterion // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2012. – Vol. 45 (6). – P. 995–999. – doi: 10.1007/s00603-012-0278-2.
36. *Park K., Paulino G.H.* Cohesive zone models: a critical review on traction-separation relationships across fracture surfaces // *Applied Mechanics Reviews*. – 2011. – Vol. 64. – P. 060802/1–060802/20. doi: 10.1115/1.4023110.
37. *Geubelle P.H., Baylor J.S.* Impact-induced delamination of composites: a 2D simulation // *Composites Part B: Engineering*. – 1998. – Vol. 29. – P. 589–602. – doi: 10.1016/S1359-8368(98)00013-4.
38. Influence of features of interphase boundaries on mechanical properties and fracture pattern in metal-ceramic composites / S. Psakhie, V. Ovcharenko, Yu. Baohai, A. Mokhovikov // *Journal of Materials Science and Technology*. – 2013. – Vol. 29. – P. 1025–1034. – doi: 10.1016/j.jmst.2013.08.002.
39. A numerical study of plastic strain localization and fracture in Al/SiC metal matrix composite / S.V. Smirnov, A.V. Kononov, M.V. Myasnikova, Yu.V. Khalevitsky, A.S. Smirnov, A.S. Igumnov // *Physical Mesomechanics*. – 2018. – Vol. 21 (4). – P. 305–313. – doi: 10.1134/S1029959918040045.
40. *Mishnaevsky L.* Nanostructured interfaces for enhancing mechanical properties of composites: computational micromechanical studies // *Composites Part B: Engineering*. – 2015. – Vol. 68. – P. 75–84. – doi: 10.1016/j.compositesb.2014.08.029.
41. *Shinohara K.* Relationship between work-hardening exponent and load dependence of Vickers hardness in copper // *Journal of Materials Science*. – 1993. – Vol. 28. – P. 5325–5329.
42. *Lan H., Venkatesh T.A.* On the relationships between hardness and the elastic and plastic properties of isotropic power-law hardening materials // *Philosophical Magazine*. – 2014. – Vol. 94, N 1. – P. 35–55. – doi: 10.1080/14786435.2013.839889.

Конфликт интересов

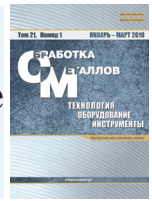
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov




Investigation of Structural Factors that Increase the Mechanical Properties of Surface Layers Modified by Pulsed Electro-Beam Irradiation





Igor Konovalenko^{1, 2, a, *}, Evgenii Shilko^{1, 3, b}, Vladimir Ovcharenko^{1, c}, Sergei Psakhie^{1, d}

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

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

³ National Research Tomsk State University, 36 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0001-9396-0219>,  igkon@ispms.tsc.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0002-8381-061X>,  shilko@ispms.ru,

^c  <http://orcid.org/0000-0003-1776-1212>,  ove45@mail.ru, ^d  <http://orcid.org/0000-0002-3447-0487>,  sp@ispms.tsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 09 November 2018

Revised: 24 January 2019

Accepted: 29 January 2019

Available online: 15 March 2019

Keywords:

Pulsed electron-beam irradiation

Nanostructured layers

Increased mechanical properties

TiC-NiCr

Numerical simulation

Movable cellular automata method

Funding

The investigation is carried out with funding from the Basic Research Program of Russian Academy of Sciences for 2013–2020 (priority direction III.23).

ABSTRACT

Introduction Currently, a significant part of the cutting elements of the processing equipment is made of composite materials based on a metal matrix with dispersed ceramic inclusions. As a rule, such compositions are synthesized by powder metallurgy methods from a mixture of powders with a characteristic particle size from a few micrometers to tens of micrometers. Durability of cutting element is determined by the mechanical properties (including strength, hardness and fracture toughness) of thin surface layers of the composite. It is known that mechanical properties of the surface layers of the composites with microscale reinforcing ceramic inclusions are significantly inferior to the properties of these same compositions with characteristic sizes of reinforcing ceramic particles of tens to hundreds of nanometers. One of the successful ways to solve this problem is to modify the structure of the surface layers of synthesized composite with microscopic ceramic inclusions by the method of high-energy pulsed electron-beam irradiation in inert gas plasma. In the previous papers, the authors have shown that such processing leads to qualitative change in the structure of the surface layers, namely, to multiple crushing of original stochastically packed ceramic inclusions, their dissolution and subsequent precipitation in the form of regularly packed columnar particles with the preferential orientation normal to the surface. The change in the parameters of the internal structure determines a significant change in the mechanical properties of the surface layers and requires detailed parametric study. **The aim of the work** was to numerically study the influence of the key structural parameters, namely, the type of packing, the size and non-equiaxiality of ceramic particles on strength and fracture toughness of the modified surface layers. **Results and discussion.** The performed numerical analysis has revealed the key factors that determine the increase in the mechanical and tribological properties of modified surface layers of metal-ceramic composites. These are the features of packing and geometrical characteristics of ceramic inclusions. We showed that multiple decrease in the size of inclusions together with a change in their shape from equiaxial to substantially non-equiaxial and regular packing of inclusions with a preferential orientation normal to the surface lead to change in the pattern of stress distribution under compression from dispersed to frame-like as well as to elongation and complication of crack paths. This results in increase in the values of strength, yield stress and strain hardening of the surface layers. We explained that by varying the degree of non-equiaxiality of ceramic inclusions it is possible to achieve a necessary balance of competing mechanical characteristics like strength and fracture toughness.

For citation: Konovalenko I.S., Shilko E.V., Ovcharenko V.E., Psakhie S.G. Investigation of structural factors that increase the mechanical properties of surface layers modified by pulsed electro-beam irradiation. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 93–107. doi:10.17212/1994-6309-2019-21.1-93-107. (In Russian).

References

1. Mortensen A., Llorca J. Metal matrix composites. *Annual Review of Materials Research*, 2010, vol. 40, pp. 243–270. – doi: 10.1146/annurev-matsci-070909-104511.
2. Suryanarayana C., Al-Aqeeli N. Mechanically alloyed nanocomposites. *Progress in Materials Science*, 2013, vol. 58, pp. 383–502. doi: 10.1016/j.pmatsci.2012.10.001.

* Corresponding author

Konovalenko Igor S., Ph.D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS

2/4, pr. Akademicheskii, 634055, Tomsk, Russian Federation

Tel.: 8 (3822) 286-975, e-mail: igkon@ispms.tsc.ru

3. Casati R., Vedani M. Metal matrix composites reinforced by nano-particles – a review. *Metals*, 2014, vol. 4, pp. 65–83. doi: 10.3390/met4010065.
4. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23, pp. 1918–1928. doi: 10.1007/s11665-014-0958-z.
5. Kelbassa I., Wohlers T., Caffrey T. Quo vadis, laser additive manufacturing? *Journal of Laser Applications*, 2012, vol. 24, pp. 050101/1–050101/10. doi: 10.2351/1.4745081.
6. Gu D., Hagedorn Y.-C., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Nanocrystalline TiC reinforced Ti matrix bulk-form nanocomposites by Selective Laser Melting (SLM): densification, growth mechanism and wear behavior. *Composites Science and Technology*, 2011, vol. 71, pp. 1612–1620. doi: 10.1016/j.compscitech.2011.07.010.
7. Song B., Dong S., Coddet P., Coddet Ch. Microstructure and tensile behavior of hybrid nano-micro SiC reinforced iron matrix composites produced by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 579, pp. 415–421. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.06.087.s.
8. Singh H., Sidhu T.S., Kalsi S.B.S. Cold spray technology: future of coating deposition processes. *Fracture and Structural Integrity*, 2012, vol. 22, pp. 69–84. doi: 10.3221/IGF-ESIS.22.08.
9. Moridi A., Hassani-Gangaraj S.M., Guagliano M., Dao M. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives. *Surface Engineering*, 2014, vol. 36, pp. 369–395. doi: 10.1179/1743294414Y.0000000270.
10. Sobolev V.V., Guilemany J.M., Nutting J., Joshi S. *High velocity oxy-fuel spraying: theory, structure-property relationships and applications*. David Brown Book Company, 2004. 397 p. ISBN 9781902653723.
11. Lampke T., Wielage B., Pokhmurska H., Rupprecht C., Schuberth S., Drehmann R., Schreiber F. Development of particle-reinforced nanostructured iron-based composite alloys for thermal spraying. *Surface and Coating Technology*, 2011, vol. 205, pp. 3671–3676. doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.01.003.
12. Sharma V., Pra-kash U., Kumar B.V.M. Surface composites by friction stir processing: a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 224, pp. 117–134. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.04.019.
13. Yuvaraj N., Aravindan S., Vipin S. Fabrication of Al5083/B4C surface composite by friction stir processing and its tribological characterization. *Journal of Materials research and technology*, 2015, vol. 4 (4), pp. 398–410. doi: 10.1016/j.jmrt.2015.02.006.
14. Kalin B.A., Yakushin V.L., Pol'skii V.I., Dzhumaev P.S., Dmitrieva K.K., Emel'yanova O.V., Averin V.I. Uprochnenie poverkhnosti i povyshenie iznosostoikosti metallicheskih materialov pri obrabotke potokami vysokotemperaturnoi plazmy [The surface strengthening and wear resistance increase of metals under the treatment with high temperature pulsed plasma flows]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2010, no. 2, pp. 21–27. (In Russian).
15. Yakushin V.L., Khein A.T., Dzhumaev P.S., Isaenkova M.G., Kalin B.A., Leont'eva-Smirnova M.V., Naumenko I.A., Perlovich Yu.A., Pol'skii V.I. Modification of the structural-phase of ferritic-martensitic steels by high-temperature pulsed plasma flows. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2013, vol. 4, iss. 5, pp. 376–384. doi: 10.1134/S2075113313050195.
16. Kadyrzhanov K.K., Komarov F.F., Pogrebnyak A.D., Rusakov V.S., Turkebaev T.E. *Ionno-luchevaya i ionno-plazmennaya modifikatsiya materialov* [Ion-beam and ion-plasma modification of materials]. Moscow, MSU Publ., 2005. 634 p. ISBN 5-211-05153-X.
17. Poate J.M., Foti G., Jacobson D.C., eds. *Surface modification and alloying by laser, ion and electron beams*. New York, London, Plenum Press, 1983 (Russ. ed.: *Modifitsirovanie i legirovanie poverkhnosti lazernymi, ionnymi i elektronnyimi puchkami*. Ed. by Dzh. Pout, G. Foti, D. Dzhekobson. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 424 p.).
18. Leont'ev P.A., Khan M.G., Chekalova M.T. *Lazernaya poverkhnostnaya obrabotka metallov i splavov* [Laser surface treatment of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 142 p.
19. Orishich A.M., Cherepanov A.N., Shapeev V.N., Pugacheva N.B. *Nanomodifitsirovanie svarnykh soedinenii pri lazernoi svarke metallov i splavov* [Nanomodification of welded joints in laser welding of metals and alloys]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2014. 252 p. ISBN 978-5-7692-1379-3.
20. Ovcharenko V.E., Baohai Yu., Psahie S.G. Electron-beam treatment of tungsten-free TiC/NiCr cermet. I: influence of subsurface layer microstructure on resistance to wear during cutting of metals. *Journal of Materials Science & Technology*, 2005, vol. 21, no. 3, pp. 427–429.
21. Baohai Yu., Ovcharenko V.E., Psahie S.G., Lapshin O.V. Electron-beam treatment of tungsten-free TiC/NiCr cermet II: structural transformation in the subsurface layer. *Journal of Materials Science & Technology*, 2006, vol. 22, no. 4, pp. 511–513.
22. Ovcharenko V.E., Ivanov K.V., Ivanov Yu.F., Mokhovikov A.A., Baohai Yu. Modification of the structural-phase state of the surface layer of a cermet composite under electron beam irradiation in inert gas plasmas. *Russian Physics Journal*, 2017, vol. 59 (12), pp. 2114–2121. doi: 10.1007/s11182-017-1022-x.
23. Psahie S.G., Ovcharenko V.E., Knyazeva A.G., Shilko E.V. Formirovanie mnogomasshtabnoi struktury v poverkhnostnykh sloyakh i stoikost' metallokeramicheskogo splava v usloviyakh mekhanicheskikh vozdeistvii

[Formation of a multiscale structure in surface layers and resistance of cermet alloy to mechanical action]. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 2011, vol. 14, no. 6, pp. 23–34. (In Russian).

24. Mishnaevsky L.Jr., Levashov E., Valiev R.Z., Segurado J., Sabirov I., Enikeev N., Prokoshkin S., Solov'yov A.V., Korotitskiy A., Gutmanas E., Gotman I., Rabkin E., Psakhie S., Dluhoš L., Seefeldt M., Smolin A. Nanostructured titanium-based materials for medical implants: modeling and development. *Materials Science and Engineering R*, 2014, vol. 81, pp. 1–19. doi: 10.1016/j.mser.2014.04.002.

25. Pei Y.T., Ouyang J.H., Lei T.C., Zhou Y. Laser clad ZrO_2 - Y_2O_3 ceramic/Ni-base alloy composite coatings. *Ceramics International*, 1995, vol. 21, pp. 131–136. doi: 10.1016/0272-8842(95)95884-K.

26. Wang W., Oaki Y., Ohtsuki Ch., Nakano T., Hiroaki I. Formation of c-axis-oriented columnar structures through controlled epitaxial growth of hydroxyapatite. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2013, vol. 1, pp. 143–148. doi: 10.1016/j.jascr.2013.03.009.

27. Biniuc C., Istrate B., Munteanu C., Dorin L. Increased resistance to mechanical shock of metallic materials by metal-ceramic surface coatings. *Key Engineering Materials*, 2015, vol. 638, pp. 316–321. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.638.316.

28. Chiang S.S., Marshall D.B., Evans A.G. A simple method for adhesion measurements. *Surfaces and interfaces in ceramic and ceramic-metal systems*. Ed. by J. Pask, A. Evans. New York, Springer US, 1981, pp. 603–617.

29. Shilko E.V., Psakhie S.G., Schmauder S., Popov V.L., Astafurov S.V., Smolin A.Yu. Overcoming the limitations of distinct element method for multiscale modeling of materials with multimodal internal structure. *Computational Materials Science*, 2015, vol. 102, pp. 267–285. doi: 10.1016/j.commatsci.2015.02.026.

30. Smolin A.Yu., Shilko E.V., Astafurov S.V., Psakhie S.G. Modeling mechanical behaviors of composites with various ratios of matrix-inclusion properties using movable cellular automaton method. *Defence Technology*, 2015, vol. 11, pp. 18–34. doi: 10.1016/j.dt.2014.08.005.

31. Potyondy D.O., Cundall P.A. A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, vol. 41, pp. 1329–1364. doi: 10.1016/j.ijrmms.2004.09.011.

32. Bicanic N. Discrete element methods. Stein E, de Borst R, Hughes T.J.R, editors. *Encyclopaedia of computational mechanics*. Ed. by E. Stein, R. De Borst, T.J.R. Hughes. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd, 2017, pp. 1–38. doi: 10.1002/9781119176817.ecm2006.

33. Petersen K.E. Silicon as a mechanical material. *Proceedings of the IEEE*, 1982, vol. 70, no. 5, pp. 420–457.

34. Dudova N., Kaibyshev R., Valitov V. Short-range ordering and the abnormal mechanical properties of a Ni-20% Cr alloy. *The Physics of Metals and Metallography*, 2010, vol. 08 (6), pp. 625–633. doi: 10.1134/S0031918X0912014X.

35. Alejano L.R., Bobet A. Drucker–Prager criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, vol. 45 (6), pp. 995–999. doi: 10.1007/s00603-012-0278-2.

36. Park K., Paulino G.H. Cohesive zone models: a critical review on traction-separation relationships across fracture surfaces. *Applied Mechanics Reviews*, 2011, vol. 64, pp. 060802/1–060802/20. doi: 10.1115/1.4023110.

37. Geubelle P.H., Baylor J.S. Impact-induced delamination of composites: a 2D simulation. *Composites Part B: Engineering*, 1998, vol. 29, pp. 589–602. doi: 10.1016/S1359-8368(98)00013-4.

38. Psakhie S., Ovcharenko V., Baohai Yu., Mokhovikov A. Influence of features of interphase boundaries on mechanical properties and fracture pattern in metal-ceramic composites. *Journal of Materials Science and Technology*, 2013, vol. 29, pp. 1025–1034. doi: 10.1016/j.jmst.2013.08.002.

39. Smirnov S.V., Konovalov A.V., Myasnikova M.V., Khalevitsky Yu.V., Smirnov A.S., Igumnov A.S. A numerical study of plastic strain localization and fracture in Al/SiC metal matrix composite. *Physical Mesomechanics*, 2018, vol. 21 (4), pp. 305–313. doi: 10.1134/S1029959918040045.

40. Mishnaevsky L. Nanostructured interfaces for enhancing mechanical properties of composites: computational micromechanical studies. *Composites Part B: Engineering*, 2015, vol. 68, pp. 75–84. doi: 10.1016/j.compositesb.2014.08.029.

41. Shinohara K. Relationship between work-hardening exponent and load dependence of Vickers hardness in copper. *Journal of Materials Science*, 1993, vol. 28, pp. 5325–5329.

42. Lan H., Venkatesh T.A. On the relationships between hardness and the elastic and plastic properties of isotropic power-law hardening materials. *Philosophical Magazine*, 2014, vol. 94, no. 1, pp. 35–55. doi: 10.1080/14786435.2013.839889.

Conflicts of Interest

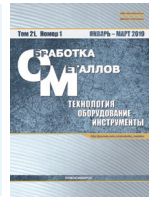
The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Физико-механические аспекты абразивного изнашивания сталей в условиях охлажденной воздушной среды

И-Кан Ан^{1,а}, Эрнст Вольф^{1,б}, Юрий Сараев^{2,с,*}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, Томск, 634055, Россия

^а <http://orcid.org/0000-0002-4721-7333>, igwan@sibmail.com, ^б <http://orcid.org/0000-0003-0121-8290>, volfernst@tpu.ru,

^с <http://orcid.org/0000-0002-9457-4309>, litsin@ispms.tsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.03

История статьи:

Поступила: 09 ноября 2018

Рецензирование: 31 января 2019

Принята к печати: 11 февраля 2019

Доступно онлайн: 15 марта 2019

Ключевые слова:

Абразивный износ

Низкотемпературная воздушная среда стали

Закономерности изнашивания

Схемы износных испытаний

Финансирование

Работа выполнена в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве между НИ ТПУ, ИФПМ СО РАН, ИФТПС СО РАН, ИМАШ УрО РАН и программ фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, проект Ш.23.2.1.

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность рассмотренных в статье вопросов обусловлена стратегией освоения перспективных в экономическом отношении регионов России, для которых характерны суровые климатические условия. Это приводит прежде всего к неблагоприятному воздействию на материал деталей эксплуатируемой техники климатически низких температур. Выход из строя деталей, а нередко целых узлов бывает связан чаще всего с их износом, интенсивность которого, как правило, нарастает при воздействии отрицательных температур (к низкотемпературным принято относить процессы, протекающие при температурах ниже 273 К). Наиболее губительным в плане влияния на работоспособность этих элементов механических систем является их абразивное изнашивание. При этом практика эксплуатации техники в северных условиях показала, что интенсивность этого вида механического изнашивания деталей в узлах трения связана с неблагоприятным воздействием на физико-механические свойства, а значит, и на износостойкость сталей охлажденной воздушной среды. Поэтому изучение характера и причин поверхностного разрушения деталей, изготовленных из стальных материалов, представляет как научный, так и сугубо практический интерес. Ферритоперлит является основой для широко применяемых сталей (сплавов), и в рассматриваемом контексте стал предметом настоящего исследования, цель которого «выявить закономерности абразивного низкотемпературного изнашивания отожженных углеродистых сталей для их использования при разработке научно обоснованных рекомендаций, необходимых при конструировании высокоизносостойкости металлических материалов». **Методы исследования.** В научно-прикладном исследовании применялись как аналитические методы, так и экспериментальные износные испытания на установках оригинальных конструкций (защищены авторскими свидетельствами). В качестве расчетной модели для оценки траекторий и параметров скольжения абразивных зерен по рабочей поверхности ускорителя (ротора) использовалось понятие кинематической пары пятого класса (в качестве связи частицы с рабочей поверхностью в рассмотрение было введено понятие фрикционной связи по И.В. Крагельскому). **Результаты и обсуждения.** Обобщая полученные результаты, отметим следующее. Во-первых, экспериментально зафиксировано влияние схемы воздействия абразивных частиц в условиях низких температур на изнашиваемую поверхность образцов. За счет вогнутой (установка типа ЦУК) или выпуклой (способ кольца) формы изнашиваемой поверхности изменялась схема напряжений на разрушаемой поверхности образца. Отмеченное наглядно прослеживается на кривых износа в условиях охлажденной воздушной среды. Во-вторых, увеличение протяженности межфазовой некогерентной границы в системе α – твердый раствор – упрочняющая карбидная фаза (в отожженном состоянии испытывались углеродистые стали по составу от доэвтектоидных до заэвтектоидных) привело к росту абразивной износостойкости на всем интервале исследованных температур. Вместе с этим обозначенное имеет ряд особенностей, связанных с изменением механизма изнашивания при преодолении порога хладноломкости (от вязкого к хрупкому).

Для цитирования: Ан И-Кан, Вольф Э.Л., Сараев Ю.Н. Физико-механические аспекты абразивного изнашивания сталей в условиях охлажденной воздушной среды // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 108–121. – doi:10.17212/1994-6309-2019-21.1-108-121.

*Адрес для переписки

Сараев Юрий Николаевич, д.т.н., профессор,
 главный научный сотрудник
 Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
 пр. Академический, 2/4,
 634055, г. Томск, Россия
 Тел.: 8 (3822)492-942, e-mail: litsin@ispms.ru

Введение

Стратегия развития территорий в Арктике, на Крайнем Севере и в Сибири требует уделять проблемам работоспособности машин и техники северного исполнения особое внимание

[1–4]. Объекты топливно-энергетического, нефтегазового, горнодобывающего, строительного, транспортного и машиностроительного комплексов в процессе эксплуатации подвержены воздействию таких неблагоприятных факторов для их эксплуатационных свойств, как высокие нагрузки и значительные температурные перепады. Эти факторы, как правило, природно-техногенного характера ведут к авариям и иногда катастрофам, а также чаще всего к потере у вышеуказанных объектов работоспособного состояния. Анализируя эту ситуацию, авторы статей [2, 5] обращают внимание на то, что только прямой материальный ущерб от аварийных и иных ситуаций достигает 10 млрд руб. Неблагоприятные факторы ими сгруппированы так: конструктивные, к которым прежде всего относят научно- и нормативно-необоснованный выбор материалов; технологические; эксплуатационные и влияние человеческого фактора.

В настоящей работе основное внимание было сконцентрировано на изучении закономерностей абразивного изнашивания металлов и сплавов при воздействии глубоких отрицательных температур. Отметим, что к низкотемпературным принято относить процессы, протекающие при температурах ниже 273 К, а к криогенным – ниже 120 К. Кроме этого необходимо подчеркнуть и то, что к самому губительному – в плане влияния на работоспособность деталей и узлов трения – относят абразивное изнашивание, сопровождающееся царапающим, а еще хуже режущим изнашиваемую поверхность действием абразивных частиц. Поэтому с точки зрения методологии и методики в проведенном исследовании пристальное внимание было уделено вопросу выбора способа абразивного изнашивания и обоснования принципиальной схемы (см. сводную таблицу) абразивного воздействия на изнашиваемую охлажденную поверхность образца [6].

О методологических особенностях

Для решения методологического вопроса выполнен анализ способов и схем низкотемпературных испытаний на абразивное изнашивание. Оказалось, что в настоящее время для исследования в экспериментальных стендах и установках воспроизводятся следующие основные условия для реализации сугубо механического процесса:

- 1) изнашивание абразивной струей;
- 2) изнашивание в абразивной массе;
- 3) трение о закрепленный абразив;
- 4) ударно-абразивное изнашивание.

Различие в объеме разрушений, возникающих на изнашиваемых поверхностях, на наш взгляд, обуславливается в рассматриваемых способах испытаний рядом факторов. С одной стороны, влиянием механофизических свойств изнашиваемого материала, с другой – способом абразивного воздействия, а также абразивной способностью самой изнашивающей среды.

В том случае, когда отрицательная температура влияет на все перечисленные факторы одновременно, об исследовании закономерностей абразивного низкотемпературного изнашивания металлов и сплавов с позиций физики и механики разрушения судить весьма проблематично. В подобных ситуациях вернее всего вести речь об исследованиях, имеющих конкретное прикладное значение. По этой причине, с нашей точки зрения, при исследовании закономерностей абразивного низкотемпературного изнашивания (механофизический аспект) при выборе способа и обоснования схемы испытаний на износ следует, прежде всего, обеспечить такие условия:

- 1) на изнашиваемых металлических поверхностях процесс разрушения должен происходить при реализации такого напряженного состояния, когда свободно развиваются пластические деформации;
- 2) абразивная среда не должна менять своих обычных характеристик за весь период фрикционного взаимодействия с охлажденной поверхностью изнашиваемого образца;
- 3) параметры режима износных испытаний, например, скорость, угол атаки, характер приложения нагрузки, не должны оказывать существенного влияния на механизмы, контролирующие процесс хрупкого разрушения, а значит, и на механизм возникновения частицы износа.

На основании указанных выводов, следующих из анализа закономерностей абразивного износа, сделано заключение о том, что наиболее приемлемым для решения поставленных задач является способ, действие которого основано на свободном воздействии абразивных частиц на изнашиваемую поверхность.

Весьма распространенным является разгон частиц воздушным потоком. В практическом от-

Сводная таблица /
Summary table

		Схемы испытаний / Test patterns		
		1	2	3
Способы абразивного изнашивания / Abrasive wear methods	1			
	2			
	3			
	4			

ношении способ интересен, однако для цели настоящего исследования малоприменим, так как обладает существенным недостатком. Суть недостатка может быть проиллюстрирована на примере широко известного способа центробежного разгона частиц [7 и 8]. Так, например, в направляющих каналах установки может иметь место существенное влияние на радиальную скорость частиц из-за их трения о стенки по всей длине канала. Отсутствие учета вышеуказанного влияния может привести к существенным погрешностям результатов исследований, и, как следствие, снизить их достоверность при достижении основной цели настоящего исследования – выявление закономерностей абразивного низкотемпературного изнашивания.

Методика исследования

Расчетно-аналитическая оценка траектории и параметров скольжения абразивных частиц по плоскому дну ускорителя

Для определения траектории частицы на дне плоского вращающегося центробежного ускорителя воспользуемся уравнением кинетики

$$F_{\text{тр}} + F_{\text{ин}} = 0, \quad (1)$$

в котором сила трения равна

$$F_{\text{тр}} = -mgf \frac{v}{\sqrt{v^2}} \quad (2)$$

и сила инерции

$$F_{ин} = -ma. \tag{3}$$

В выражении (3) ускорение равно [9]

$$a = a^r + a^e + a^k, \tag{4}$$

где a^r – относительное ускорение; a^e – переносное ускорение; a^k – кориолисово ускорение.

Перепишем выражение (1) с учетом зависимостей (2)–(4) и сократим на m :

$$gf \frac{v}{\sqrt{v^2}} + a^r + a^e + a^k = 0. \tag{5}$$

Введем прямоугольную декартовую систему координат. Теперь положение частицы можно находить радиусом-вектором r (рис. 1).

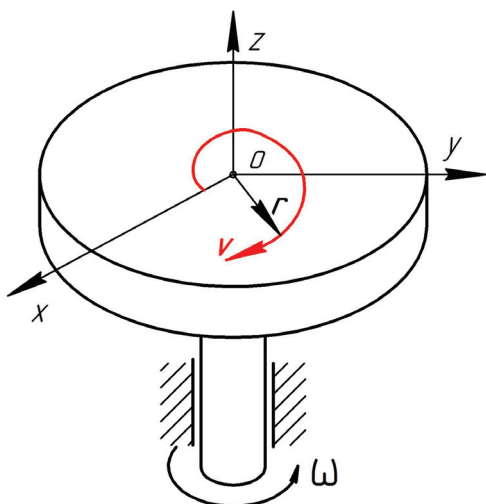


Рис. 1. Схема плоского центробежного ускорителя

Fig. 1. Pattern of a flat centrifugal accelerator

После несложных преобразований из векторного уравнения (5) получим два дифференциальных уравнения второго порядка:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = 2\omega \frac{dy}{dt} + \omega^2 x - gf \frac{\frac{dx}{dt}}{\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}}, \tag{6}$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -2\omega \frac{dx}{dt} - \omega^2 y - gf \frac{\frac{dy}{dt}}{\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}}. \tag{7}$$

На рис. 2 и 3 представлены результаты численного решения уравнений (6) и (7) при начальных условиях $x = 5 \text{ мм}, y = 0, z = 0, \left(\frac{dx}{dt} \neq 0, \frac{dy}{dt} = 0\right)$,

когда сила трения оказывается меньше центробежной силы, и начало движения возможно. Коэффициент трения f задавался равным 0,10; 0,15; 0,20. Радиус ускорителя $R = 0,05 \text{ м}$. Использовались несколько значений угловой скорости.

Расчетные траектории представляют спирали типа архимедовой, причем подход частиц к отверстиям обода ускорителя происходит под весьма острыми углами, так что частица может набрать радиальную составляющую скорости (v_r) лишь на пути в длину выходного канала ускорителя.

Из полученных графиков следует, что увеличение коэффициента трения f ведет к уменьшению времени достижения границы диска, увеличению шага спирали и мало сказывается на величине скорости вблизи периферии диска. Рост значения ω сопровождается увеличением количества витков спирали, увеличением скорости скольжения, что обеспечивает острый угол подхода частицы к ободу ускорителя и мало влияет на общее время движения.

Можно предполагать, что по мере продвижения по спирали скорость частицы v должна несколько возрастать. В самом деле, сила Кори-

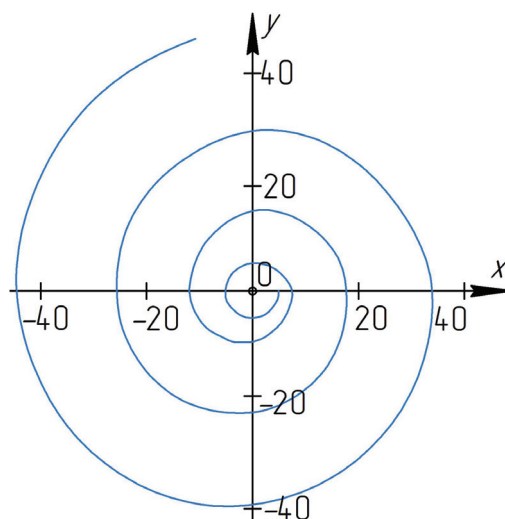


Рис. 2. Спиралеобразная траектория частицы относительно дна вращающегося ускорителя $f = 0,15; \omega = 78,75 \text{ с}^{-1}$

Fig. 2. The spiral-shaped trajectory of a particle relative to the bottom of the rotating accelerator is $f = 0.15; \omega = 78.75 \text{ s}^{-1}$

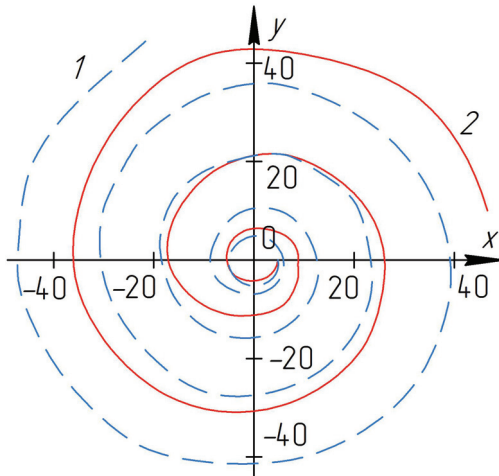


Рис. 3. Спиралеобразные траектории частицы относительно вращающегося дна ускорителя:

$$1-f=0,1; \omega=78,75 \text{ c}^{-1}; 2-f=0,1; \omega=52,5 \text{ c}^{-1}$$

Fig. 3. Spiral-shaped trajectories of a particle relative to the rotating bottom of the accelerator:

$$1-f=0,1; \omega=78.75 \text{ s}^{-1}; 2-f=0,1; \omega=52.5 \text{ s}^{-1}$$

олиса лишь в начальные моменты движения перпендикулярна радиусу ускорителя, т. е. центробежной силе. Далее сила Кориолиса, оставаясь перпендикулярной скорости v , будет составлять с направлением центробежной силы уже тупой угол, который по мере движения по спиральной кривой будет становиться все больше и больше. И хотя обе силы (центробежная и кориолисова) с ростом радиуса будут увеличиваться, но увеличение их равнодействующей замедлится вследствие увеличения тупого угла между ними.

Для проверки приведенных выше предположений умножим уравнение (6) на $\frac{dx}{dt}$, а (7) на $\frac{dy}{dt}$ и сложим их. Далее с учетом того, что $\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 = v^2$ и $\sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = dL$ есть дифференциал длины дуги L , то в результате интегрирования, получим выражение $v = \omega r \sqrt{1 - \frac{2gL}{\pi^2 r^2}}$.

Из полученной формулы следует, что с ростом L скорость v все более отстает от значения ωr , хотя и возрастает с ростом r , что и высказывалось в предположении.

С учетом сил трения в выходном канале ускорителя (рис. 4), обусловленных прижимающими

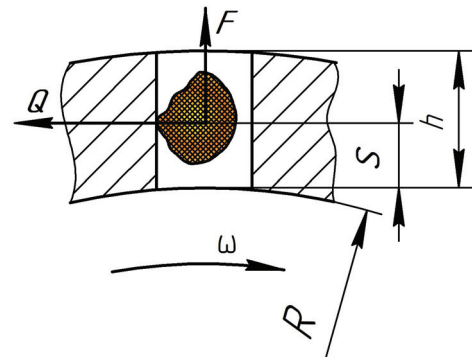


Рис. 4. Частица в радиальном канале

Fig. 4. Particle in the radial channel

частицу к стенкам канала силой веса mg и силой Кориолиса $2m\omega v_r = Q$, можно записать:

$$v_r \frac{dv_r}{dS} = \omega^2 (R+S) - f(g + 2\omega v_r). \quad (8)$$

Так как S по сравнению с радиусом дна ускорителя R мало, то можно для упрощения принять, что $S = h/2$. Тогда, обозначив

$$A = \omega^2 \left(R + \frac{h}{2} \right) - fg = \text{const},$$

из выражения (8) получим зависимость

$$dS = \frac{v_r dv_r}{A - 2f\omega v_r}.$$

Интегрируя последнее выражение при $S = 0$ и $v_r = 0$, получаем уравнение для определения значения скорости в момент вылета частицы из канала:

$$v_r + 2f\omega h = \frac{A}{2f\omega} \left\{ \ln A - \ln(A - 2f\omega v_r) \right\}. \quad (9)$$

Решение численного примера показало, что величина скорости, найденная по формуле (9) при $R = 0,05$ м; $\omega = 314 \text{ c}^{-1}$; $f = 0,1$; $h = 0,001$ м, равна $v_r = 3,111$ м/с. При этом $\text{tg} \alpha = \frac{3,111}{\omega(R+h)}$ и

$\alpha \approx 10,59^\circ$. Естественно, что с увеличением коэффициента трения радиальная скорость на вылете будет меньше. Меньше будет и сам угол.

Аналогичный подсчет для $\omega = 52,35 \text{ c}^{-1}$; $f = 0,1$; $R = 0,05$ м и $h = 0,001$ м показывает, что радиальная скорость на вылете v_r будет 0,515 м/с, а угол между направлением полета частицы вне ускорителя и касательной составляет $\alpha \approx 10,55^\circ$.

Следовательно, можно утверждать, что простой по изготовлению плоский центробежный ускоритель обладает таким свойством, что траектории частиц относительно вращающегося дна ускорителя носят спиралеобразный характер, причем подход частиц к цилиндрическому ободу ускорителя происходит под острыми углами. При малых каналах траектория частиц практически остается неизменной с сохранением линейной скорости периферийных точек ускорителя.

Таким образом, частицы могут быть направлены на исследуемые образцы под заданными углами атаки и найденной выше скоростью.

Экспериментальные исследования

В соответствии с вышеизложенным ранее, нами была создана установка [10], принцип действия которой базировался на центробежном разгоне абразивных частиц. В отличие от известных конструкций установок типа ЦУК [11] в ускорителе (роторе) отсутствовали радиальные каналы большой длины (делались в боковой стенке ротора отверстия). Таким образом, обеспечивался выход абразивных частиц практически по касательной к боковой поверхности ротора. Угол атаки α в рассматриваемом случае не зависел от скорости выхода абразивных частиц из боковых отверстий ротора и определялся из чисто геометрических соображений: $\alpha = \arccos(\rho/R)$, где ρ – радиус окружности внешней боковой поверхности ротора; R – радиус окружности концентрически расположенного относительно ротора цилиндрического образца (рис. 5).

Разработанная система охлаждения позволяла плавно изменить температуру на изнашиваемой поверхности от комнатной до 143 К [10]. Износ определялся одним из самых достоверных способов – взвешиванием на аналитических весах до и после опыта. Весовой износ пересчитывался в объемный (в кубических миллиметрах).

Результаты оценки влияния температуры на закономерности абразивного изнашивания отожженной стали 20 представлены на рис. 6. Монотонное возрастание абразивной износостойкости (линейная зависимость) по мере понижения температуры изнашиваемой поверхности образца, несмотря на рост твердости HV [12], объяснить на основе известных исследований по вопросам хрупкого разрушения [13–15] весьма

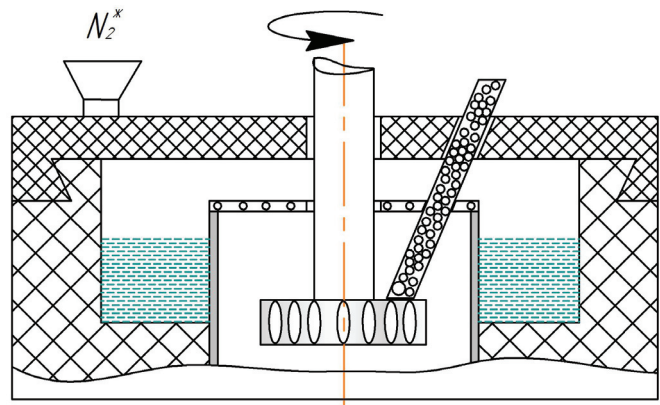


Рис. 5. Схема конструкции установки для низкотемпературных испытаний на износ по способу центробежного разгона

Fig. 5. The design of the installation for low-temperature wear tests by the method of centrifugal acceleration

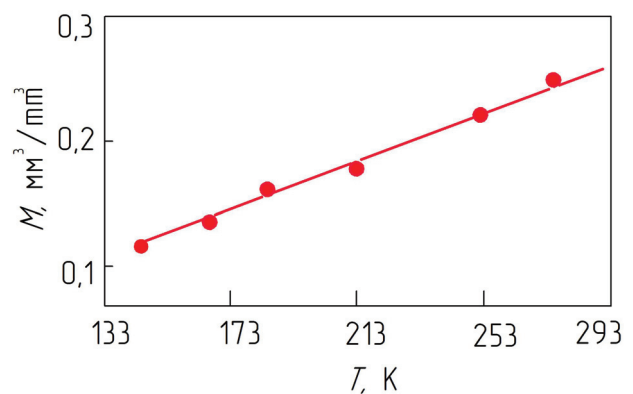


Рис. 6. Зависимость величины износа стали 20 от низких температур

Fig. 6. Dependence of wear of “steel 20” on low temperatures

затруднительно. По-видимому, повышение износостойкости при понижении температуры как-то связано с проявлением эффекта хладноломкости в сталях. Найти до конца удовлетворительное объяснение полученному результату с точки зрения изменения только физико-механических характеристик в рассматриваемом интервале изменения температуры затруднительно [16]. В какой-то мере удовлетворительное объяснение выявленным закономерностям абразивного низкотемпературного изнашивания дают результаты склерометрических испытаний, которые проведены Н.Н. Титовским и В.О. Титовской (выполнены под руководством доктора физ.-мат. наук В.Н. Кашеева). Исследовался характер поверх-

ностного разрушения сталей при царапающем воздействии конического индентора в широком интервале температур от +20 до -196 °С. Обнаружено, что с понижением температуры воздушной среды прежде всего уменьшается глубина царапин и вместе с этим возрастает тангенциальное усилие микрорезания. Кроме того, было зафиксировано также возникновение в контактной зоне сложного напряженного состояния (микрообъем), которое отличается от напряженного состояния, возникающего в приконтактной зоне (макрообъем). В результате следует подчеркнуть тот факт, что образование микростружки связано как с деформационными характеристиками, так и с характеристиками процесса разрушения (причем специфического поверхностного).

В частности, не исключено, что в использованной нами схеме износных испытаний в разрушаемой поверхности реализуется напряженное состояние, при котором затруднительно свободное развитие пластической деформации, а способ охлаждения неподвижного образца отвечает условиям, при которых по толщине неподвижного цилиндрического образца возникают градиенты температур, влияние которых на характеристики износа доказано исследованиями проф. В.Н. Кашеева [18, 19]. В этой связи было проведено исследование абразивного износа с использованием способа, исключаяющего влияние фактора, связанного с градиентом температуры, а также обеспечивающего свободное развитие пластических деформаций на изнашиваемой поверхности.

Результаты и их обсуждение

Способ кольца, вращающегося в потоке свободнопадающих абразивных частиц (патент РФ № 763741)

Проанализируем возможные варианты принципиальных схем испытаний на износ в рамках данного способа аналитическим методом (рис. 7).

Угол атаки α можно найти из скалярного произведения двух векторов

$$V_{об} V_{\Sigma} = V_{об} V_{\Sigma} \cos \alpha, \quad (10)$$

где $V_{об}$ – вектор линейной скорости образца в точке падения частицы обращенного механизма:

$$V_{об} = R\omega (\sin \varepsilon \mathbf{j} - \cos \varepsilon \mathbf{i}); \quad (11)$$

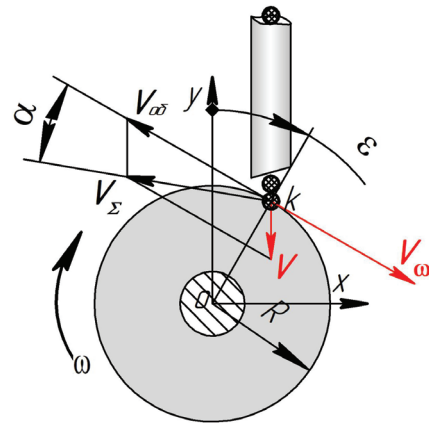


Рис. 7. Расчетная схема для определения угла атаки

Fig. 7. Computational pattern for determining the angle of impact

V_{Σ} – вектор суммарной скорости, равный

$$V_{\Sigma} = V_{об} + V, \quad (12)$$

в котором V – вектор скорости падения абразивной частицы:

$$V = -V \mathbf{j}. \quad (13)$$

В выражениях (11) и (13) \mathbf{i} и \mathbf{j} -орты соответственно осей x и y прямоугольной системы координат Oxy .

На основании (10)–(13) после несложных преобразований получим угол атаки:

$$\alpha = \arccos \frac{\omega R - V \sin \varepsilon}{\sqrt{(\omega R \sin \varepsilon - V)^2 + (\omega R \cos \varepsilon)^2}}.$$

Принципиальной особенностью данного способа испытаний на износ является свободное падение абразивных частиц, которые не увлекаются газовым или жидкостным потоком. Вертикальная скорость зерна обеспечивает пробивание слоя воздуха, прорывающегося в зазор между торцевой поверхностью конца направляющей трубки и изнашиваемой поверхностью вращающегося образца (Т-образный в диаметральном сечении, рис. 8). Тангенциальные силы, развивающиеся в результате удара абразивного зерна по изнашиваемой поверхности вращающегося образца, обеспечивают разрушение. Многочисленными экспериментами [18] доказано, что механизм формирования частицы металлического износа при острых углах атаки связан с процессом царапания или микрореза-

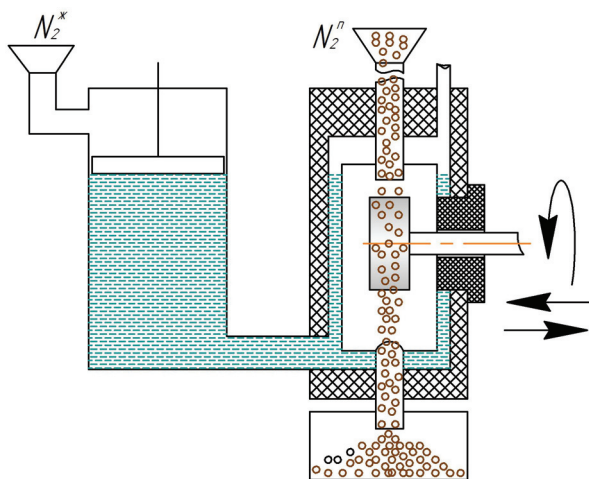


Рис. 8. Схема конструкции установки для низкотемпературных испытаний на износ по способу кольца, вращающегося в абразивном потоке

Fig. 8. Installation pattern design for low-temperature wear tests according to the method of a ring rotating in an abrasive flow

ния (продукты износа представляются в виде коротких микростружек). Важно подчеркнуть, что в обычных условиях при комнатной температуре возникновение частицы металлического износа для пластичных материалов сопровождается появлением по краям следов абразивного разрушения характерных навалов с одновременным возникновением наклепанного слоя. По данным Э.В. Рыжова, степень и глубина наклепанного слоя незакаленной углеродистой стали при шлифовании кругами разной зернистости лежат в диапазоне величин: 40...60 % и 30...60 мкм соответственно. Данные параметры наклепанного слоя определялись измерением микротвердости на косых шлифах. Отмеченное свидетельствует о развитии на изнашиваемых металлических поверхностях кольцевого образца значительных пластических деформаций. При этом следует отметить, что эти деформации на выпуклой поверхности образца развиваются в нестесненных условиях.

Результатами исследований М.М. Хрущева процессов изнашивания пластичных металлических материалов по абразивной шкурке (кругу) с соблюдением рекомендуемого режима испытаний (нагрузка на образец, скорость скольжения) показано, что после стадии приработочного износа наступает стадия установившегося износа, при которой частица металлического износа форми-

руется в пределах слоя, наклепанного предшествующим абразивным воздействием [19, 20]. Вполне закономерно предположить, что при достижении области низких температур степень и глубина наклепа уменьшаются, что, в свою очередь, приводит к уменьшению объема, уносимого с изнашиваемой охлажденной поверхности материала.

Чрезвычайно важным параметром режима испытаний на износ в рассматриваемом случае является и скорость соударения. В.Н. Кашеевым [18] доказано, что удары под острыми углами атаки в обычных условиях испытаний не дают оплавлений на изнашиваемой металлической поверхности при скоростях соударения частиц с поверхностью вплоть до $50 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. В проведенных испытаниях угол атаки был в пределах острого, а скорость соударения была не более $16 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. В качестве абразивного материала применялся электрокорунд нормальный с номером зернистости 200 (шлифзерно). Интервал температур задавался от 293 до 113 К. Абразивному изнашиванию были подвергнуты углеродистые стали (0,23; 0,57; 0,68 и 1,04 %С) в отожженном состоянии. Результаты представлены на рис. 9.

Из графиков весьма наглядно прослеживается повышение износостойкости (величина,

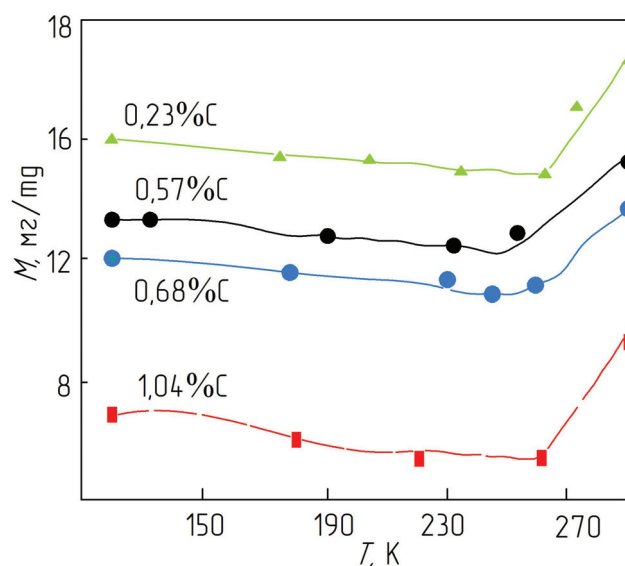


Рис. 9. Зависимости износа углеродистых сталей от низких температур (процентное содержание углерода показано на кривых износа)

Fig. 9. Dependence of the wear of carbon steels on low temperatures (the percentage of carbon is shown on the curves of wear)

обратная износу) в интервале температур от 293 до 240 К. В этом же интервале температур происходит рост твердости для сталей Ст. 3кп, 45, У10А [12]. Однако несмотря на дальнейший рост твердости на всем рассматриваемом в цитируемой книге [12] температурном интервале вплоть до 77 К, износостойкость после 240 К, как следует из представленных графиков, снижается. Комплексный анализ [21] позволяет выявить тенденцию – снижение идет более интенсивно для сталей с меньшим содержанием углерода, а значит, и с меньшим содержанием упрочняющей фазы (карбидов). Данный факт можно гипотетически объяснить опережающим распространением частицы износа у пластичного при комнатной температуре феррита за пределы наклепанной зоны (после преодоления порога хладноломкости).

По данным многочисленных исследований [16], например с понижением температуры, прочностные характеристики и, прежде всего, предел текучести возрастают и при этом характеристики пластичности падают. Вероятнее всего, склонность углеродистых сталей к снижению износостойкости после температуры 240 К, как и при абразивно-ударном изнашивании [22], обусловлена соотношением названных характеристик и зависит главным образом от структурно-физических параметров материала [17]. Аспекты физико-механического анализа особенностей поверхностного разрушения при абразивном низкотемпературном изнашивании углеродистых сталей позволяют сделать предположение о проявлении губительного влияния процессов хрупкого разрушения на рост износа после температуры 240 К. В теории разрушения главная проблема в том, что не выявлена связь между атомным (дислокационным) механизмом разрушения твердых тел и его макроскопическими характеристиками.

Вопросами хрупкого разрушения, которые были связаны с поломкой рельсов, возникающими при наступлении климатически низких температур, томские ученые [13 и 14] стали заниматься с 1930 года. Несколько позднее эта проблема привлекла внимание Н.Н. Давиденкова [15] и долгое время оставалась в поле зрения представителей его школы. Более того, с хрупким разрушением стали связывать факт утраты

пластичности при высокоскоростном ударе [23]. Так, например, Ф.Ф. Витман экспериментально установил, что при скорости удара 50 мс^{-1} по образцу из отожженной стали 20 в месте возникновения хрупкой трещины пластическая деформация уменьшилась до нуля. В то же время современными методами анализа выявлено, что применяемые в технике металлические материалы нельзя отнести к идеально хрупким при любой совокупности условий нагружения – процесс разрушения всегда сопровождается пластической деформацией [24 и 25].

Сложность методики проведения испытаний в условиях охлажденной воздушной среды заключалась прежде всего в том, что на охлаждаемых поверхностях – в результате проявления эффекта вымораживания влаги воздуха – образовывалась «снеговая шуба». Это, в свою очередь, приводило к искажению получаемых результатов и, понятно, вызывало сомнение в их достоверности.

Оригинальными приемами удалось не только устранить влияние указанного неблагоприятного фактора (имеется ряд других сложностей), но и добиться приемлемого расхода хладагента – длительность испытаний велика, особенно при переходе в область низких температур. При этом колебание температуры в криокамере относительно заданной в течение проведения опыта было в пределах 3 %. На каждое фиксирование значения температуры производилось три испытания. В случае, если разброс по весовому износу превышал 5 % относительно среднего арифметического, то число испытаний доводилось до пяти. На графиках в виде фиксированных точек представлены средние арифметические значения. Помимо прочего заметим, что максимальную достоверность по износу дает взвешивание – фиксируется потеря массы. Вместе с тем при сравнении абразивной износостойкости сплавов различного удельного веса желательнее оперировать параметрами объема (кубический миллиметр). Интенсивность изнашивания, скорость изнашивания (мгновенная, средняя) и другие производные используются для интерпретации в зависимости от цели и задач конкретного исследования.

В качестве резюме отметим, что в предисловии «Многоуровневая природа разрушения:

концепции, модели, эксперименты» к тематическому выпуску журнала «Физическая мезомеханика» (2015. – № 5. – С. 4) его редакторы проф. F. Berto и акад. РАН В. Панин подчеркивают: «Понимание явления разрушения связано с изучением различных форм диссипации энергии, микроскопических свойств и их взаимодействием с макроскопическими параметрами, что представляет собой сложную, но актуальную задачу».

Заключение

Полученные результаты позволяют прояснить металлофизическую и механическую природу абразивного низкотемпературного изнашивания углеродистых сталей доэвтектоидного и заэвтектоидного состава (ферритоперлитных и перлитоцементитных). Поэтому вопросу в настоящее время существует ряд противоречивых представлений. Концепцией красноярских исследователей (Горюшкин, Ковальчук, Титовские, Тарасов) утверждается, что с понижением температуры абразивная износостойкость металлических материалов снижается. Однако результаты исследований Когана и Ангеловой (СФТИ при ТГУ) при близкой схеме износных испытаний устанавливают совершенно противоположный факт. Помимо этого существует точка зрения московских ученых (Тылкин, Суслов) о практической независимости абразивной износостойкости от уровня задаваемого охлаждения. Проведенные нами исследования позволяют утверждать, что на закономерности абразивного низкотемпературного изнашивания углеродистых сталей помимо температуры одновременно оказывает влияние схема абразивного воздействия, а также ряд других факторов, например скорость и характер приложения нагрузки. Более того, на сопротивляемость углеродистых сталей абразивному разрушению следует влиять, как это показывают результаты физико-механического анализа, через упрочняющее воздействие на ферритную основу и карбидную фазу. Такое упрочнение осуществляется в основном термообработкой и легированием.

Список литературы

1. Поисковые исследования повышения надежности металлоконструкций ответственного назначения, работающих в условиях экстремальных нагрузок и низких климатических температур / Ю.Н. Сараев, С.В. Гладковский, Н.И. Голиков и др. // Научные технологии в проектах РФФ. Сибирь / под ред. С.Г. Псахье и Ю.П. Шаркеева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2017. – Гл. 5. – С. 134–202. – ISBN 978-5-89503-607-5.
2. Махутов Н.А., Москвичев В.В., Фомин В.Н. Создание техники северного исполнения – проблема социально-экономического развития восточных регионов России // Вестник РАН. – 2015. – Т. 85, № 2. – С. 155–163. – doi: 10.7868/S0869587315020097.
3. К вопросу построения дорожной карты отечественного арктического материаловедения. Ч. 1 / В.М. Бузник, Н.П. Бурковская, И.В. Зибарева, Р.Н. Черепанин // Материаловедение. – 2017. – № 4. – С. 8–16.
4. К вопросу построения дорожной карты отечественного арктического материаловедения. Ч. 2 / В.М. Бузник, Н.П. Бурковская, И.В. Зибарева, Р.Н. Черепанин // Материаловедение. – 2017. – № 5. – С. 22–28.
5. Научно-методические основы дефектоскопии, диагностики и мониторинга состояний материалов и технических систем / М.А. Махутов, М.М. Гаденин, В.В. Иванов, П.В. Миодушевский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – № 10. – С. 47–56.
6. Кащеев В.Н. К методике определения абразивной износостойкости металлов при низких температурах // Тезисы докладов и сообщений Всесоюзной научно-технической конференции «Работоспособность машин и конструкций в условиях низких температур. Хладостойкость материалов». – Якутск: ИФТПС ЯФ СО АН СССР, 1973. – С. 22–23.
7. Kleis J. Probleme der Bestimmung des Strahlverschleisses bei metallen // Wear. – 1969. – Vol. 13, iss. 3. – P. 199–215. – doi: 10.1016/0043-1648(69)90151-3.
8. The physical mechanism of the formation of metal microspheres in the wear process / J. Kleis, U. Muiste, U. Pilvre, H. Uemois, H. Uetz // Wear. – 1979. – Vol. 53, iss. 1. – P. 79–85. – doi: 10.1016/0043-1648(79)90218-7.
9. Ишлинский А.Ю. Классическая механика и силы инерции. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
10. Патент 1237951 СССР. Установка для исследования ударного абразивного воздействия на образцы / В.Н. Кащеев, А.Н. Солод, Э.Л. Вольф. – Оpubл. 15.06.1986.

11. *Клейс И.Р.* Об изнашивании металлов в абразивной струе // Труды Таллинского политехнического института. – Таллин, 1959. – № 168. – С. 3–27.
12. *Ларионов В.П., Ковальчук В.А.* Хладостойкость и износ деталей машин и сварных соединений. – Новосибирск: Наука, 1976. – 206 с.
13. *Кузнецов В.Д., Добровидов А.Н.* Хрупкость рельсов при низких температурах и способы ее уменьшения // Сталь. – 1930. – № 3–4. – С. 86–87.
14. *Кузнецов В.Д.* Хрупкость металлов // Техническая энциклопедия. – М., 1934. – Т. 25. – С. 621–626.
15. *Давиденков Н.Н.* О хрупком разрушении // Вопросы машиноведения. – М., 1950. – С. 467–474.
16. *Екобори Т.* Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. – М.: Металлургия, 1971. – 264 с.
17. *Глезер А.М.* О соотношении прочности и пластичности металлических материалов // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 1. – С. 2.
18. *Кащеев В.Н.* Абразивное разрушение твердых тел. – М.: Наука, 1970. – 247 с.
19. *Кащеев В.Н.* Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 213 с.
20. *Хрущев М.М., Бабичев М.А.* Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 251 с.
21. *Кащеев В.Н., Вольф Э.Л.* Изнашивание потоком частиц стальной поверхности и ее температура // Трение и износ. – 1982. – № 4. – С. 655–660.
22. *Sorokin G.M., Malyshev V.N.* Methods of choosing high-strengthened and wear-resistant steels on a complex of mechanical characteristics // New tribological ways / ed. by T. Ghrib. – Intech Open, 2011. – P. 197–218. – ISBN 978-953-206-7.
23. *Давиденков Н.Н.* Проблема удара в материаловедении. – М.: Изд-во АН СССР, 1938. – 116 с.
24. *Черепанов Г.П.* Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
25. *Liebowitz H.* Fracture. An advanced treatise. Vol. 6. Fracture of metals. – New York; London: Academic Press Publ., 1969. – 506 p. – ISBN 10: 0124497063. – ISBN 13: 9780124497061.

Конфликт интересов

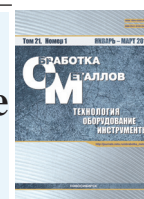
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Physical and Mechanical Aspects of Abrasive Wear of Steels in a Cooled Air Environment

I-Kan An^{1, a}, *Ernst Wolf*^{1, b}, *Yurii Saraev*^{2, c, *}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

² Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, 2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a <http://orcid.org/0000-0002-4721-7333>, igwan@sibmail.com, ^b <http://orcid.org/0000-0003-0121-8290>, volfernst@tpu.ru,

^c <http://orcid.org/0000-0002-9457-4309>, litsin@ispms.tsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 09 November 2018

Revised: 31 January 2019

Accepted: 11 February 2019

Available online: 15 March 2019

Keywords:

Abrasive wear

Low-temperature air environment steels

Wear patterns

Wear test schemes

Funding

The work is carried out within the framework of an agreement on scientific and technical cooperation between NI TPU, ISPMS SB RAS, IFTPS SB RAS, IMASH UB RAS and fundamental scientific research programs of state academies of sciences for 2013-2020, project III.23.2.1.

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the issues discussed in the paper is due to the strategy of development of economically promising regions of Russia, which are characterized by severe climatic conditions. This leads primarily to adverse effects on the material parts of the equipment operated by climatically low temperatures. Failure of parts and often assemblies is most often associated with its wear, which intensity, as a rule, increases when exposed to negative temperatures (low-temperature processes are usually attributed to processes occurring at temperatures below 273 K). The most destructive, in terms of the impact on the performance of these elements of mechanical systems, is its abrasive wear. At the same time, the practice of operation of equipment in Northern conditions showed that the intensity of this type of mechanical wear of parts in friction units is associated with an adverse effect on the physical and mechanical properties, and hence on the wear resistance of cooled air steels. Therefore, the study of the nature and causes of surface destruction of parts made of steel materials is of both scientific and purely practical interest. Ferrite-perlite is the basis for widely used steels (alloys) and in this context has become the **subject of this study**, associated with the **goal**: “to identify patterns of low-temperature abrasive wear of annealed carbon steels for its use in the development of evidence-based recommendations required in the design of high-wear resistance of metal materials”. This was part 1 of the study. **Methods.** In the scientific and applied research, both analytical methods and experimental wear tests on the installations of the original structures are used (protected by copyright certificates). The concept of kinematic pairs of the fifth class is used as a design model for the estimation of the trajectories and parameters of the sliding of the abrasive grains on the working surface of the accelerator (rotor). **Results and discussion.** Summarizing the results, it is necessary to note the following: **First**, the influence of the scheme of influence of abrasive particles on the wear surface of samples at low temperatures is experimentally recorded. Due to the concave (installation of the type of MCC) or convex (ring method) shape of the wear surface, the scheme of stresses on the destroyed surface of the sample is changed. This can be clearly seen on the wear curves in a cooled air. **Secondly**, the increase in the length of the interphase incoherent boundary in the system α -solid solution-hardening carbide phase (in the annealed state, carbon steels were tested in composition from pre-eutectoid to hypereutectoid) led to an increase in abrasive wear resistance over the entire range of the studied temperatures. At the same time, the indicated phenomenon has a number of features associated with a change in the wear mechanism when overcoming the threshold of cold fracture (from viscous to brittle).

For citation: An I-Kan, Wolf E.L., Saraev Yu.N. Physical and mechanical aspects of abrasive wear of steels in a cooled air environment. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 108–121. doi:10.17212/1994-6309-2019-21.1-108-121. (In Russian).

References

1. Saraev Yu.N., Gladkovsky S.V., Golikov N.I. et al. *Poiskovye issledovaniya povysheniya nadezhnosti metallokonstruktsii otvetstvennogo naznacheniya, rabotayushchikh v usloviyakh ekstremal'nykh nagruzok i nizkikh klimaticheskikh temperatur* [Exploratory studies on improving the reliability of critical-use metal structures operating

* Corresponding author

Saraev Yurii N., D.Sc. (Engineering), Chief Researcher
 Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of
 the RAS,
 2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation
 Tel.: +7 (3222) 492-942, e-mail: litsin@ispms.ru

under extreme loads and low climatic temperatures]. *Naukoemkie tekhnologii v proektakh RNF. Sibir'* [High-Tech Technologies in RSF Projects. Siberia]. Ed. by S.G. Psakh'e and Yu.P. Sharkeev. Tomsk, NTL Publ., 2017, ch. 5, pp. 134–202. ISBN 978-5-89503-607-5.

2. Makhutov N.A., Moskvichev V.V., Fomin V.N. Sozdanie tekhniki severnogo ispolneniya – problema sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya vostochnykh regionov Rossii [Designing machinery for the Arctic: a problem of socioeconomic development of Russia's eastern regions]. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2015, vol. 85, no. 2, pp. 155–163. doi: 10.7868/S0869587315020097. (In Russian).

3. Buznik V.M., Burkovskaya N.P., Zibareva I.V., Cherepanin R.N. K voprosu postroeniya dorozhnoi karty otechestvennogo arkticheskogo materialovedeniya. Ch. 1 [On problem of roadmapping of domestic arctic material science. Pt. 1]. *Materialovedenie = Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, no. 4, pp. 8–16. (In Russian).

4. Buznik V.M., Burkovskaya N.P., Zibareva I.V., Cherepanin R.N. K voprosu postroeniya dorozhnoi karty otechestvennogo arkticheskogo materialovedeniya. Ch. 2 [On problem of roadmapping of domestic arctic material science. Pt. II]. *Materialovedenie = Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, no. 5, pp. 22–28. (In Russian).

5. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Ivanov V.V., Miodushevsky P.V. Nauchno-metodicheskie osnovy defektoskopii, diagnostiki i monitoringa sostoyanii materialov i tekhnicheskikh sistem [Scientific and methodical bases of flaw inspection, diagnostics and monitoring of conditions of the materials and engineering systems]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 2015, no. 10, pp. 47–56.

6. Kashcheev V.N. [To the method of determining the abrasive wear resistance of metals at low temperatures]. *Tezisy dokladov i soobshchenii Vsesoyuznoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Rabotosposobnost' mashin i konstruktсии v usloviyakh nizkikh temperatur. Khladostoikost' materialov"* [Abstracts of the All-Union scientific and technical conference "The efficiency of machines and structures in low temperatures. Cold resistance of materials"]. Yakutsk, 1973, pp. 22–23. (In Russian).

7. Kleis J. Probleme der Bestimmung des Strahlverschleisses bei metallen. *Wear*, 1969, vol. 13, iss. 3, pp. 199–215. doi: 10.1016/0043-1648(69)90151-3.

8. Kleis J., Muiste U., Pilvre U., Uemois H., Uetz H. The physical mechanism of the formation of metal microspheres in the wear process. *Wear*, 1979, vol. 53, iss. 1, pp. 79–85. doi: 10.1016/0043-1648(79)90218-7.

9. Ishlinskii A.Yu. *Klassicheskaya mekhanika i sily inertсии* [Classical mechanics and inertial forces]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 320 p.

10. Kashcheev V.N., Solod A.N., Vol'f E.L. *Ustanovka dlya issledovaniya udarnogo abrazivnogo vozdeistviya na obratzы* [Installation for the study of impact abrasive effects on samples]. Patent SU, no. 1237951, 1986.

11. Kleis I.R. Ob iznashivaniі metallov v abrazivnoi strue [On the wear of metals in the abrasive jet]. *Trudy Tallinskogo politekhnicheskogo instituta* [Proceedings of the Tallinn Polytechnic Institute]. Tallin, 1959, no. 168, pp. 3–27.

12. Larionov V.P., Koval'chuk V.A. *Khladostoikost' i iznos detalei mashin i svarnykh soedinenii* [Cold resistance and wear of machine parts and welded joints]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1976. 206 p.

13. Kuznetsov V.D., Dobrovidov A.N. Khrupkost' rel's pri nizkikh temperaturakh i sposoby ee umen'sheniya [The fragility of rails at low temperatures and ways to reduce it]. *Stal' = Steel in Translation*, 1930, no. 3–4, pp. 86–87. (In Russian).

14. Kuznetsov V.D. Khrupkost' metallov [The fragility of metals]. *Tekhnicheskaya entsiklopediya* [Technical Encyclopedia]. Moscow, 1934, vol. 25, pp. 621–626.

15. Davidenkov N.N. O khrupkom razrushenii [On the fragile destruction]. *Voprosy mashinovedeniya* [Problems of science of machines]. Moscow, 1950, pp. 467–474.

16. Yokobori T. *An interdisciplinary approach to fracture and strength of solids*. Groningen, Wolters-Noordhoff Scientific Publications, 1968 (Russ. ed.: Ekobori T. *Fizika i mekhanika razrusheniya i prochnosti tverdykh tel*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971. 264 p.).

17. Glezer A.M. O sootnoshenii prochnosti i plastichnosti metallicheskih materialov [On relationship of strength and plasticity of metal materials]. *Deformatsiya i razrushenie materialov = Russian metallurgy (Metally)*, 2016, no. 1, p. 2. (In Russian).

18. Kashcheev V.N. *Abrazivnoe razrushenie tverdykh tel* [Abrasive destruction of solids]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 247 p.

19. Kashcheev V.N. *Protsessы v zone friktsionnogo kontakta metallov* [Processes in the zone of frictional contact of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 213 p.



20. Khrushchov M.M., Babichev M.A. *Abrazivnoe iznashivanie* [Abrasive wear]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 251 p.

21. Kashcheev V.N., Vol'f E.L. Iznashivanie potokom chastits stal'noi poverkhnosti i ee temperatura [Wear by a stream of steel surface particles and its temperature]. *Trenie i iznos = Journal of Friction and Wear*, 1982, no. 4, pp. 655–660. (In Russian).

22. Sorokin G.M., Malyshev V.N. Methods of choosing high-strengthened and wear-resistant steels on a complex of mechanical characteristics. *New tribological ways*. Ed. by T. Ghrib. Intech Open, 2011, pp. 197–218. ISBN 978-953-206-7.

23. Davidenkov N.N. *Problema udara v metallovedenii* [The problem of impact in metallurgy]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1938. 116 p.

24. Cherepanov G.P. *Mekhanika khrupkogo razrusheniya* [Mechanics of brittle fracture]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 640 p.

25. Liebowitz H. *Fracture. An advanced treatise*. Vol. 6. *Fracture of metals*. New York, London, Academic Press Publ., 1969. 506 p. ISBN 10: 0124497063. ISBN 13: 9780124497061.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Оформление статьи, подаваемой в научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» должно соответствовать по стилю и содержанию требованиям журнала http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules. Статьи, не соответствующие этим требованиям, отклоняются и не рассматриваются редакционным советом. Кроме того, текст работы должен быть внимательно прочитан всеми авторами (а не одним автором, как это зачастую бывает), так как все авторы несут коллективную ответственность за содержание работы.

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.

Избегайте:

- неряшливости, например, многочисленных опечаток, небрежного стиля, маленьких иллюстраций, уравнений с ошибками и др.;

- длинного текста (абзаца), содержащего избыточные высказывания.

Научная статья должна иметь структуру **IMRAD (Introduction, Methods, Results And Discussion)**:

- название (*Title*);

- аннотация (*Abstract*);

- введение (*Introduction*);

- методы (*Methods*);

- результаты (*Results*);

- обсуждение (*Discussion*);

- заключение (*Conclusion*);

- благодарности, финансирование (*Acknowledgements / Funding*);

- список литературы (*References*).

ЗАГЛАВИЕ

Название должно отражать основную идею выполненного исследования и быть по возможности кратким.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Полный список авторов с указанием ФИО. Полностью должны быть написаны имя и фамилия автора (ов). Ниже – полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны. Для каждого из авторов обязательно указываются его уникальный идентификационный код *ORCID (Open Researcher and Contributor ID)* и электронная почта (*e-mail*). Если отсутствует *ORCID*, то необходимо пройти по ссылке <https://orcid.org/> и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Указывается индекс универсальной десятичной классификации (УДК). Для англоязычной части статьи УДК указывать не надо.

Ключевые слова

Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний) должны отображать и покрывать содержание работы. Ключевые слова служат профилем вашей работы для баз данных.

АННОТАЦИЯ (РЕФЕРАТ)

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть 200...250 слов. **Объем аннотации/реферата на английском языке должен быть не менее 250 слов!** Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Авторами указывается примерная ссылка согласно ГОСТ Р 7.05–2008 «Библиографическая ссылка» на будущую работу в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.

АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ

Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ СТАТЬИ

ВВЕДЕНИЕ

Раздел «Введение» должен быть использован для того, чтобы определить место вашей работы (подход, данные или анализ). Подразумевается, что существует нерешенная или новая научная проблема, которая рассматривается в вашей работе. В связи с этим в разделе следует представить краткий, но достаточно информированный литературный обзор (до 2 стр.) по состоянию обозначенной проблемы. 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.

МЕТОДЫ / МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

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).

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 прочее; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты

Раздел, содержащий краткое описание полученных экспериментальных и/или теоретических данных. Изложение результатов должно заключаться в выявлении обнаруженных закономерностей, а не в механическом пересказе содержания таблиц и графиков. Результаты рекомендуется излагать в прошедшем времени. Обсуждение должно содержать интерпретацию полученных результатов исследования (соответствие результатов гипотезе исследования, обобщение результатов исследования, предложения по практическому применению, предложения по направлению будущих исследований).

Рекомендации, перечисленные выше, 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 выявления причинно-следственных связей не украшают работу.

Сравнение ваших числовых результатов с числовыми результатами, полученными кем-то другим, может быть информативным. Однако оно ничего не доказывает. Контроль при помощи сравнения с общеизвестными решениями и проверка при помощи сравнения с экспериментальными данными являются обязательными.

Обсуждение

Необходимо использовать этот раздел, для того чтобы в полном объеме объяснить значимость вашего подхода, данных или анализа и результатов, а также для упорядочения и интерпретации результатов. Цель данного раздела – показать, какие знания были получены в результате вашей работы, и обозначить 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. Обязанностью автора является упорядочение данных и систематическое представление результатов. Так, простой отчет о результатах испытаний без попытки исследовать внутренние механизмы не имеет большой ценности.

ВЫВОДЫ

Этот раздел обычно начинается с нескольких фраз, подводящих итог проделанной работе, а затем в виде списка представляются основные выводы. Следует быть лаконичным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список цитируемой литературы включает в себя источники, содержащие материалы, которые автор использовал при написании статьи, и оформляется по образцам, приведенным ниже. Состав литературных источников должен отражать состояние научных исследований в разных странах в рассматриваемой проблемной области. Ссылки должны быть доступны научной общественности, поэтому приветствуется наличие *DOI* публикации. Количество литературных ссылок должно быть не менее 20 с большей (более 50 %) долей зарубежных источников. Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, например, [1] или [2–5]. Нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. Ссылки на авторефераты диссертаций, диссертации на соискание ученой степени допускаются при наличии их доступных электронных версий. Ссылки на учебники, учебные пособия, монографии должны иметь подчиненное значение и составлять не более 10–15 %, поскольку малодоступны

широкой научной общественности. Ссылки на неопубликованные работы недопустимы. Самоцитирование не должно превышать 15–17 %. Если работа была издана и на русском, и на английском языке (или других), то в **Списке литературы** и в *References* лучше давать ссылку на переводную работу. В связи с вхождением журнала в базы цитирования научных публикаций помимо традиционного списка литературы (ГОСТ 7.0.5–2008) необходим дополнительный список с переводом русскоязычных источников на латиницу и английский язык. Применяется транслитерация строго по системе **BSI** (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>). Правила оформления англоязычного блока статьи представлены на сайте журнала в разделе «Правила оформления» http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторам необходимо указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) ...».

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем считается авторами значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

В этом разделе необходимо указать наличие так называемого конфликта интересов, т. е. условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т.д.). При отсутствии таковых следует использовать следующую формулировку: «**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов**» (соответственно в англоязычной части необходимо использовать следующую формулировку: «**The author declare no conflict of interest**»).

Общие рекомендации по набору текста представлены на сайте в разделе «Правила оформления» http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules.

*Редакция и редакционный совет журнала
«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)»*

ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

(структура, содержание и объем авторского резюме (аннотации) к научным статьям в журнале; фрагменты из работы **О. В. Кирилловой** «**Редакционная подготовка научных журналов для включения в зарубежные индексы цитирования: методические рекомендации.** – Москва, 2012», кандидата технических наук, заведующей отделением ВИНТИ РАН, члена Консультативного совета по формированию контента (Content Selection and Advisory Board – CSAB) SciVerse Scopus, Elsevier)

Авторское резюме должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте авторского резюме. Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения, в авторском резюме не приводятся.

В тексте авторского резюме следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, и избегать сложных грамматических конструкций. В тексте авторского резюме следует применять значимые слова из текста статьи. Текст авторского резюме должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначущих 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 девяти последовательных этапов, каждый из которых представляет собой логическую последовательность мероприятий, обеспечивающих динамику развития системы. Результатом

разработанной автором методики стратегического планирования является предложение перехода к «интерактивному стратегическому менеджменту», который в своей концептуальной основе ориентируется на творческий потенциал всего коллектива и изыскание путей его построения на базе оперативного преодоления ускоряющихся изменений, возрастающей организационной сложности и непредсказуемой изменчивости внешнего окружения.

Это же авторское резюме на английском языке

A considerable part of innovative plans concerning implementation of developments with underlying novelties either do not reach the implementing stage, or in fact yield less benefit than anticipated. One of the reasons of such failures is the fact that the manager lacks real tools for planning, evaluating and controlling innovations. The article brings forward the mechanism for a strategic planning of a company, based on the analysis of both inner company's resources, and outer competitive strength, as well as on searching ways of using external opportunities with account taken of the company's specific character. Strategic planning is based on a code of regulations and procedures containing a series of methods, the use of which makes it possible for company's manager to ensure prompt measures of reaction to outer business environment changes. Such methods include: strategic segmentation; solving problems in real-time mode; diagnostics of strategic readiness to operate in the context of the future; working out a general plan of management; planning of the business position of the firm; strategic transformation of the company. Strategic planning process is presented as a closed cycle consisting of 9 successive stages, each of them represents a logical sequence of measures ensuring the dynamics of system development. The developed by the author strategic planning methods result in the recommendation to proceed to "interactive strategic management" which is conceptually based on the constructive potential of the collective body, on searching ways of its building on the basis of effective overcoming accelerating changes, increasing organizational complexity, and unpredictable changeability of the environment.

Пример структурированного авторского резюме из иностранного журнала в Scopus

Purpose: Because of the large and continuous energetic requirements of brain function, neurometabolic dysfunction is a key pathophysiologic aspect of the epileptic brain. Additionally, neurometabolic dysfunction has many self-propagating features that are typical of epileptogenic processes, that is, where each occurrence makes the likelihood of further mitochondrial and energetic injury more probable. Thus abnormal neurometabolism may be not only a chronic accompaniment of the epileptic brain, but also a direct contributor to epileptogenesis.

Methods: We examine the evidence for neurometabolic dysfunction in epilepsy, integrating human studies of metabolic imaging, electrophysiology, microdialysis, as well as intracranial EEG and neuropathology.

Results: As an approach of noninvasive functional imaging, quantitative magnetic resonance spectroscopic imaging (MRSI) measured abnormalities of mitochondrial and energetic dysfunction (via ^1H or ^{31}P spectroscopy) are related to several pathophysiologic indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative ^{13}C -glucose turnover studies show a profound decrease in neurotransmitter (glutamate-glutamine) cycling relative to oxidation in the sclerotic hippocampus. Increased extracellular glutamate (which has long been associated with increased seizure likelihood) is significantly linked with declining energetics as measured by ^{31}P MR, 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, помните 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, а также имейте 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 одно 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 рефератов для различных типов статей (обзоры, научные статьи, концептуальные статьи, практические статьи):

<http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/abstracts.htm?part=2&PHPSESSID=hdac5rtkb73ae013ofk4g8nrv1>.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Уважаемые Авторы, внимательно ознакомьтесь с правилами оформления статьи на сайте журнала!

ШАБЛОН ДЛЯ ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Синим цветом обозначены пояснения относительно того, что именно и как должно быть написано в данном разделе / подразделе.

После внесения соответствующих правок в разделы статьи необходимо удалить **синие подсказки**. В шаблон следует поместить все материалы и данные, которые, по вашему мнению, должны быть напечатаны в журнале (в том числе рисунки и таблицы). Заполненный шаблон статьи следует сохранить на компьютере и загрузить на сайт журнала.

Структурные особенности плазменных покрытий $V_4C-Ni-P$

(Заглавие статьи на русском языке. Название должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким)

Елена Корниенко^{1, a, *}, Виктор Кузьмин^{2, b}, Александр Сивков^{3, c}





(Полный список авторов с указанием ФИО полностью должны быть написаны Имя и Фамилия автора (ов))



¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

² Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

(Полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны)

^a  <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>,  kornienko_ee@mail.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>,  vikuzmin57@mail.ru,

^c  <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>,  SivkovAA@mail.ru

(Для каждого из авторов ОБЯЗАТЕЛЬНО указываются его уникальный идентификационный код ORCID (Open Researcher and Contributor ID) и электронная почта. Если отсутствует ORCID, то необходимо пройти по ссылке <https://orcid.org/> и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций)

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.71 *(Указывается индекс универсальной десятичной классификации)*

История статьи:

Поступила: 1 июня 2017 *(Дата поступления работы в редакцию. Важно: работа должна поступить не позже, чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.)*

Рецензирование: *(Дата указывается редакцией)*

Принята к печати: *(Дата указывается редакцией)*

Доступно онлайн: *(Дата указывается редакцией)*

Ключевые слова:

Плазменное напыление,

Карбид бора,

$V_4C-Ni-P$,

Покрытие.

(Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний))

АННОТАЦИЯ

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть **200...250 слов**. Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

Для цитирования: Корниенко Е.Е., Кузьмин В.И., Сивков А.А. Структурные особенности плазменных покрытий $V_4C-Ni-P$ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 3 (76). – С. 30–50. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-30-50.

(Авторами указывается примерная ссылка согласно ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка» на будущую работу в данном журнале.

Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

***Адрес для переписки**

Корниенко Елена Евгеньевна, к.т.н., доцент
Новосибирский государственный технический университет
пр. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Россия
Тел.: 8 (383) 346-11-71, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

(Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта!)

Основная часть статьи

1. Введение

До двух страниц краткий обзор литературы по проблеме исследования, указаны нерешенные ранее вопросы, сформулирована и обоснована **цель и задачи** исследований.

2. Методика исследований

Теория (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать повторов, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

3. Результаты и их обсуждение

Раздел, содержащий краткое описание полученных экспериментальных и/или теоретических данных. Изложение результатов должно заключаться в выявлении обнаруженных закономерностей, а не в механическом пересказе содержания таблиц и графиков. Результаты рекомендуется излагать в прошедшем времени. Обсуждение должно содержать интерпретацию полученных результатов исследования (соответствие результатов гипотезе исследования, обобщение результатов исследования, предложения по практическому применению, предложения по направлению будущих исследований).

Рекомендации по набору текста

Текст набирается в русифицированном редакторе Microsoft Word. Формат оригиналов – А4. Старайтесь использовать только следующие шрифты: Times New Roman – для текста, Symbol – для греческих букв. Размер шрифта основного текста – 14 пт, параметры страницы – все поля 2 см. Выравнивание по ширине. Межстрочный интервал полуторный. Абзацный отступ – 1,25 см. Переносы включены. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть включены в текст статьи.

Не используйте более одного пробела – применяйте абзацные отступы и табуляцию.

Не заканчивайте строку нажатием клавиши «Enter» – используйте ее только для начала нового абзаца.

Реализуйте возможности, предоставляемые текстовым редактором: автоматическое создание сносок, автоматический перенос или автоматический запрет переносов, создание списков, автоматический отступ и т.п.

Не набирайте кириллицу сходными по начертанию латинскими буквами, и наоборот.

Буква «ё» везде заменяется на «е», кроме фамилий и особых случаев.

Недопустимо тире «–» заменять дефисом «-».

В тексте и формулах (в том числе в индексах) латинские буквы набираются курсивом, а греческие и русские – прямым шрифтом.

Десятичные цифры в русскоязычных текстах набираются через запятую (0,5), а в англоязычных – через точку (0.25 вместо 0,25).

Рекомендации по набору формул

Формулы, структурные химические формулы и схемы располагаются по месту в тексте статьи.

Знаки *, ', ±, одиночные буквы греческого алфавита, одиночные наклонные или полужирные буквы, одиночные переменные или обозначения, у которых есть только верхний или только нижний индекс, единицы измерения, цифры в тексте, а также простые математические или химические формулы (например, $a^2 + b^2 = c^2$, H_2SO_4) должны набираться в текстовом режиме **без использования редактора формул**.

Выносные математические формулы (оформляемые отдельной строкой) должны набираться с использованием редактора формул (Microsoft Equation). Набор формул из составных элементов, где часть формулы – таблица, часть – текст, часть – внедренная рамка, не допускается.

Для формул, набранных в редакторе формул, должны использоваться общие установки шрифтов, размера символов и их размещения. Их принудительное ручное изменение для отдельных символов или элементов формул не допускается!

Рекомендации по набору таблиц

Таблицы располагаются в тексте рукописи.

Таблицы нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. После номера должно следовать ее **название (на русском и на английском языке!)**.

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблиц по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения. Например: t , °C; V , об.%; HV, МПа и т.п.

Сокращения слов в таблицах не допускаются.

Создавайте таблицы, используя возможности MS Word (Таблица – Добавить таблицу) или MS Excel. Таблицы, набранные вручную с помощью пробелов или табуляций, не могут быть использованы.

Таблица
Table

Данные микрорентгеноспектрального анализа различных участков покрытия
The data of micro-X-ray spectral analysis of various areas of coating

№ участка / No area	Химический элемент, ат. % / Chemical element, at. %				
	Ni	B	C	O	P
1	0.08	86.55	13.03	0.3	0.02
2	57.71	22.73	8.22	2.12	9.22
3	40.37	44.53	10.23	2	2.87
4	49.65	25.69	13.10	3.23	8.33
5	44.26	26.06	7.35	9.36	12.97

Сокращения и аббревиатуры

Следует избегать сокращений. Все имеющиеся в тексте сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

Сокращения из нескольких слов разделяются пробелами (760 мм рт. ст.; т. пл.; пр. гр.), за исключением общеупотребительных (и т.д.; и т.п.; т.е.) и аббревиатур (РФА, КПД и т.п.).

Аббревиатуры или формулы химических соединений, употребляемые как прилагательные, пишутся через дефис: ИК-спектроскопия, ПЭ-пленка, ЖК-состояние, Na^+ -форма, ОН-группа, но группа ОН.

Размерности

Размерности отделяются от цифры пробелом (17,5 моль/м³ (17.5 mol/m³); 77 К; 58 Дж/моль (58 J/mol), 50 м/с², 20 °C, 50 %, 10 ‰), кроме угловых градусов (90°).

Точка после размерностей не ставится (с – секунда, г – грамм, сут – сутки, град – градус). В сложных размерностях обязательно указывается знак умножения (·): Н·м/с или кг/(с·м·Па).

Для сложных размерностей допускается использование как отрицательных степеней: Дж·моль⁻¹·К⁻¹ или J·mol⁻¹·K⁻¹, так и скобок: J/(mol·K) или J·(mol·K)⁻¹, если это облегчает их прочтение.

Главное условие – соблюдение единообразия одинаковых размерностей по статье.

При перечислении, а также в числовых интервалах размерность приводится лишь для последнего числа (10, 15 и 45 мин; от 18 до 20 мм; 30–40 Дж/моль), за исключением угловых градусов: 5° – 10° , а не 5 – 10° .

Размерности переменных пишутся через запятую (E , Дж/моль или E , J/mol), а подлогарифмических величин – в квадратных скобках, без запятой: $\ln t$ [мин].

Точки и пробелы

Точка не ставится после названия статьи, списка авторов, списка организаций, заголовков и подзаголовков, названий таблиц и подрисуночных подписей.

Точка после сокращений не ставится в подстрочных индексах ($T_{\text{пл}}$ – температура плавления).

Ссылки на рисунки и таблицы набираются с пробелами (рис. 5, табл. 2).

Кавычки и скобки не отделяются пробелами от заключенных в них слов: (при 300 К), (а).

Между знаком номера или параграфа и числом должен быть пробел (№ 1; § 5.5).

Числа с буквами в обозначениях набирают без пробелов (IVd; 1.3.14a; рис. 1,а).

В географических координатах широты отделяются пробелами: $56,5^{\circ}\text{C}$ или $56,5^{\circ}\text{N}$; $85,0^{\circ}\text{B}$ или $85,0^{\circ}\text{E}$.

В географических названиях после точки ставится пробел: р. Енисей, г. Новосибирск.

Требования к иллюстрациям

Иллюстрации и подписи к ним располагаются в тексте рукописи.

Иллюстрации нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. В тексте должны быть ссылки на все рисунки.

Под каждым рисунком должна находиться соответствующая подрисуночная подпись (**на русском и на английском языке!**).

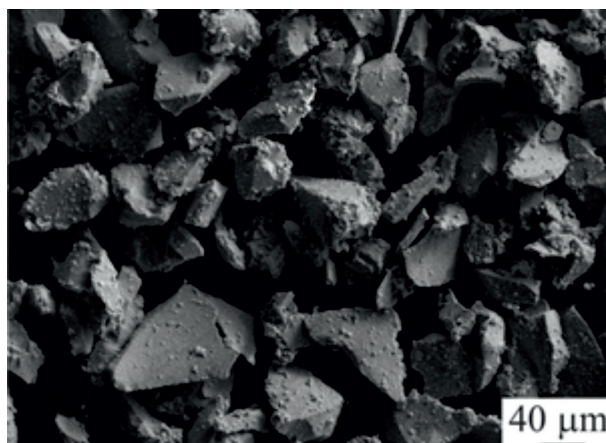


Рис. 1. Внешний вид частиц порошка $\text{B}_4\text{C-Ni-P}$

Fig. 1. The particles of $\text{B}_4\text{C-Ni-P}$ powder

Общие технические требования:

иллюстрации должны иметь размеры, соответствующие их информативности: 8–8,5 см (на одну колонку) либо 17–17,5 см (на две колонки);

надписи и обозначения на иллюстрациях могут меняться между русской и английской версиями при переводе, поэтому для фотографий желательно предоставить второй вариант без текста и всех обозначений, для остальных иллюстраций – располагать надписи на иллюстрации так, чтобы они не соприкасались ни с какими ее частями;

на фотографиях (например, структур) обязательно должны быть указаны размерные метки;

для надписей и обозначений используйте стандартные TrueType шрифты;

просьба не добавлять на задний план иллюстраций серый (цветной) фон или сетки;

графики и диаграммы желательно готовить в векторных графических редакторах:

- должны иметь разрешение не ниже 600 dpi;
- толщина линий должна быть не меньше 0,5 pt;

- векторные иллюстрации не должны содержать точечных закрасок, таких как «Noise» «Black&white noise» «Top noise»;
 - для векторной графики все использованные шрифты должны быть включены в файл.
- Штриховые иллюстрации и полутоновые иллюстрации:
- должны иметь разрешение не ниже 300 dpi;
- комбинированные полутоновые/штриховые иллюстрации:
- должны иметь разрешение не ниже 600 dpi.

4. Выводы

Выводы по результатам работы, описанным в данной статье, должны быть лаконичным.

Список литературы

Список цитируемой литературы включает в себя источники, содержащие материалы, которые автор использовал при написании статьи, и оформляется по образцам, приведенным ниже. Состав литературных источников должен отражать состояние научных исследований в разных странах в рассматриваемой проблемной области.

Ссылки должны быть доступны научной общественности, поэтому приветствуется наличие DOI публикации.

Количество литературных ссылок должно быть не менее 20 с большей (более 50 %) долей зарубежных источников.

Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, например, [1] или [2–5]. Нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте.

Ссылки на авторефераты диссертаций, диссертации на соискание ученой степени допускаются при наличии их доступных электронных версий.

Ссылки на учебники, учебные пособия, монографии должны иметь подчиненное значение и составлять не более 10–15 %, поскольку малодоступны широкой научной общественности.

Ссылки на неопубликованные работы недопустимы.

Самоцитирование не должно превышать 15–17 %.

Если работа была издана и на русском, и на английском языке (или других), то в Списке литературы и в References лучше давать ссылку на переводную работу.

В связи с вхождением журнала в базы цитирования научных публикаций помимо традиционного списка литературы (ГОСТ 7.0.5-2008) необходим дополнительный список с переводом русскоязычных источников на латиницу и английский язык. Применяется транслитерация строго по системе BSI (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>).

Финансирование

Указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) ...».

Конфликт интересов

Указать наличие так называемого конфликта интересов, т. е. условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т.д.). При отсутствии таковых использовать следующую формулировку: «**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов**».

Выражение признательности

Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем авторы статьи считают его значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).

Англоязычный блок статьи

Structure features of B₄C-Ni-P plasma coatings

(Заглавие статьи на английском языке. Название должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким)

Elena Kornienko^{1, a, *}, *Viktor Kuz'min*^{2, b}, *Alexander Sivkov*^{3, c}

(Полный список авторов с указанием ФИО. Полностью должны быть написаны Имя и Фамилия автора (ов))

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

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

³ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

(Полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны)

^a <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, kornienko_ee@mail.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, vikuzmin57@mail.ru,

^c <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>, SivkovAA@mail.ru

(Для каждого из авторов ОБЯЗАТЕЛЬНО указывается его уникальный идентификационный код ORCID (Open Researcher and Contributor ID) и электронная почта. Если отсутствует ORCID, то необходимо пройти по ссылке <https://orcid.org/> и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций.)

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 1 June 2017 (Дата поступления работы в редакцию. Важно: Работа должна поступить не позже, чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.)

Revised: (Дата указывается редакцией)

Accepted: (Дата указывается редакцией)

Available online: (Дата указывается редакцией)

Keywords:

Plasma spraying

Boron carbide

B₄C-Ni-P

Coating

(Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний))

ABSTRACT

Аннотация к статье **на английском языке** должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть **не менее 250 слов**. Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

For citation: Kornienko E.E., Kuz'min V.I., Sivkov A.A. Structure Features of B₄C-Ni-P Plasma Coatings. *Obработка metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2017. no. 3 (76), pp. 30–50. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-30-50. (in Russian)

(Авторами указывается примерная ссылка на будущую работу в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта)

* Corresponding author

Kornienko Elena E., Ph.D. (Engineering), Associate Professor

Novosibirsk State Technical University,

20 Prospekt K. Marksa,

630073, Novosibirsk, Russian Federation

Tel.: 8 (383) 346-11-71, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

(Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта!)

References

(Список используемой литературы на английском языке подготавливается согласно правилам, представленным на сайте журнала)

Funding (Финансирование)

Указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) ...».

Conflicts of Interest (Конфликт интересов)

(Указать наличие так называемого конфликта интересов, то есть условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т.д.). При отсутствии таковых использовать следующую формулировку: «The author declare no conflict of interest».)

Acknowledgements (Выражение признательности)

(Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем считается авторами значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).)

Сведения для РИНЦ

Раздел МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

(Авторами указывается примерный раздел, в котором будет опубликована работа в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

¹Корниенко Елена Евгеньевна, ²Кузьмин Виктор Иванович, ³Сивков Александр Анатольевич

¹Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

²Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

³Томский политехнический университет,
проспект Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

Корниенко Е.Е. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

Кузьмин В.И. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, e-mail: vikuzmin57@mail.ru

Сивков А.А. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>, e-mail: SivkovAA@mail.ru

Структурные особенности плазменных покрытий В₄С-Ni-P

Аннотация

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть 200...250 слов). Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

УДК 621.793.71

Ключевые слова:

плазменное напыление, карбид бора, В₄С-Ni-P, покрытие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бор в ядерной технике / В.Д. Рисованный, А.В. Захаров, Е.П. Клочков, Т.М. Гусева. – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2011. – 668 с. ISBN 5-9483-016-7.

2. Fabrication and Tribological Evaluation of Vacuum Plasma-Sprayed В₄С / Н. Zhu, Y. Niu, С. Lin, L. Huang, Н. Ji, X. Zheng // Coating Journal of Thermal Spray Technology. – 2012. – Vol. 21. – Iss. 6. – P. 1216-1223. – doi: 10.1007/s11666-012-9815-5.

(Список литературы оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка». Количество литературных ссылок должно быть не менее 20 с большей (более 50%) долей зарубежных источников.)

Финансирование статьи:

Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

Дата поступления: 01.06.2017 (Дата поступления работы в редакцию. Важно: Работа должна поступить не позже, чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.)

Раздел **MATERIAL SCIENCE**

(Авторами указывается примерный раздел, в котором будет опубликована работа в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

¹ Kornienko Elena E., ² Kuz'min Viktor I., ³ Sivkov Alexander A.

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

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

³ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Kornienko E.E. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

Kuz'min V.I. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, e-mail: vikuzmin57@mail.ru

Sivkov A.A. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>, e-mail: SivkovAA@mail.ru.

Structure features of B₄C-Ni-P plasma coatings

Аннотация к статье **на английском языке** должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть не **менее 250 слов**). Аннотация должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

Keywords:

Plasma spraying, Boron carbide, B₄C-Ni-P, Coating

ОБРАБОТКА

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

О МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» – рецензируемый научно-технический и производственный журнал, издающийся с 1999 года с периодичностью 4 раза в год.

В журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения, материаловедения и современной металлургии. Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. **Публикация статей бесплатная.**

Журнал предназначен для профессорско-преподавательского состава и научных работников высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников производственных предприятий и проектных организаций.

Присутствуют разделы: «Технология», «Оборудование», «Инструменты», «Материаловедение», «Научно-техническая информация» и др.



В 2017 году журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» вошел в индекс цитирования *Emerging Sources Citation Index (ESCI) базы Web of Science*. Журналы, представленные в индексе цитирования *ESCI*, отвечают большинству базовых критериев *Core Collection* и расцениваются компанией *Clarivate Analytics* как наиболее влиятельные и востребованные издания, имеющие большую вероятность высокого научного интереса.



Полный текст журнала «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» можно найти в базах данных компании EBSCO Publishing на платформе EBSCOhost. EBSCO Publishing является ведущим мировым агрегатором научных и популярных изданий, а также электронных и аудиокниг.



Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

Правила представления статей для публикации и другая информация о журнале размещены на сайте научного издания:



http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, корп. 5, к. 137 ВЦ



+7 (383) 346-17-75



metal_working@mail.ru
metal_working@corp.nstu.ru

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-23961 от 05 апреля 2006 г.

Print ISSN: 1994-6309 Online ISSN: 2541-819X

Индекс журнала в каталоге агентства «Роспечать» – 70590



НОВОСИБИРСК

РАСПРОСТРАНЕНИЕ

Структура распространения:

- по подписке (Индекс в каталоге агентства «Роспечать» – 70590);
- адресная почтовая рассылка авторам статей, по промышленным предприятиям, научным и учебным заведениям России;
- на выставках, конференциях.

Регионы распространения:

- Сибирь, Алтай, Дальний Восток – 60 %;
- Урал, Европейская часть РФ – 40 %.

Структура читательской аудитории

Преподаватели учебных заведений и научные сотрудники	64 %
Руководители (инжиниринговых предприятий, фирм-разработчиков и др.)	8 %
Ведущие специалисты предприятий (главные инженеры, технологи, конструкторы и т.д.)	11 %
Инженерно-технический состав предприятий и организаций	17 %

С 2015 г. опубликованным в журнале статьям присваивается цифровой идентификатор - *Digital Object Identifier (DOI)*. Метаданные каждой работы обязательно регистрируются в международном реестре научно-информационных материалов *CrossRef*.

Журнал индексируется в зарубежных базах данных и агрегаторах:

- Emerging Sources Citation Index (ESCI) Web of Science Core Collection;
- EBSCO (core) в базе «Applied Science & Technology Source Ultimate»;
- Ulrich's Periodicals Directory;
- ICI Journals Master List
- WorldCat;
- The European Library;
- AcademicKeys;
- Research Bible.

Журнал представлен:

- сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov;
- база данных eLibrary.ru, журнал индексируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);
- реферативный журнал и база данных ВИНТИ;

- электронно-библиотечная система издательства «ЛАНЬ»;
- национальный цифровой ресурс «РУКОНТ».


График выхода журнала в течение текущего года


Номер	Выход (число, месяц)
1	15.03
2	15.06
3	15.09
4	15.12

Адрес редакции журнала:

630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, к. 137 ВЦ, зам. гл. редактора – В. Ю. Скиба.

 http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

 +7 (383) 346-17-75

 metal_working@mail.ru
metal_working@corp.nstu.ru




МЕРОПРИЯТИЯ

С 2014 г. научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» является организатором ежегодной (третья декада марта) Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении»/ «Actual Problems in Machine Building» совместно с «ИТЕ Сибирь» в рамках Международной выставки оборудования для металлообработки и сварки Mashex Siberia. По результатам конференции издается сборник материалов конференции.

Тематика работы конференции:

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

Официальный сайт конференции:

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

