

# ОБРАБОТКА

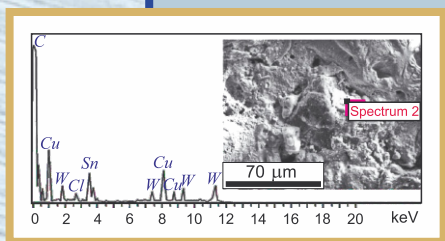
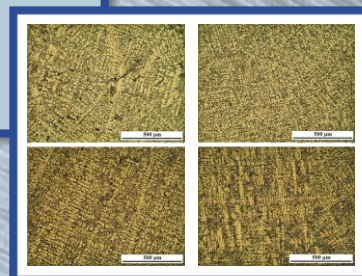
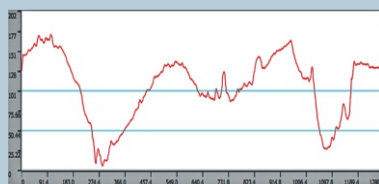
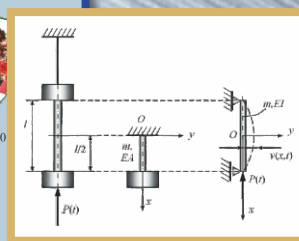
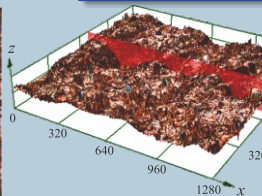
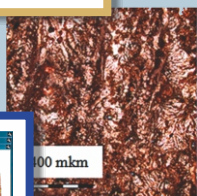
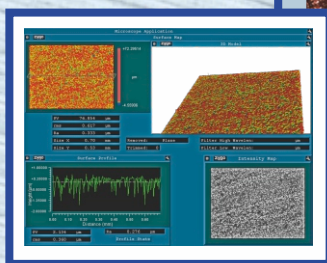
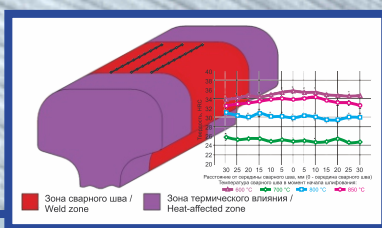
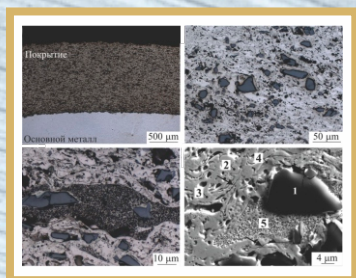
ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

# МЕТАЛЛОВ

## ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

№ 3 (76) ИЮЛЬ–СЕНТЯБРЬ 2017 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



НОВОСИБИРСК



## Уважаемые коллеги!

Научно-технический и производственный журнал «*Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)*» основан в 2001 г. За 17 лет в нем опубликовано порядка 800 работ, являющихся результатом научных исследований широкого круга профессионалов – докторов и кандидатов наук, производственников и аспирантов. Опубликованные статьи отражают проблемы и перспективы развития инновационных технологий в машиностроении, методов создания и исследования новых и традиционных материалов.

Цель журнала – посредством оперативной и достоверной информации помочь специалистам ориентироваться в многообразии новых технических решений и концепций, предлагаемых наукой и практикой. Страницы журнала – своеобразная трибуна, предоставляющая возможность специалистам поделиться опытом и результатами исследований.

В журнале присутствуют следующие разделы: «Технология», «Оборудование. Инструменты», «Материаловедение», «Материалы конференции», «Научно-техническая информация» и др. Все содержание журнала, кроме рекламных и редакционных материалов, четко обозначенных как таковые, проходит обязательное рецензирование независимыми экспертами. Предпочтительным является двойное слепое рецензирование. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Публикация статей бесплатная.

В состав редакционного совета входят 19 докторов технических наук и один кандидат технических наук. Шесть докторов наук представляют следующие иностранные государства: Федеративная Республика Бразилия; Федеративная Республика Германия; Республика Беларусь; Украина. 12 докторов наук и один кандидат наук представляют Российскую Федерацию.


Начиная с 2012 года, редакцией ведется работа по подготовке журнала по международным стандартам для его вывода в глобальные индексы цитирования. Редакционная команда журнала в своей деятельности руководствуется принципами: научная значимость, объективность, профессионализм и беспристрастность.

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.

В целях расширения и укрепления связей между образованием, наукой и производством приглашаем Вас для совместного участия в работе журнала: написание статей и ежегодного участия в Международной научно-практической конференции «*Актуальные проблемы в машиностроении*». Взаимодействие с авторами основывается на принципах справедливости, вежливости, объективности, честности и прозрачности.

Редакция журнала «*Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)*»

 [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)

 +7 (383) 346-17-75

 [metal\\_working@mail.ru](mailto:metal_working@mail.ru)

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

№ 3 (76) ИЮЛЬ–СЕНТЯБРЬ 2017 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

## 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 РАН, 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, **Рахимьянов 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, БрГУ, г. Братск

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 вошел в список рекомендованных к включению в **Перечень рецензируемых научных изданий**, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в соответствии с требованиями приказа Минобрнауки России от 25 июля 2014 г. № 793, с изменениями, внесенными приказом Минобрнауки России от 03 июня 2015 г. № 560

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 НПП 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

## ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

## ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. 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. (383) 346-17-75

Сайт журнала [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)  
E-mail: [metal\\_working@mail.ru](mailto:metal_working@mail.ru)

Цена свободная

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.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНОЛОГИЯ

<b>Сапрыкина Н.А.</b> Анализ, моделирование и прогнозирование шероховатости поверхности меди, полученной методом селективного лазерного плавления.....	6
<b>Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Скиба В.Ю., Гартфельдер В.А., Секлетина Л.С.</b> Повышение эффективности алмазного инструмента на металлической связке при шлифовании высокопрочных материалов.....	17
<b>Ильиных А.С., Галай М.С., Сидоров Э.С.</b> Исследование сварных соединений рельсов после механической обработки при различной послесварочной температуре.....	28

### ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

<b>Атапин В.Г.</b> Динамическая потеря устойчивости тяги рулевого устройства самолета при технологических испытаниях.....	35
---	----

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<b>Корниенко Е.Е., Кузьмин В.И., Ложкин В.С., Гуляев И.П., Сивков А.А., Ивашутенко А.С., Рахматуллин И.А., Сергачев Д.В., Безрукова В.А.</b> Структурные особенности плазменных покрытий $V_4C-Ni-P$ .....	42
<b>Мартюшев Н.В., Зыкова А.П., Башев В.С.</b> Модифицирование сплава марки АК12 частицами ультрадисперсного порошка вольфрама.....	51
Рекомендации по написанию научной статьи .....	59
Подготовка аннотации .....	62
Правила для авторов .....	65

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 05.09.2017. Выход в свет 15.09.2017. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
 Усл. печ.л. 9. Уч.-изд. л. 16,74. Изд. № 222. Заказ 1084. 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)

**Journal no. 3 (76) Jule–September 2017**

## *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 magazine is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year

Data on the magazine 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.

Edition address: Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,  
Novosibirsk, 630073, Russia  
Tel.: (383) 346-17-75  
[http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)  
E-mail: [metal\\_working@mail.ru](mailto:metal_working@mail.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,  
Machine-Building Faculty,  
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,  
Bratsk State University, *Bratsk*



## CONTENTS

### TECHNOLOGY

<b>Saprykina N.A.</b> Analysis, Modeling and Prediction of Surface Roughness of Copper, Obtained by Selective Laser Melting.....	6
<b>Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Skeebe V.Yu., Gartfelder V.A., Sekletina L.S.</b> Enhancing the Effectiveness of the Diamond Metal Bond Instrument when Grinding High-Strength Materials.....	17
<b>Ilinykh A.S., Galay M.S., Sidorov E.S.</b> Investigation of Welded Rail Joints after Machining at Different Post-Weld Temperature.....	28

### EQUIPMENT. INSTRUMENTS

<b>Atapin V.G.</b> Dynamic Instability of the Flight Control Connecting Rod in Technological Tests.....	35
---	----

### MATERIAL SCIENCE

<b>Kornienko E.E., Kuz'min V.I., Lozhkin V.S., Gulyaev I.P., Sivkov A.A., Ivashutenko A.S., Rahmatullin I.A., Sergachev D.V., Bezrukova V.A.</b> Structure Features of B <sub>4</sub> C-Ni-P Plasma Coatings.....	42
<b>Martyushev N.V., Zykova A.P., Bashev V.S.</b> Modification of Al-Si Alloys with Particles of Ultrafine Tungsten Powder.....	51
Guidelines for Writing a Scientific Paper .....	59
Abstract requirements .....	62
Rules for authors .....	65



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Анализ, моделирование и прогнозирование шероховатости поверхности меди, полученной методом селективного лазерного плавления

Наталья Сапрыкина<sup>1, а,\*</sup>

<sup>1</sup>Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского Томского политехнического университета, ул. Ленинградская, 26, г. Юрга, 652055, Россия

<sup>а</sup> <http://orcid.org/0000-0002-5874-8287>, [nat\\_anat\\_sapr@mail.ru](mailto:nat_anat_sapr@mail.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.7.044

#### История статьи:

Поступила: 27 апреля 2017  
 Рецензирование: 25 июля 2017  
 Принята к печати: 02 августа 2017  
 Доступно онлайн: 15 сентября 2017

#### Ключевые слова:

Селективное лазерное плавление  
 Режимы плавления  
 Коагуляция  
 Шероховатость  
 Порошковый материал  
 Качество поверхности  
 Качество внутреннего объема

### АННОТАЦИЯ

В отличие от традиционных методов удаления материала технологии быстрого прототипирования направлены на создание сложных изделий путем последовательного добавления материала (материалов). К настоящему времени известно большое количество методов быстрого прототипирования, которые отличаются применяемым материалом и способом формообразования изделия. Инновационным является метод селективного лазерного плавления физической копии различных объектов из металлов, сплавов и металломатричных композитных материалов для удовлетворения требований со стороны аэрокосмической, оборонной, автомобильной и биомедицинской промышленности. Важным направлением развития технологии селективного лазерного плавления является повышение качества формируемого изделия. Это является сложным многопараметрическим процессом, в котором можно выделить порядка 130 параметров, влияющих на конечный результат. В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния защитного газа аргона, механоактивации порошка и воздействия технологических режимов плавления: мощности лазерного излучения, скорости перемещения луча лазера, шага сканирования, предварительной температуры подогрева порошкового материала на шероховатость поверхности, полученной из медного порошкового материала методом селективного лазерного плавления. Эксперименты по плавлению медного порошка реализованы на установке послыйного лазерного плавления оригинальной конструкции, которая позволяет регулировать все технологические режимы плавления. Шероховатость поверхности определена на цифровом бесконтактном микроскопе Olympus LEXT OLS4100. Получена математическая зависимость шероховатости поверхностного слоя из медного порошка от технологических режимов плавления на основе теории планирования эксперимента и статической обработки результатов. Определены значимые параметры режима – мощность лазерного излучения, скорость перемещения луча лазера, шаг сканирования, влияющие на шероховатость слоя, а также пределы ее изменения с 480 до 725 мкм при увеличении мощности с 14 до 30 Вт, скорости перемещения луча лазера 1400 мм/мин, температуре подогрева порошка 114 °С, шаге сканирования 0,2 мм; с 750 до 480 мкм – при увеличении скорости перемещения луча лазера с 200 до 3000 мм/мин, мощности 22 Вт, температуре подогрева порошка 114 °С, шаге сканирования 0,2 мм. Увеличение шага сканирования с 0,1 до 0,3 мм приводит к уменьшению шероховатости с 740 до 525 мкм при скорости перемещения луча лазера 3000 мм/мин, мощности 30 Вт, температуре подогрева порошка 200 °С. Показано положительное влияние защитной атмосферы и механоактивации порошкового материала на качество поверхностного слоя.

**Для цитирования:** Сапрыкина Н.А. Анализ, моделирование и прогнозирование шероховатости поверхности меди, полученной методом селективного лазерного плавления // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 3 (76). – С. 6–16. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-6-16.

## Введение

Первый коммерчески успешный метод аддитивного производства был разработан в 1987 году Карлом Декартом и использован для

изготовления моделей и прототипов [1]. В настоящее время аддитивные технологии являются самыми быстро развивающимися передовыми технологиями в мире. В отличие от традиционных методов удаления материала технологии быстрого прототипирования направлены на создание сложных изделий путем последовательного добавления материала (материалов). К настоящему времени известно большое количество методов быстрого прототипирования, которые отличают-

#### \*Адрес для переписки

Сапрыкина Наталья Анатольевна, к.т.н., доцент  
 Юргинский технологический институт (филиал)  
 ул. Ленинградского, 26, 652055, г. Юрга, Кемеровская обл., Россия  
 E-mail: [nat\\_anat\\_sapr@mail.ru](mailto:nat_anat_sapr@mail.ru)



ся применяемым материалом и способом формообразования изделия. Инновационным является метод селективного лазерного плавления физической копии различных объектов из металлов и сплавов на основе 3D CAD-модели. Объемное изделие создается путем послойного плавления лучом лазера порошкового материала в соответствии с контуром каждого сечения. В последние годы значительно улучшились микроструктурные и механические свойства деталей за счет улучшений условий лазерной обработки (повышение мощности лазера, уменьшение диаметра луча лазера, уменьшение толщины получаемого слоя и т. п.). Несмотря на значительный прогресс, технология селективного лазерного плавления по-прежнему сталкивается с проблемами качества поверхности [2, 3]. Получение поверхности хорошего качества является главным вопросом для предотвращения расслаивания, остаточных напряжений, преждевременного разрушения.

Обзор литературы показал, что мощность лазера и скорость сканирования часто представлены как основные параметры, влияющие на каче-

ство поверхности изделия, полученного методом селективного лазерного спекания [4]. Скорость сканирования, предположили Brecher и соавторы [5], является предпочтительной при назначении режимов плавления. Относительно низкая скорость позволяет обеспечить равномерное плавление порошкового материала, но в результате возникает проблема низкой производительности [6]. Ван и соавторы [7] анализировали влияние скорости и шага сканирования для достижения хорошего качества поверхности. Большое значение уделено влиянию стратегии сканирования. В работе [8] проведены исследования по оценке остаточных напряжений и деформаций при различных стратегиях сканирования для никель-хромового сплава Инконель 718. Описано, что максимальные напряжения вдоль оси  $X$  и  $Y$  наблюдались у образцов со стратегией сканирования по контуру при смещении к центру (рис. 1, з).

Значительные напряжения были образованы при горизонтальной стратегии сканирования (рис. 1, б). У всех образцов возникает напряжение вдоль осей  $X$  и  $Y$  между единичным слоем и

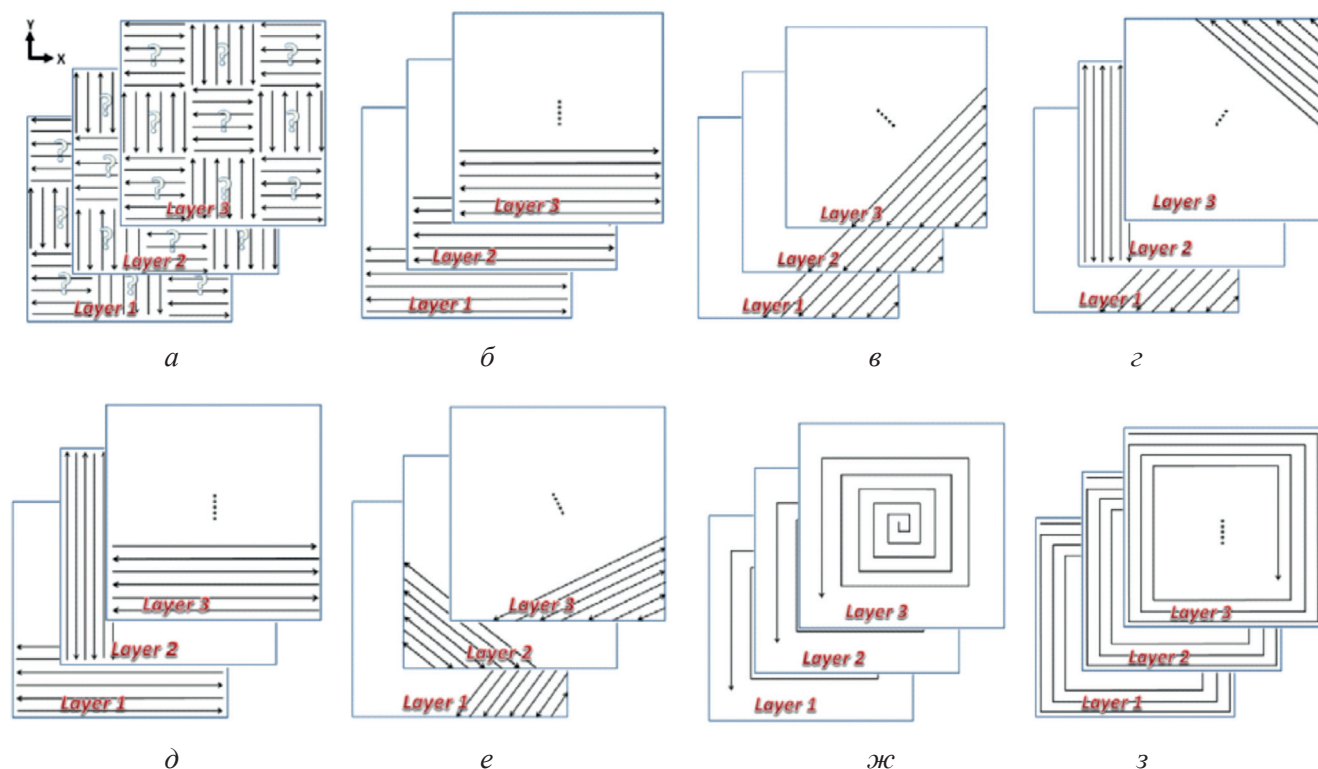


Рис. 1. Стратегии сканирования [8]:

*a* – островная; *б* – горизонтальная; *в* – наклонная 45°; *г* – поворотная 45°; *д* – поворотная 90°; *е* – поворотная 67°; *ж* – по контуру из центра; *з* – по контуру к центру

Fig. 1. Scanning strategies [8]:

*a* – island scanning; *б* – horizontal scanning; *в* – lean scanning (45°); *г* – rotating scanning (45°); *д* – rotating scanning (90°); *е* – rotating scanning (67°); *ж* – by contour from the center; *з* – by contour to the center

подложкой. Отмечено, что при наклонном сканировании под углом  $45^\circ$  у образцов наблюдались незначительные остаточные напряжения и деформации по сравнению с другими стратегиями сканирования (рис. 1, в) [8].

В работе [9] представлены исследования влияния мощности лазера, скорости сканирования, толщины слоя и стратегии сканирования на шероховатость поверхности никель-хром-железо-молибденового сплава HASTELLOY X, полученной методом селективного лазерного плавления. Отмечено, что на шероховатость поверхностного слоя большое влияние оказывает коагуляция. Коагуляцией называется слияние

мелких частиц порошка в более крупные под влиянием лазерного излучения. Наблюдалось снижение коагуляции при уменьшении скорости сканирования, которое обусловлено увеличением времени плавления порошка и снижением вязкости расплава. Увеличение шага сканирования приводит к увеличению шероховатости поверхности. Шероховатость поверхности имеет наименьшее значение  $15 \text{ мкм}$  при мощности лазера  $200 \text{ Вт}$  и скорости сканирования  $3000 \text{ мм/с}$ . Авторами предложено улучшать шероховатость наклонной поверхности за счет контурного сканирования каждого слоя с увеличенной плотностью энергии (рис. 2).

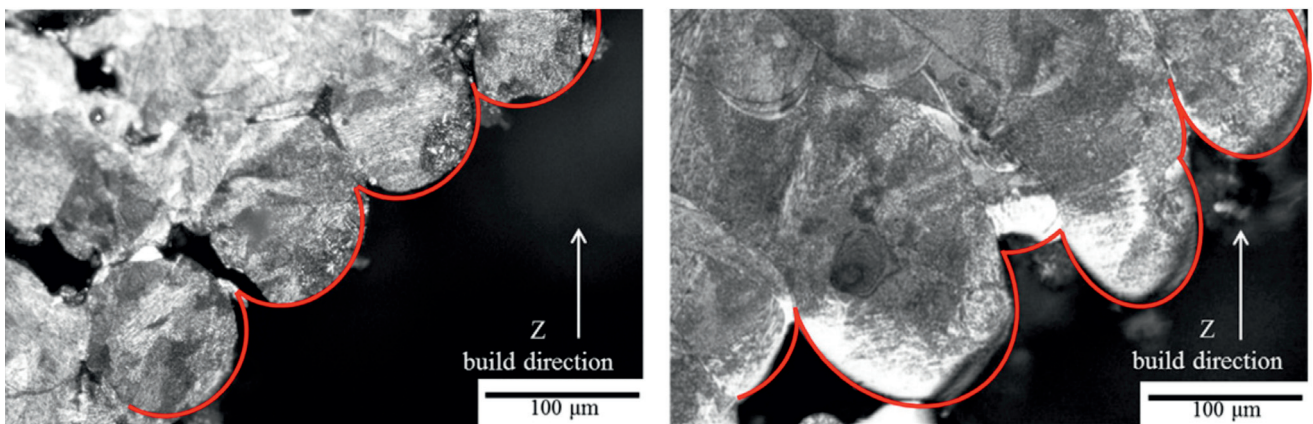


Рис. 2. Фотография наклонной поверхности из сплава HASTELLOY X, полученная на режимах: а – мощность  $200 \text{ Вт}$ , скорость сканирования  $3000 \text{ мм/с}$ ; б – мощность  $370 \text{ Вт}$ , скорость сканирования  $1900 \text{ мм/с}$  [9]

Fig. 2. Images of the leaned surface of the alloy HASTELLOY X, obtained in the modes: а – power  $200 \text{ W}$ , scanning speed  $3000 \text{ mm/s}$ ; б – power  $370 \text{ W}$ , scanning speed  $1900 \text{ mm/s}$  [9]

Анализ литературы показал, что режимы и условия плавления для разных материалов определяются экспериментально и зависят от значительного количества параметров [10, 11, 12]. Цель данной работы – установление пределов, в которых можно изменять шероховатость поверхностного слоя из медного порошка, полученного методом селективного лазерного плавления за счет изменения технологических режимов лазерной обработки.

### Методика экспериментального исследования

Эксперименты по плавлению медного порошка реализованы на установке послыонного лазерного плавления оригинальной конструкции, которая позволяет регулировать все технологические режимы плавления. Устройство яв-

ляется технологическим лазерным комплексом формирования поверхностей изделий сложной пространственной формы, состоящей из иттербиевого волоконного лазера ЛК – 100 – В, трехкоординатного стола, персонального компьютера, системы ЧПУ и оригинального программного обеспечения. Иттербиевый волоконный лазер с длиной волны  $1,07 \text{ мкм}$  позволяют регулировать мощность от  $10$  до  $100 \text{ Вт}$ . Качество и точность изготавливаемых изделий обеспечивают постоянная мощность на выходе и точность фокусировки волоконного лазера. Управление лучом лазера с помощью специальной программы в рабочей зоне размером  $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$  позволяет осуществлять сканирование по любому заданному контуру. На корпусе установки для нанесения слоя порошка в зону плавления закреплена каретка и выравнивающие ролики. Внутри каретки расположен бункер для порошка, позволяющий



регулировать плотность нанесенного слоя. Слой порошка сканируется лучом лазера по необходимой траектории на заданных режимах. После получения единичного слоя стол опускается с помощью шагового двигателя на толщину слоя [13]. С помощью каретки происходит заполнение платформы порошковым материалом для формирования следующего слоя. Цикл повторяется до полного создания изделия, затем стол перемещается в исходное положение и готовая деталь извлекается. Для исключения взаимодействия порошка с кислородом и азотом возможна подача в зону лазерного плавления защитного газа.

Порошок медный стабилизированный находит широкое применение в различных областях промышленности. Частицы порошка имеют сферическую форму с номинальным размером 0,007 мм, насыпной плотностью 1,25...1,9 г/см<sup>3</sup>. Шероховатость слоя определялась на микроскопе OLYMPUS LEXT OLS 4100.

В процессе эксперимента были изменены технологические режимы плавления: мощность лазерного излучения, скорость сканирования, шаг сканирования, температура подогрева порошковой композиции. Были проведены исследования по влиянию защитного газа аргона и механоактивации порошка на шероховатость поверхностного слоя из медного порошка, полученного методом селективного лазерного плавления. Защитная среда позволяет исключить взаимодействие порошковых изделий с кислородом и азотом, а также упрочнить поверхность изделия. Механоактивация применяется для увеличения дисперсности, дефектности кристаллической решетки порошка [14]. Механическая обработка порошка осуществлялась в центробежно-планетарной мельнице АГО-2.

## Результаты и обсуждения

На первом этапе были проведены предварительные поисковые эксперименты для определения приемлемых режимов плавления. Под ними подразумевались режимы, когда единичный слой не рассыпался, т. е. обладал некоторой механической прочностью без значительной деформации. Эксперименты показали, что мощность лазера менее 14 Вт и скорость перемещения луча лазера более 3000 мм/мин являются недостаточными для плавления по-

рошкового материала. Мощность более 30 Вт и скорость менее 200 мм/мин приводит к интенсивному окислению и возгоранию порошка. Шаг сканирования более 0,3 мм не позволяет единичным трекам спечься между собой, что препятствует образованию единичного слоя. Увеличение температуры подогрева порошкового материала оказывает положительное влияние на прочность единичного слоя.

Для установления эмпирической зависимости шероховатости слоя из медного порошка от технологических режимов плавления был поставлен четырехфакторный эксперимент по программе центрального композиционного планирования второго порядка. Для этого реализовали шестнадцать опытов четырехфакторного эксперимента, провели семь опытов в центре плана и дополнили восьмью опытами в «звездных» точках. Для медного порошка были определены следующие диапазоны режимов плавления: мощность излучения  $P = (14...30)$  Вт, скорость перемещения луча лазера  $V = (200...3000)$  мм/мин, шаг сканирования  $s = (0,1...0,3)$  мм; температура подогрева порошковой композиции изменялась в диапазоне  $t = (26...200)$  °С. Шероховатость поверхности определяли на цифровом бесконтактном микроскопе Olympus LEXT OLS4100 (рис. 3).

На рис. 4–9 показано влияние технологических режимов и условий плавления на внешний вид поверхности единичного слоя из медного порошка, полученного методом селективного лазерного плавления.

Влияние мощности лазера на шероховатость поверхности единичного слоя показано на рис. 4. Увеличение мощности с 14 до 30 Вт при  $V = 1600$  мм/мин,  $s = 0,2$  мм приводит к изменению  $R_z$  с 480 до 725 мкм.

Влияние скорости перемещения луча лазера на шероховатость поверхности единичного слоя показано на рис. 5. Увеличение скорости с 200 до 3000 мм/мин при  $P = 22$  Вт,  $s = 0,2$  мм приводит к изменению  $R_z$  с 750 до 480 мкм. На рис. 5, а имеются участки равномерного плавления порошка.

Воздействие температуры подогрева порошкового материала на шероховатость поверхности единичного слоя показано на рис. 6. Увеличение температуры с 20 до 200 °С при  $P = 30$  Вт,  $V = 3000$  мм/мин,  $s = 0,3$  мм приводит к изменению  $R_z$  с 540 до 525 мкм.

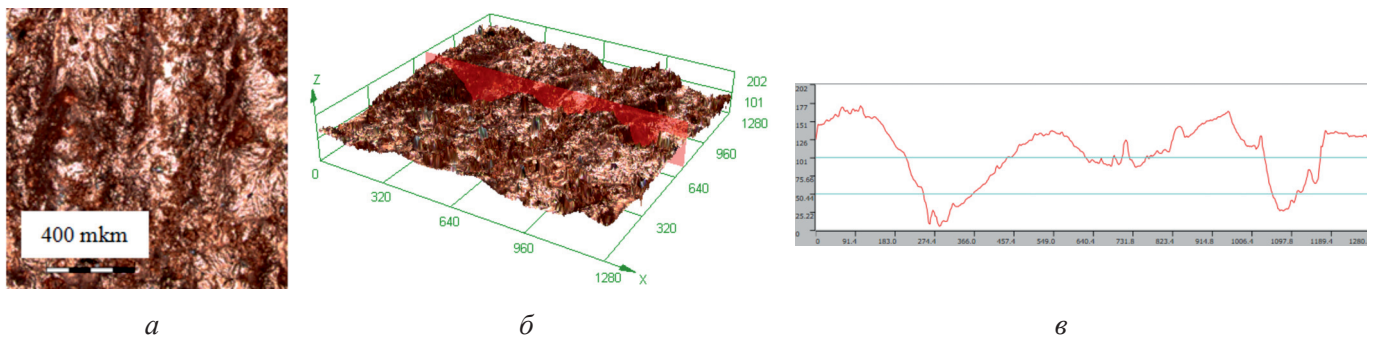


Рис. 3. Определение шероховатости поверхности на микроскопе Olympus LEXT OLS4100:

*a* – фотография единичного слоя из медного порошка, полученного методом селективного плавления на следующих режимах:  $P = 30$  Вт,  $V = 2000$  мм/мин,  $s = 0,2$  мм,  $t = 300$  °С; *б* – сечение профиля поверхности; *в* – профилограмма поверхностного слоя  $R_z$ , мкм

Fig. 3. Determination of surface roughness with the microscope Olympus LEXT OLS4100:

*a* – a photograph of a single layer of copper powder obtained by the selective melting method (x200) in the following modes:  $P = 30$  W,  $V = 2000$  mm/min,  $s = 0.2$  mm,  $t = 300$  °C; *б* – section of the surface profile; *в* – profilogram of the surface layer  $R_z$ , μm

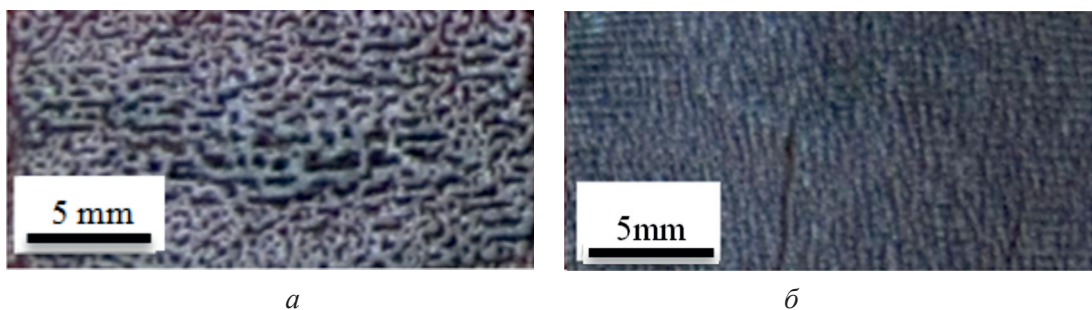


Рис. 4. Фотографии поверхности единичного слоя из медного порошка, полученного методом селективного плавления на режимах:

*a* –  $P = 30$  Вт,  $V = 1600$  мм/мин,  $t = 114$  °С,  $s = 0,2$  мм,  $R_z = 725$  мкм; *б* –  $P = 14$  Вт,  $V = 1600$  мм/мин,  $t = 114$  °С,  $s = 0,2$  мм,  $R_z = 480$  мкм

Fig. 4. Images of the surface of a single layer of copper powder obtained by the selective melting method in the modes:

*a* –  $P = 30$  W,  $V = 1600$  mm/min,  $t = 114$  °C,  $s = 0.2$  mm,  $R_z = 725$  μm; *б* –  $P = 14$  W,  $V = 1600$  mm/min,  $t = 114$  °C,  $s = 0.2$  mm,  $R_z = 480$  μm

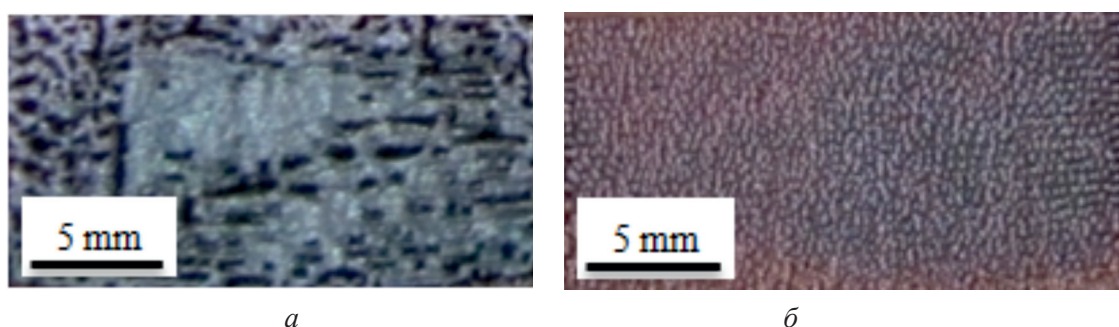


Рис. 5. Фотографии поверхности единичного слоя из медного порошка, полученного методом селективного плавления на режимах:

*a* –  $P = 22$  Вт,  $V = 200$  мм/мин,  $t = 114$  °С,  $s = 0,2$  мм,  $R_z = 750$  мкм; *б* –  $P = 22$  Вт,  $V = 3000$  мм/мин,  $t = 114$  °С,  $s = 0,2$  мм,  $R_z = 480$  мкм

Fig. 5. Images of the surface of a single layer of copper powder obtained by the selective melting method in the modes:

*a* –  $P = 22$  W,  $V = 200$  mm/min,  $t = 114$  °C,  $s = 0.2$  mm,  $R_z = 750$  μm; *б* –  $P = 22$  W,  $V = 3000$  mm/min,  $t = 114$  °C,  $s = 0.2$  mm,  $R_z = 480$  μm

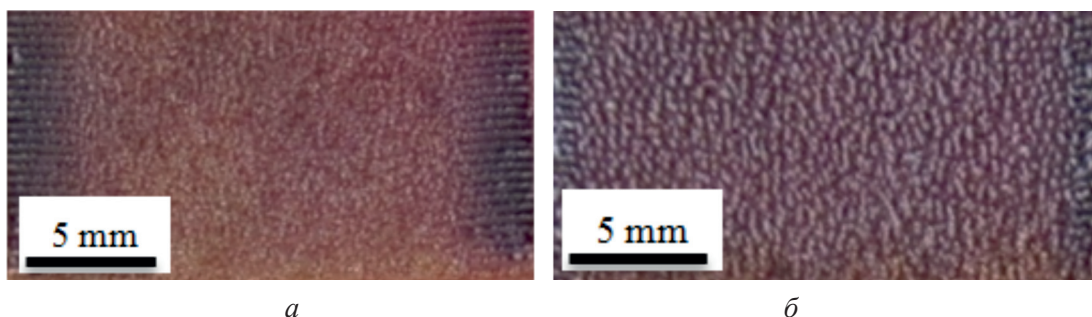


Рис. 6. Фотографии поверхности единичного слоя из медного порошка, полученного методом селективного лазерного плавления на режимах:

$a - P = 30$  Вт,  $V = 3000$  мм/мин,  $t = 200$  °С,  $s = 0,3$  мм,  $R_z = 525$  мкм;  $b - P = 30$  Вт,  $V = 3000$  мм/мин,  $t = 20$  °С,  $s = 0,3$  мм,  $R_z = 540$  мкм

Fig. 6. Images of the surface of a single layer of copper powder obtained by the selective melting method in the modes:

$a - P = 30$  W,  $V = 3000$  mm/min,  $t = 200$  °C,  $s = 0.3$  mm,  $R_z = 525$  μm;  $b - P = 30$  W,  $V = 3000$  mm/min,  $t = 20$  °C,  $s = 0.3$  mm,  $R_z = 540$  μm

Влияние шага сканирования на шероховатость поверхности единичного слоя показано на рис. 7. Увеличение шага сканирования с 0,1 до 0,3 мм при  $P = 30$  Вт,  $V = 3000$  мм/мин,  $t = 200$  °С приводит к изменению  $R_z$  с 740 до 525 мкм.

На рис. 8 показано влияние защитного газа на шероховатость поверхности единичного слоя. При спекании медного порошка в аргоне наблюдалось изменение цвета спеченной поверхности, она приобрела золотистый цвет и уменьшилась шероховатость поверхности  $R_z$  с 650 до 500 мкм.

Влияние механоактивации порошка на шероховатость поверхности единичного слоя показано на рис. 9. Воздействие лазерного излучения на порошок, подвергнутый трехминутной

активации, приводит к уменьшению диаметра коагулированных частиц и их равномерному распределению по поверхности. Шероховатость поверхности значительно уменьшается с 600 до 125 мкм, при  $P = 14$  Вт,  $V = 200$  мм/мин,  $t = 20$ °,  $s = 0,1$  мм.

В результате планирования и проведения экспериментов и статической обработки [15] полученных результатов получена математическая зависимость шероховатости поверхности медного порошка от режимов плавления, позволяющая выявить значимые параметры:

$$R_z = 356 + 15P - 0,1V - 0,057t + 425S.$$

Зависимость шероховатости единичного слоя от режимов плавления показана на рис. 10.

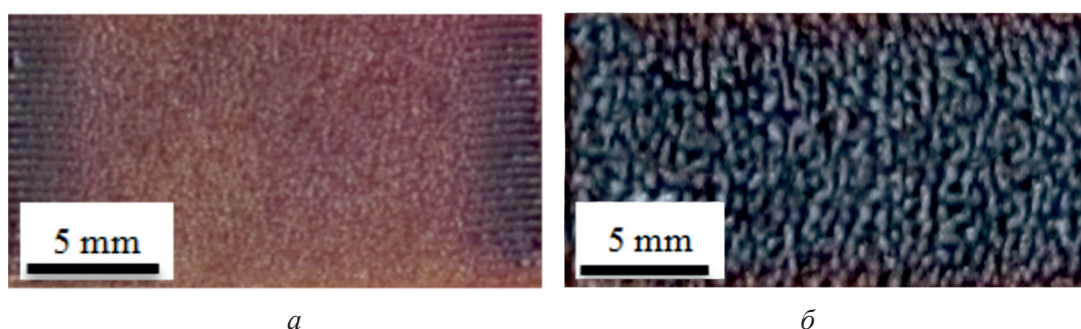


Рис. 7. Фотографии поверхности единичного слоя из медного порошка, полученного методом селективного лазерного плавления на режимах:

$a - P = 30$  Вт,  $V = 3000$  мм/мин,  $t = 200$  °С,  $s = 0,3$  мм,  $R_z = 525$  мкм;  $b - P = 30$  Вт,  $V = 3000$  мм/мин,  $t = 200$  °С,  $s = 0,1$  мм,  $R_z = 740$  мкм

Fig. 7. Images of the surface of a single layer of copper powder obtained by the selective melting method in the modes:

$a - P = 30$  W,  $V = 3000$  mm/min,  $t = 200$  °C,  $s = 0.3$  mm,  $R_z = 525$  μm;  $b - P = 30$  W,  $V = 3000$  mm/min,  $t = 200$  °C,  $s = 0.1$  mm,  $R_z = 740$  μm



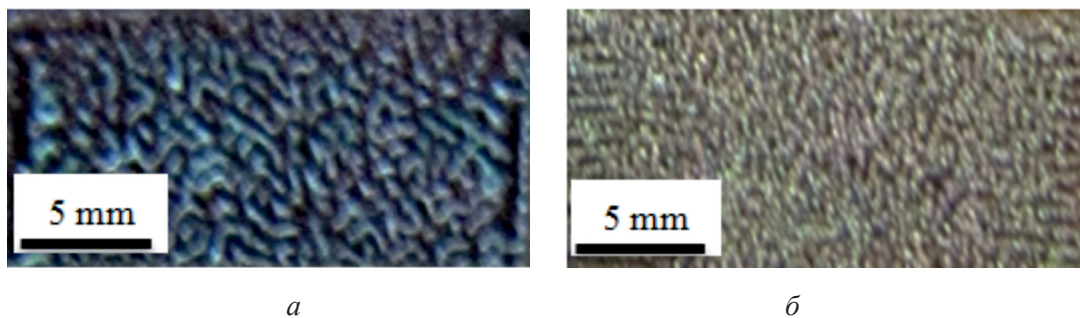


Рис. 8. Фотографии поверхности единичного слоя из медного порошка, полученного методом селективного плавления на разных режимах:

*a* –  $P = 22$  Вт,  $V = 1600$  мм/мин,  $t = 114$  °С,  $s = 0,3$  мм,  $R_z = 650$  мкм, спекание на воздухе;  
*б* –  $P = 22$  Вт,  $V = 1600$  мм/мин,  $t = 114$  °С,  $s = 0,3$  мм,  $R_z = 500$  мкм, спекание в аргоне

Fig. 8. Images of the surface of a single layer of copper powder obtained by the selective melting method in the modes:

*a* –  $P = 22$  W,  $V = 1600$  mm/min,  $t = 114$  °C,  $s = 0.3$  mm,  $R_z = 650$   $\mu$ m, air sintering; *б* –  $P = 22$  W,  $V = 1600$  mm/min,  $t = 114$  °C,  $s = 0.3$  mm,  $R_z = 500$   $\mu$ m, argon sintering

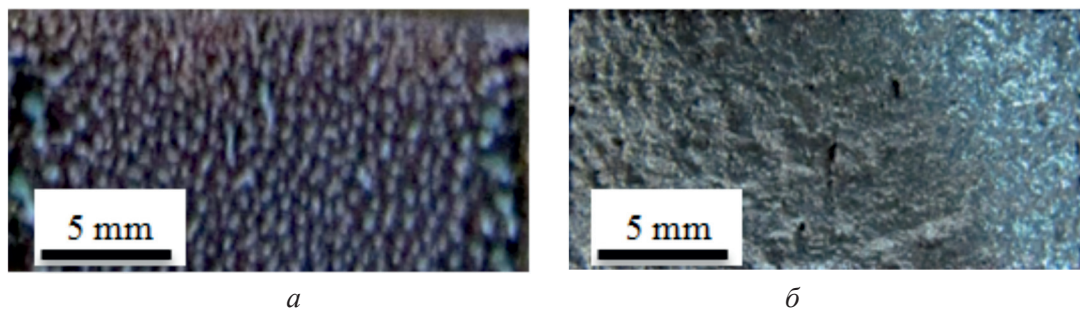


Рис. 9. Фотографии поверхности единичного слоя из медного порошка, полученного методом селективного плавления:

*a* –  $P = 14$  Вт,  $V = 200$  мм/мин,  $t = 20$  °С,  $s = 0,1$  мм,  $R_z = 600$  мкм; *б* –  $P = 14$  Вт,  $V = 200$  мм/мин,  $t = 20$  °С,  $s = 0,1$  мм,  $R_z = 125$  мкм после трех минутной активации

Fig. 9. Images of the surface of a single layer of copper powder obtained by the selective melting method in the modes:

*a* –  $P = 14$  W,  $V = 200$  mm/min,  $t = 20$  °C,  $s = 0.1$  mm,  $R_z = 600$   $\mu$ m; *б* –  $P = 14$  W,  $V = 200$  mm/min,  $t = 20$  °C,  $s = 0.1$  mm,  $R_z = 125$   $\mu$ m after 3 minute activation

На шероховатость поверхностного слоя из медного порошка значительное влияние оказывает скорость перемещения луча лазера. Изменение  $V$  от 200 до 3000 мм/мин приводит к уменьшению  $R_z$  на 56,25 %, при  $P = 22$  Вт,  $s = 0,2$  мм,  $t = 114$  °С в соответствии с рис. 5. Мощность также оказывает большое влияние на  $R_z$ . Повышение  $P$  от 14 до 30 Вт  $R_z$  увеличивает на 62 %, при  $V = 1600$  мм/мин,  $t = 114$  °С,  $s = 0,2$  мм, рис. 4. Изменение  $s$  с 0,1 до 0,3 мм уменьшает  $R_z$  на 40 %, при  $P = 30$  Вт,  $t = 200$  °С,  $V = 3000$  мм/мин в соответствии с рис. 7. Температура подогрева порошкового материала на  $R_z$  влияет незначительно. Таким образом, скорость перемещения

луча лазера, мощность излучения лазера и шаг сканирования являются основными параметрами, влияющими на шероховатость спеченного поверхностного слоя из медного порошка.

## Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Определены рациональные области технологических режимов селективного лазерного плавления медного порошка:  $P = 14 \dots 30$  Вт,  $V = 200 \dots 3000$  мм/мин,  $s = 0,1 \dots 0,3$  мм;  $t = 26 \dots 200$  °С.

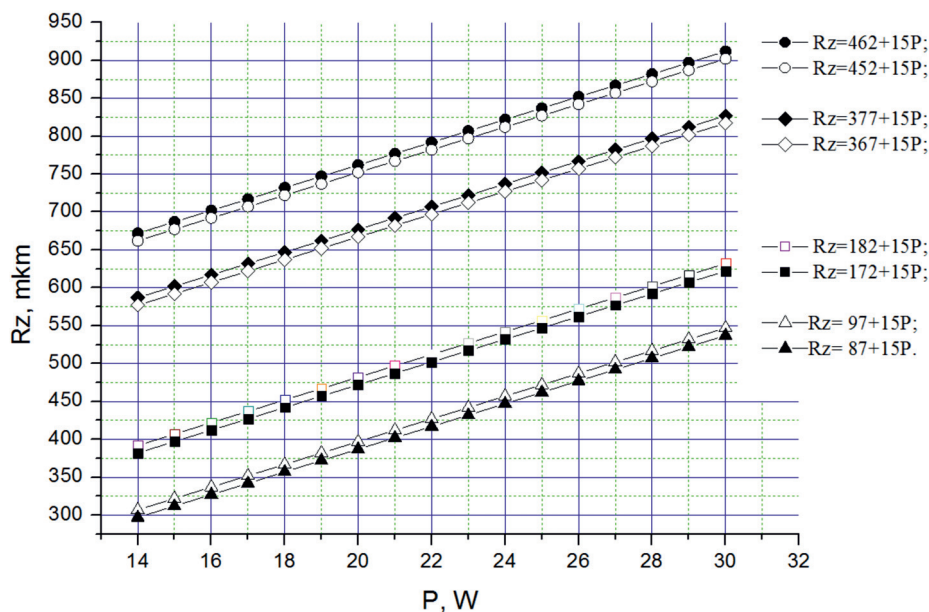


Рис. 10. Диаграмма влияния режимов плавления на шероховатость единичного слоя  $R_z$ :

—●—  $V = 200$  мм/мин,  $t = 26$  °C,  $S = 0,3$  мм; —○—  $V = 200$  мм/мин,  $t = 200$  °C,  $s = 0,3$  мм; —◆—  $V = 200$  мм/мин,  $t = 26$  °C,  $S = 0,1$  мм; —◇—  $V = 200$  мм/мин,  $t = 200$  °C,  $s = 0,1$  мм; —□—  $V = 3000$  мм/мин,  $t = 26$  °C,  $S = 0,3$  мм; —■—  $V = 3000$  мм/мин,  $t = 200$  °C,  $s = 0,3$  мм; —△—  $V = 3000$  мм/мин,  $t = 26$  °C,  $S = 0,1$  мм; —▲—  $V = 3000$  мм/мин,  $t = 200$  °C,  $s = 0,1$  мм

Fig. 10. The diagram of the effect of melting regimes on the roughness of a single layer  $R_z$ :

—●—  $V = 200$  mm/min,  $t = 26$  °C,  $S = 0.3$  mm; —○—  $V = 200$  mm/min,  $t = 200$  °C,  $s = 0.3$  mm; —◆—  $V = 200$  mm/min,  $t = 26$  °C,  $S = 0.1$  mm; —◇—  $V = 200$  mm/min,  $t = 200$  °C,  $s = 0.1$  mm; —□—  $V = 3000$  mm/min,  $t = 26$  °C,  $S = 0.3$  mm; —■—  $V = 3000$  mm/min,  $t = 200$  °C,  $s = 0.3$  mm; —△—  $V = 3000$  mm/min,  $t = 26$  °C,  $S = 0.1$  mm; —▲—  $V = 3000$  mm/min,  $t = 200$  °C,  $s = 0.1$  mm

2. Установлен характер влияния режимов селективного лазерного плавления и получена эмпирическая зависимость шероховатости единичного поверхностного слоя из медного порошка, позволяющие управлять процессом с целью получения качественного изделия.

3. Отмечено положительное влияние защитной атмосферы и механоактивации металлических порошковых материалов на качество поверхностного слоя. Для уменьшения шероховатости, улучшения внутренней структуры и прочностных свойств плавление рекомендуется проводить в аргоне с применением металлических порошковых материалов, подвергнутых механоактивации.

4. Проведенные исследования показывают, что шероховатость поверхностного слоя  $R_z$  можно изменять в значительных пределах, меняя технологические режимы лазерной обра-

ботки. На шероховатость спеченного поверхностного слоя из ПМС-1 наибольшее влияние оказывает скорость перемещения луча лазера. Изменение  $V$  от 200 до 3000 мм/мин приводит к уменьшению  $R_z$  на 56,25 % при  $P = 22$  Вт,  $s = 0,2$  мм,  $t = 114$  °C. Мощность также оказывает большое влияние на  $R_z$ . Повышение  $P$  от 14 до 30 Вт  $R_z$  увеличивает на 62 % при  $V = 1600$  мм/мин,  $t = 114$  °C,  $s = 0,2$  мм. Изменение  $s$  с 0,1 до 0,3 мм уменьшает  $R_z$  на 40 % при  $P = 30$  Вт,  $t = 200$  °C,  $V = 3000$  мм/мин. Температура подогрева порошкового материала на  $R_z$  влияет незначительно. Таким образом, скорость перемещения луча лазера, мощность излучения лазера и шаг сканирования являются основными параметрами, влияющими на шероховатость спеченного поверхностного слоя из медного порошка.

### Список литературы

1. *Beaman J.J., Deckard C.R.* Selective laser sintering with assisted powder handling: patent 4938816 US. – Appl. date 03.07.1990.
2. *Шушковский И.В.* Селективное лазерное спекание и синтез функциональных структур: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.17. – Самара, 2006. – 390 с.
3. Direct selective laser sintering of metals / M. Agarwala, D. Bourell, J. Beaman, H. Marcus, J. Barlow // *Rapid Prototyping Journal*. – 1995. – Vol. 1, iss. 1. – P. 26–36. – doi: 10.1108/13552549510078113.
4. *Mumtaz K., Hopkinson N.* Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting // *Rapid Prototyping Journal*. – 2009. – Vol. 15, iss. 2. – P. 96–103. – doi: 10.1108/13552540910943397.
5. Integrative production technology for high-wage countries / ed. by C. Brecher. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. – 1096 p. – ISBN 978-3-642-21066-2. – doi: 10.1007/978-3-642-21067-9.
6. *Gibson I., Rosen D.W., Stucker B.* Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. – New York, USA: Springer, 2009. – 459 p. – ISBN-10: 1441911197. – ISBN-13: 9781441911193.
7. Theoretical and experimental study on surface roughness of 316L stainless steel metal parts obtained through selective laser melting / D. Wang, Y. Liu, Y. Yang, D. Xiao // *Rapid Prototyping Journal*. – 2016. – Vol. 22, iss. 4. – P. 706–716. – doi: 10.1108/RPJ-06-2015-0078.
8. *Cheng B., Shrestha S., Chou K.* Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting // *Additive Manufacturing*. – 2016. – Vol. 12, pt. B. – P. 240–251. – doi: /10.1016/j.addma.2016.05.007.
9. Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting / Y. Tian, D. Tomus, P. Rometsch, X. Wu // *Additive Manufacturing*. – 2017. – Vol. 13. – P. 103–112. – doi: 10.1016/j.addma.2016.10.010.
10. Lasers and materials in selective laser sintering / J. Kruth, X. Wang, T. Laoui, L. Froyen // *Assembly Automation*. – 2003. – Vol. 23, iss. 4. – P. 357–371. – doi: 10.1108/01445150310698652.
11. *Jhabvala J., Boillat E., Glardon R.* Study of the inter-particle necks in selective laser sintering // *Rapid Prototyping Journal*. – 2013. – Vol. 19, iss. 2. – P. 111–117. – doi: 10.1108/13552541311302969.
12. Selective laser melting of iron-based powder / J.P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, B. Lauwers // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2004. – Vol. 149, iss. 1–3. – P. 616–622. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051.
13. *Saprykin A.A., Saprykina N.A.* Engineering support for improving quality of layer-by-layer laser sintering // *Proceedings – 2012 7th International Forum on Strategic Technology IFOST 2012, Tomsk, 18–21 September 2012*. – Tomsk, 2012. – P. 6357719. – doi:10.1109/IFOST.2012.6357719.
14. Improvement of the sintered surface and bulk of the product via differentiating laser sintering (melting) modes / N.A. Saprykina, A.A. Saprykin, D.A. Arkhipova, I.F. Borovikov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 142, N 1. – P. 012089. – doi: 10.1088/1757-899X/142/1/012089.
15. *Спиридонов А.А.* Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.





## Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science



Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Analysis, Modeling and Prediction of Surface Roughness of Copper, Obtained by Selective Laser Melting

*Natalia Saprykina*<sup>1, a,\*</sup>

<sup>1</sup> Yurga Institute of Technology, TPU Affiliate, 26 Leningradskaya st., Yurga, 652055, Russian Federation

<sup>a</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-5874-8287>,  [nat\\_anat\\_sapr@mail.ru](mailto:nat_anat_sapr@mail.ru)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 27 April 2017

Revised: 25 July 2017

Accepted: 02 August 2017

Available online: 15 September 2017

##### Keywords:

Selective laser melting

Melting

Coagulation

Surface roughness

Powder material

Surface quality

Quality of interior volume

#### ABSTRACT

Unlike traditional methods of material removal, rapid prototyping technologies are aimed at creating complex products by sequentially adding material (materials). By now, a large number of rapid prototyping methods, which differ in the material used and in the method for shaping the article, are known. Innovative is the method of selective laser melting of physical copies of various objects from metals, alloys and metal-matrix composite materials to meet the requirements of the Aerospace, Defense, Automotive and Biomedical Industries. An important direction in the development of selective laser melting technology is improving the quality of the product being formed. This is a complex multi-parameter process, in which it is possible to isolate about 130 parameters that affect the final result. The paper presents the results of experimental studies of the influence of argon shielding gas, mechanical activation of powder and the effect of technological melting modes: laser radiation power, laser beam travel speed, scanning step, preheating temperature of the powder material on the surface roughness obtained from copper powder material by selective laser melting. Melting experiments of copper powder are implemented in a layer-by-layer laser melting unit of the original design, which allows regulating all technological melting modes. The surface roughness is determined by the Olympus LEXT OLS4100 digital non-contact microscope. A mathematical dependence of the roughness of the surface layer from copper powder on the technological melting regimes is obtained on the basis of the theory of experimental planning and static processing of the results. Significant parameters of the regime are determined: laser radiation power, laser beam moving speed, scanning step, affecting the layer roughness. As well as the range of its change from 480 to 725 microns with an increase in power from 14 to 30 watts, the laser beam travel speed is 1400 mm/min, the powder heating temperature is 114 °C, the scanning step is 0.2 mm. From 750 to 480 μm with an increase in the speed of the laser beam from 200 to 3000 mm/min, power 22 W, powder heating temperature 114 °C, scanning step 0.2 mm. An increase in the scanning step from 0.1 to 0.3 mm leads to a decrease in the roughness from 740 to 525 μm with a laser beam moving speed of 3000 mm/min, a power of 30 W, a powder preheating temperature of 200 °C. The positive influence of the protective atmosphere and mechanical activation of the powder material on the quality of the surface layer is shown.

**For citation:** Saprykina N.A. Analysis, modeling and prediction of surface roughness of copper, obtained by selective laser melting. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017. no. 3 (76), pp. 6–16. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-6-16. (in Russian).

#### References

1. Beaman J.J., Deckard C.R. *Selective laser sintering with assisted powder handling*. Patent US, no. 4938816, 1990.

##### \* Corresponding author

Saprykina Natalia A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor

Yurga Institute of Technology,

26 Leningradskaya st.,

652055, Yurga, Russian Federation

E-mail: [nat\\_anat\\_sapr@mail.ru](mailto:nat_anat_sapr@mail.ru)

2. Shishkovskii I.B. *Selektivnoe lazernoe spekanie i sintez funkcional'nykh struktur*: Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Selective laser sintering and synthesis of functional structures. Dr. phys.-math. sci. diss.]. Samara, 2006. 390 p.
3. Agarwala M., Bourell D., Beaman J., Marcus H., Barlow J. Direct selective laser sintering of metals. *Rapid Prototyping Journal*, 1995, vol. 1, iss. 1, pp. 26–36. doi: 10.1108/13552549510078113.
4. Mumtaz K., Hopkinson N. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 2009, vol. 15, iss. 2, pp. 96–103. doi: 10.1108/13552540910943397.
5. Brecher C., ed. *Integrative production technology for high-wage countries*. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. 1096 p. ISBN 978-3-642-21066-2. doi: 10.1007/978-3-642-21067-9.
6. Gibson I.B., Rosen D.W., Stucker B. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York, USA, Springer, 2009. 459 p. ISBN-10: 1441911197. ISBN-13: 9781441911193.
7. Wang D., Liu Y., Yang Y., Xiao D. Theoretical and experimental study on surface roughness of 316L stainless steel metal parts obtained through selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 2016, vol. 22, iss. 4, pp. 706–716. doi: 10.1108/RPJ-06-2015-0078.
8. Cheng B., Shrestha S., Chou K. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 2016, vol. 12, pt. B, pp. 240–251. doi: /10.1016/j.addma.2016.05.007.
9. Tian Y., Tomus D., Rometsch P., Wu X. Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 2017, vol. 13, pp. 103–112. doi: 10.1016/j.addma.2016.10.010.
10. Kruth J., Wang X., Laoui T., Froyen L. Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation*, 2003, vol. 23, iss. 4, pp. 357–371. doi: 10.1108/01445150310698652.
11. Jhabvala J., Boillat E., Glardon R. Study of the inter-particle necks in selective laser sintering. *Rapid Prototyping Journal*, 2013, vol. 19, iss. 2, pp. 111–117. doi: 10.1108/13552541311302969.
12. Kruth J.P., Froyen L., Vaerenbergh J. Van, Mercelis P., Rombouts M., Lauwers B. Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 149, iss. 1–3, pp. 616–622. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051.
13. Saprykin A.A., Saprykina N.A. Engineering support for improving quality of layer-by-layer laser sintering. *Proceedings – 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012*, Tomsk, 18–21 September 2012, p. 6357719. doi: 10.1109/IFOST.2012.6357719.
14. Saprykina N.A., Saprykin A.A., Arkhipova D.A., Borovikov I.F. Improvement of the sintered surface and bulk of the product via differentiating laser sintering (melting) modes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 142, no. 1, p. 012089. doi: 10.1088/1757-899X/142/1/012089.
15. Spiridonov A.A. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Experiment planning in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p.



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)











### Повышение эффективности алмазного инструмента на металлической связке при шлифовании высокопрочных материалов

Александр Янюшкин<sup>1,а</sup>, Дмитрий Лобанов<sup>1,б,\*</sup>, Вадим Скиба<sup>2,с</sup>,  
 Виктор Гартфельдер<sup>1,д</sup>, Лариса Секлетина<sup>1,е</sup>

<sup>1</sup> Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, пр-т Московский, 15, г. Чебоксары, Чувашская Республика, 428015, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

<sup>а</sup>  <http://orcid.org/0000-0003-1969-7840>,  [yanyushkin@brstu.ru](mailto:yanyushkin@brstu.ru), <sup>б</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-4273-5107>,  [lobanov@front.ru](mailto:lobanov@front.ru),

<sup>с</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-8242-2295>,  [skeeba\\_vadim@mail.ru](mailto:skeeba_vadim@mail.ru), <sup>д</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-6759-6756>,  [harvik48@list.ru](mailto:harvik48@list.ru),

<sup>е</sup>  [larsek@list.ru](mailto:larsek@list.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.92

#### История статьи:

Поступила: 11 мая 2017

Рецензирование: 26 июля 2017

Принята к печати: 15 августа 2017

Доступно онлайн: 15 сентября 2017

#### Ключевые слова:

Комбинированное шлифование

Алмазный круг

Металлическая связка

Электрохимическая правка

Качество поверхности

#### АННОТАЦИЯ

**Цель:** выявление природы и предложение технологических рекомендаций по минимизации процесса засаливания абразивного инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов, позволяющие повысить эффективность использования алмазного инструмента на металлической связке при их шлифовании, снизить затраты на изготовление высокотехнологичной и конкурентоспособной продукции. В работе представлен анализ режущей способности алмазных кругов на металлической связке. Приведен краткий обзор причин потери работоспособности абразивного инструмента, дана оценка адгезивно-диффузионным процессам в зоне резания. Отмечается, что основной причиной низкой работоспособности алмазного инструмента является засаливание шлифовального круга. **Методы:** экспериментальные исследования проводились на станке модели 3Д642Е, модернизированном под процессы электроалмазного шлифования и отвечающем метрологическим требованиям на проверку показателей, формирующих качество изделий. Структурные исследования производили с применением оптической, растровой микроскопии, спектрального и рентгеноструктурного анализа. Образцы исследовались с использованием рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA, растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 со встроенным химическим анализатором EDS X-Act, оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m. Дополнительно поверхности образцов исследовались с применением методов оптической интерферометрии с использованием комплекса для изучения топографии поверхности Zygo NewView™ 7300, предназначенного для определения параметров микро-рельефа и структуры объектов технического и биологического происхождения. **Результаты и обсуждение:** приведена технология шлифования высокопрочных и нанопропроченных материалов алмазными кругами на металлической связке, при которой поддержание высоких режущих свойств круга осуществляется непрерывной электрохимической правкой. Использование технологии комбинированного шлифования позволяет значительно увеличить работоспособность и расширить область применения алмазного абразивного инструмента на металлической связке, повысить эффективность обработки различных марок твердых сплавов групп ВК, ТК, ТТК, а также оксидной и карбидной металлокерамики и наноструктурированного материала на основе диборида циркония.

**Для цитирования:** 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.

#### \*Адрес для переписки

Лобанов Дмитрий Владимирович, д.т.н., доцент

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,

ул. Спиридона Михайлова, 3,

428015, Чувашская Республика, г. Чебоксары, Россия

Тел.: +7-908-303-47-45, e-mail: [lobanov@front.ru](mailto:lobanov@front.ru)



## Введение

Повышение эффективности использования алмазного инструмента на металлической связке при шлифовании высокопрочных, труднообрабатываемых и нанопропроченных материалов является актуальной задачей современного машиностроения. Однако в процессе рационализации технологических режимов абразивной обработки достаточно трудно достичь высоких значений данного показателя качества из-за интенсивной потери режущей способности шлифовальных кругов. Это может быть вызвано различными причинами [1–5], одна из которых – процесс интенсивного засаливания, когда алмазные круги на металлических связках при шлифовании без смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) практически полностью теряют свою работоспособность [6–12].

Основная причина засаливания связана с забиванием мелкодисперсными частицами обрабатываемого материала пор между абразивными зёрнами и связкой с образованием спрессованного слоя, закрывающего выступающие зёрна [13].

В работах [13–15] отмечается, что выступы и впадины субмикроскопического профиля поверхности абразивного зёрна являются первичными очагами засаливания – адгезии частиц металла к абразивным зёрнам. Сначала наблюдается локальное схватывание активированного (нагретого до высоких температур и пластически деформированного) металла с выступами субмикроскопического профиля. Далее одновременно с адгезией металла с абразивными зёрнами происходит адгезия частиц металла к металлу, налипшему на абразивное зёрно. Вследствие этих процессов металлом заполняются впадины субмикроскопического профиля абразивных зёрен, а затем вся их рабочая поверхность покрывается металлом. То, что адгезия является основной причиной засаливания, отражено в работах [6, 17, 18], однако авторы данных работ отмечают, что чисто механический подход к засаливанию шлифовальных кругов не позволяет раскрыть сущность механизма этого процесса, но отмечают происходящие процессы на границе раздела твёрдых фаз [19–21].

Таким образом, целью данной работы является выявление природы и предложение технологических рекомендаций по минимизации процесса засаливания абразивного инструмента при

обработке труднообрабатываемых материалов, что позволит повысить эффективность использования алмазного инструмента на металлической связке при их шлифовании, снизить затраты на изготовление высокотехнологичной и конкурентоспособной продукции.

## Методика экспериментального исследования

Экспериментальные исследования проводились на станке модели 3Д642Е, модернизированном под процессы электроалмазного шлифования и отвечающем метрологическим требованиям на проверку показателей, формирующих качество изделий.

В качестве сравниваемых методов нами выбраны следующие методы алмазного шлифования.

1. Традиционное алмазное затачивание без применения электрофизических и электрохимических процессов.

2. Алмазно-электрохимическое шлифование.

3. Алмазное шлифование с непрерывной электрохимической правкой круга.

4. Для сравнения с представленными выше известными методами предлагается разработанный нами комбинированный метод электрохимического шлифования с одновременной непрерывной правкой шлифовального круга.

Проведены исследования образцов, вырезанных из алмазного шлифовального круга марки 12А2-45 150×10×3×40×32 АС6 М1-01 100/80. Исследовались образцы круга перед обработкой (эталон) и после обработки различных марок твёрдых сплавов групп ВК, ТК, ТТК, а также оксидной и карбидной металлокерамики и наноструктурированного материала на основе диборида циркония. В качестве эталона была принята поверхность образца, вырезанного из шлифовального круга, поставленного заводом-изготовителем.

Для растровой и оптической микроскопии подготовлены шлифы образцов исследуемых материалов, обработка которых осуществлялась с использованием алмазных паст с зернистостью 60/40, 28/20, 14/10, 5/3 последовательно.

Для разностороннего анализа и адекватной оценки результатов экспериментальные исследования проводились с использованием оптической, растровой микроскопии, спектрального и

рентгеноструктурного анализа. Образцы исследовались с использованием рентгеновского дифрактометра *ARL X'TRA*, растрового электронного микроскопа *Carl Zeiss EVO50* со встроенным химическим анализатором *EDS X-Act*, оптического микроскопа *Carl Zeiss Axio Observer A1m*. Дополнительно поверхности образцов исследовались с применением методов оптической интерферометрии с использованием комплекса для изучения топографии поверхности *Zygo NewView™ 7300*, предназначенного для определения параметров микрорельефа и структуры объектов технического и биологического происхождения.

Рациональные технологические режимы, позволяющие эффективно, с гарантированным качеством производить обработку исследуемых материалов комбинированными электроалмазными методами следующие: плотность тока травления заготовки  $i_{\text{et}} = 20 \dots 30 \text{ A/cm}^2$ ; плотность тока правки алмазного круга  $i_{\text{dr}} = 0,2 \dots 0,3 \text{ A/cm}^2$ ; скорость круга  $V = 25 \dots 35 \text{ м/с}$ ; продольная подача  $S_{\text{lf}} = 1,5 \dots 2,0 \text{ м/мин}$ ; поперечная подача  $S_{\text{tf}} = 0,02 \dots 0,04 \text{ мм/дв.ход}$ .

## Результаты и обсуждение

На начальном этапе исследований абразивного инструмента на металлической связке проведены химический и спектральный анализ состава связки шлифовального круга до обработки нанопропрочненного материала, легированного карбидом вольфрама. Результаты растровой электронной микроскопии со спектральным химическим анализом приведены на рис. 1.

Дополнительно проведенный рентгеноструктурный анализ этой же поверхности свидетельствует о наличии фаз меди и олова в виде твердых растворов  $\text{Cu}_{0,932}\text{Sn}_{0,068}$  и  $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{14}$ , что полностью соответствует составу металлической связки M2-01.

Рентгеноструктурный анализ поверхности круга показал наличие засаленного слоя, состоящего из фаз карбида вольфрама WC. Следует отметить, что поверхность частично покрыта засаленным слоем, так как на рентгенограмме отмечено наличие элементов связки в виде твердых растворов меди и олова  $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$ ,  $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$ ,  $\text{Cu}_{5,6}\text{Sn}$ ,  $\text{Cu}_{0,932}\text{Sn}_{0,068}$ .

Экспериментами установлено, что алмазный круг при традиционном шлифовании практи-

чески всех исследуемых материалов уже в первые минуты полностью теряет свои режущие свойства, поверхность покрывается засаленным слоем. Химический анализ такого образца (рис. 2) показал, что на поверхности образуется засаленный слой, строение которого определяется в основном составом обрабатываемого материала.

Рентгеноструктурный анализ позволил установить, что засаленный слой почти полностью скрывает поверхность алмазного круга и состоит из фаз карбида вольфрама WC и фазы вновь образовавшегося сложного карбида

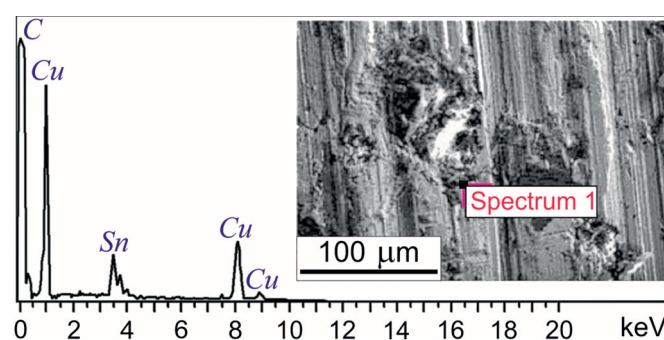


Рис. 1. Химический анализ поверхности алмазного круга 12A2-45 150×10×3×40×32 AC6 M1-01 100/80 до обработки

Fig. 1. Chemical analysis of 12A2-45 150×10×3×40×32 AC6 M1-01 100/80 diamond wheel surface prior to processing

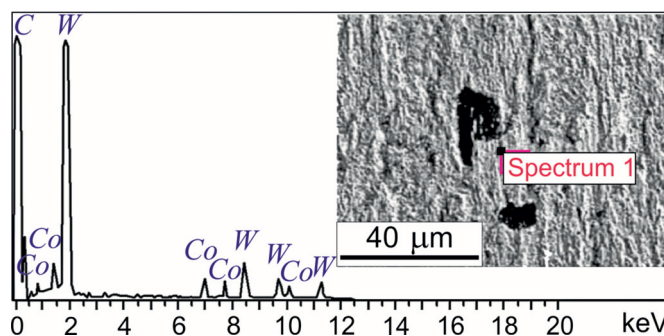


Рис. 2. Химический анализ алмазного круга 12A2-45 150×10×3×40×32 AC6 M1-01 100/80 после традиционного шлифования

Обрабатываемый материал: твердый сплав BK8. Режимы обработки:  $V = 35 \text{ м/с}$ ;  $S_{\text{lf}} = 2,0 \text{ м/мин}$ ;  $S_{\text{tf}} = 0,03 \text{ мм/дв.ход}$

Fig. 2. Chemical analysis of the 12A2-45 150×10×3×40×32 AC6 M1-01 100/80 diamond wheel surface after traditional grinding

The material processed: WC-Co hard alloy. Processing modes:  $V = 35 \text{ m/sec}$ ;  $S_{\text{lf}} = 2.0 \text{ m/min}$ ;  $S_{\text{tf}} = 0.03 \text{ mm/double pass}$

вольфрама  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ , что может свидетельствовать о деструкции карбида вольфрама в поверхностном слое сплава.

При анализе образцов после алмазного шлифования с непрерывной электрохимической правкой круга также установлено незначительное количество на поверхности инструмента компонентов обрабатываемого материала, что может свидетельствовать о частичном засаливании алмазного круга.

Спектральный химический анализ образца (рис. 3) показал следующий химический состав исследуемой поверхности: 80,6 % алмаз и углерод, 5,65 % медь и олово и 10,41 % вольфрам. Остальное – наполнители.

Это свидетельствует о существенном уменьшении засаленного слоя на поверхности алмазного круга. Таким образом, в результате неравномерного электрохимического растворения связки наблюдаются небольшие площадки засаливания, но в целом поверхность круга остается развитой. Постоянная правка круга позволяет снизить интенсивность образования засаленного слоя и обеспечить своевременное обновление поверхности круга.

Химический анализ образцов поверхности алмазного круга после комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной непрерывной правкой круга позволил установить наличие

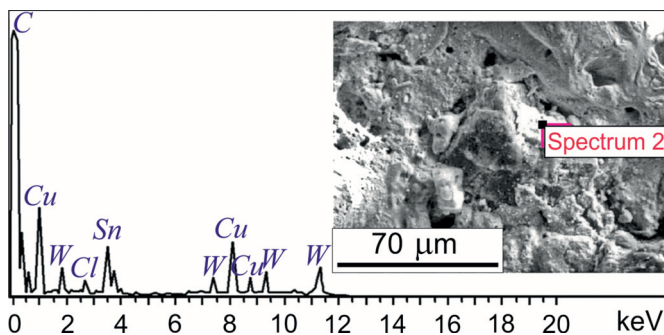


Рис. 3. Химический анализ поверхности круга 12A2-45 150×10×3×40×32 AC6 M1-01 100/80 после шлифования с электрохимической правкой

Обрабатываемый материал: твердый сплав ВК8. Режимы обработки:  $V = 35$  м/с;  $S_{if} = 2,0$  м/мин;  $S_{if} = 0,03$  мм/дв.ход;  $i_{dr} = 0,25$  А/см<sup>2</sup>

Fig. 3. Chemical analysis of the 12A2-45 150×10×3×40×32 AC6 M1-01 100/80 diamond wheel surface after grinding with electrochemical dressing

The material processed: WC-Co hard alloy Processing modes:  $V = 35$  m/sec;  $S_{if} = 2.0$  m/min;  $S_{if} = 0.03$  mm/double pass;  $i_{dr} = 0.25$  A/cm<sup>2</sup>

только элементов связки и углерода, что указывает на отсутствие засаленного слоя (рис. 4).

Рентгеноструктурным анализом такой поверхности также установлены только фазы элементов связки в виде твердых растворов олова и меди  $\text{Cu}_{0.932}\text{Sn}_{0.068}$  и углерода С (алмаза) (рис. 5).

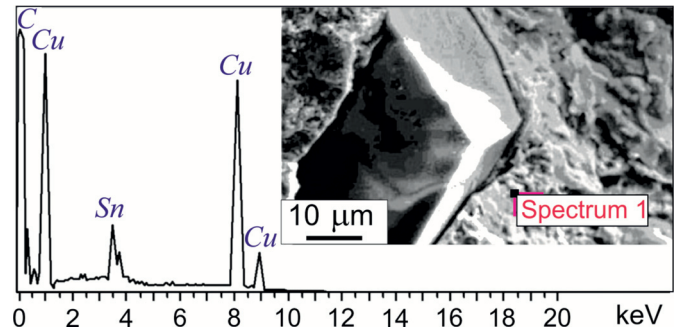


Рис. 4. Алмазное зерно и химический анализ поверхности круга марки 12A2-45 150×10×3×40×32 AC6 M1-01 100/80 после комбинированного электроалмазного шлифования

Обрабатываемый материал: твердый сплав ВК8. Режимы обработки:  $V = 35$  м/с;  $S_{if} = 2,0$  м/мин;  $S_{if} = 0,03$  мм/дв.ход;  $i_{dr} = 0,25$  А/см<sup>2</sup>;  $i_{et} = 20$  А/см<sup>2</sup>

Fig. 4. Single-point diamond and chemical analysis of the 12A2-45 150×10×3×40×32 AC6 M1-01 100/80 diamond wheel surface after combined electro-discharge diamond grinding.

The material processed: WC-Co hard alloy Processing modes:  $V = 35$  m/sec;  $S_{if} = 2.0$  m/min;  $S_{if} = 0.03$  mm/double pass;  $i_{dr} = 0.25$  A/cm<sup>2</sup>;  $i_{et} = 20$  A/cm<sup>2</sup>

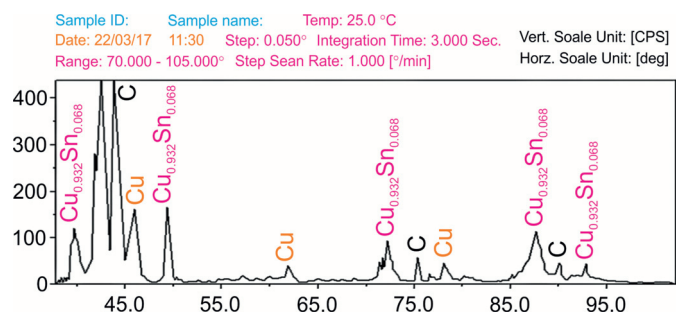


Рис. 5. Рентгенограмма образца алмазного круга 12A2-45 150×10×3×40×32 AC6 M1-01 100/80 после комбинированного электроалмазного шлифования

Обрабатываемый материал: твердый сплав ВК8. Режимы обработки:  $V = 35$  м/с;  $S_{if} = 2,0$  м/мин;  $S_{if} = 0,03$  мм/дв.ход;  $i_{dr} = 0,25$  А/см<sup>2</sup>;  $i_{et} = 20$  А/см<sup>2</sup>

Fig. 5. X-ray diffraction pattern of the 12A2-45 150×10×3×40×32 AC6 M1-01 100/80 diamond wheel sample after combined electro-discharge diamond grinding

The material processed: WC-Co hard alloy Processing modes:  $V = 35$  m/sec;  $S_{if} = 2.0$  m/min;  $S_{if} = 0.03$  mm/double pass;  $i_{dr} = 0.25$  A/cm<sup>2</sup>;  $i_{et} = 20$  A/cm<sup>2</sup>



На следующем этапе исследований оценивалось качество поверхности высокопрочных и наноструктурных материалов после алмазной абразивной обработки кругами на металлической связке в различных условиях [22–28].

Аналогичные результаты в пределах доверительных интервалов получены и на других исследуемых материалах.

В качестве примера на рис. 6 представлены обработанные поверхности, заточенные различными методами. Традиционный метод алмазного шлифования характеризуется высокими температурами в зоне резания и силовыми нагрузками

со стороны абразивного инструмента, что негативно отражается на качестве обработанной поверхности (рис. 6).

Результаты пластических деформаций слабо прослеживаются при небольших увеличениях (рис. 6, а). Анализ образцов при большем увеличении обработанной поверхности показал значительное число дефектов и трещин (рис. 6, б), которые образуются вследствие снижения режущей способности круга за счет засаливания. Дефекты такого характера в значительной степени влияют на эксплуатационные свойства изделий из высокопрочных материалов.

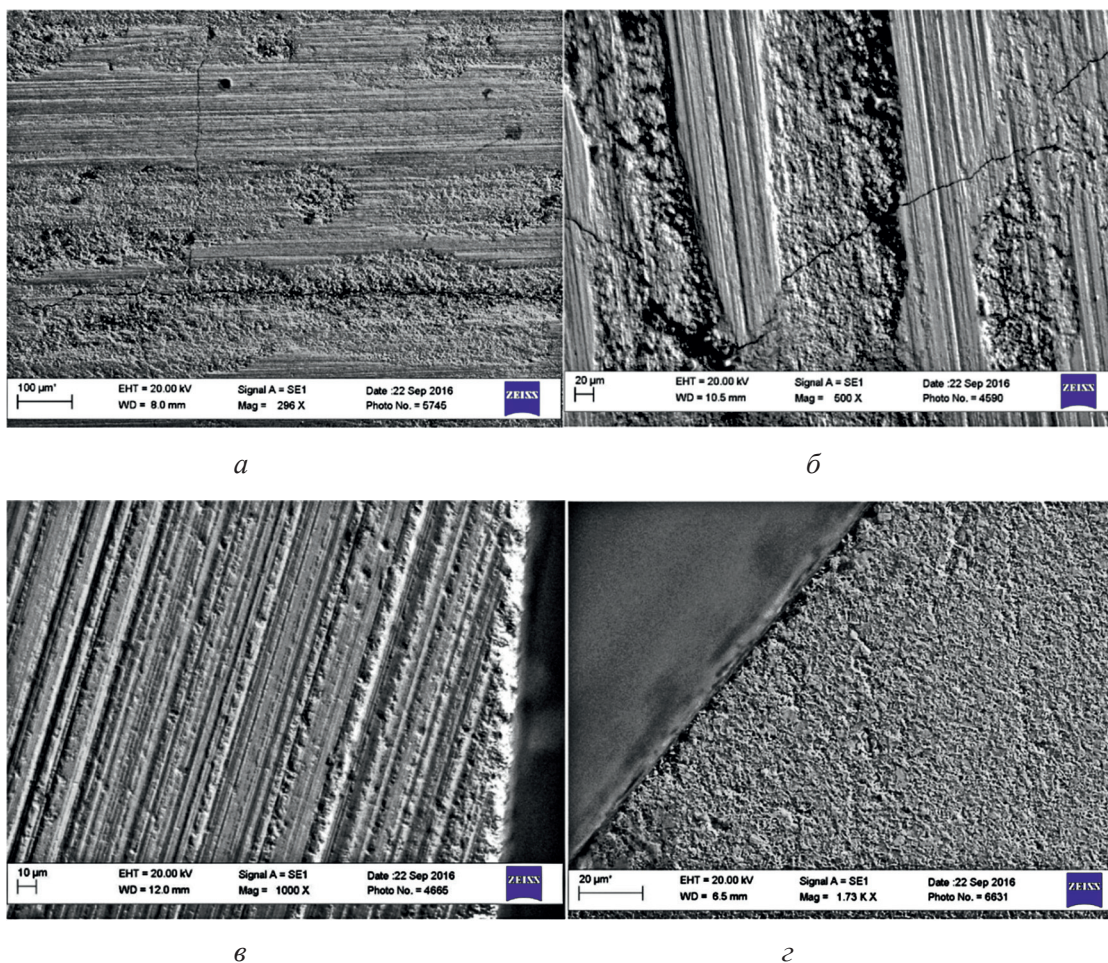


Рис. 6. Поверхности образцов сплава ВК8 после различных видов алмазного шлифования кругом 12A2-45 150×10×3×40×32 AC6 M1-01 100/80:

а, б – традиционное алмазное шлифование ( $V = 35$  м/с;  $S_{if} = 2,0$  м/мин;  $S_{if} = 0,03$  мм/дв.ход);  
 в – алмазное шлифование с электрохимической правкой круга ( $V = 35$  м/с;  $S_{if} = 2,0$  м/мин;  $S_{if} = 0,03$  мм/дв.ход;  $i_{dr} = 0,25$  А/см<sup>2</sup>);  
 г – комбинированное электроалмазное шлифование ( $V = 35$  м/с;  $S_{if} = 2,0$  м/мин;  $S_{if} = 0,03$  мм/дв.ход;  $i_{dr} = 0,25$  А/см<sup>2</sup>;  $i_{et} = 20$  А/см<sup>2</sup>)

Fig. 6. The surfaces of the WC-Co alloy samples after various types of diamond grinding by 12A 2-45 150 × 10 × 3 × 40 × 32 AC6 M 1-01 100/80 wheel:

а, б – traditional diamond grinding ( $V = 35$  m/sec;  $S_{if} = 2.0$  m/min;  $S_{if} = 0.03$  mm/double pass);  
 в – diamond grinding with the electrochemical dressing of the wheel ( $V = 35$  m/sec;  $S_{if} = 2.0$  m/min;  $S_{if} = 0.03$  mm/double pass  $i_{dr} = 0.25$  A/cm<sup>2</sup>);  
 г – combined electro-discharge diamond grinding ( $V = 35$  m/sec;  $S_{if} = 2.0$  m/min;  $S_{if} = 0.03$  mm/double pass;  $i_{dr} = 0.25$  A/cm<sup>2</sup>;  $i_{et} = 20$  A/cm<sup>2</sup>)



Алмазное шлифование с непрерывной электрохимической правкой позволяет повысить режущие свойства шлифовального круга за счет препятствия образованию засаленного слоя и избежать образования подобных дефектов (рис. 6, в). Однако в этом случае наблюдается повышенная шероховатость, поскольку увеличивается количество зерен, одновременно участвующих в процессе резания и влияющих на образование микронеровностей на обработанной поверхности (рис. 7).

Вследствие этого данный метод может быть рекомендован для максимального удаления припуска на этапах предварительной обработки, где не требуется обеспечение высокого качества поверхности.

При исследовании комбинированного метода шлифования, сочетающего электрохимическое разупрочнение обрабатываемой поверхности с

одновременной непрерывной электрохимической правкой алмазного круга на металлической связке, установлено, что обработанная поверхность не имеет ярко выраженных дефектов. Незначительные дефекты наблюдаются лишь по краям детали, где присутствуют краевые эффекты и характерно неравномерное электрохимическое растворение (рис. 6, з).

Качество обработки этим методом выше, поскольку круг, обладающий высокой режущей способностью, удаляет разупрочненный припуск со значительно меньшими усилиями, а дополнительное электрохимическое растворение поверхностного слоя способствует снижению шероховатости. Шероховатость обработанной поверхности исследуемых образцов твердого сплава (рис. 7) находится в пределах  $Ra = 0,276 \pm 0,057$  мкм.

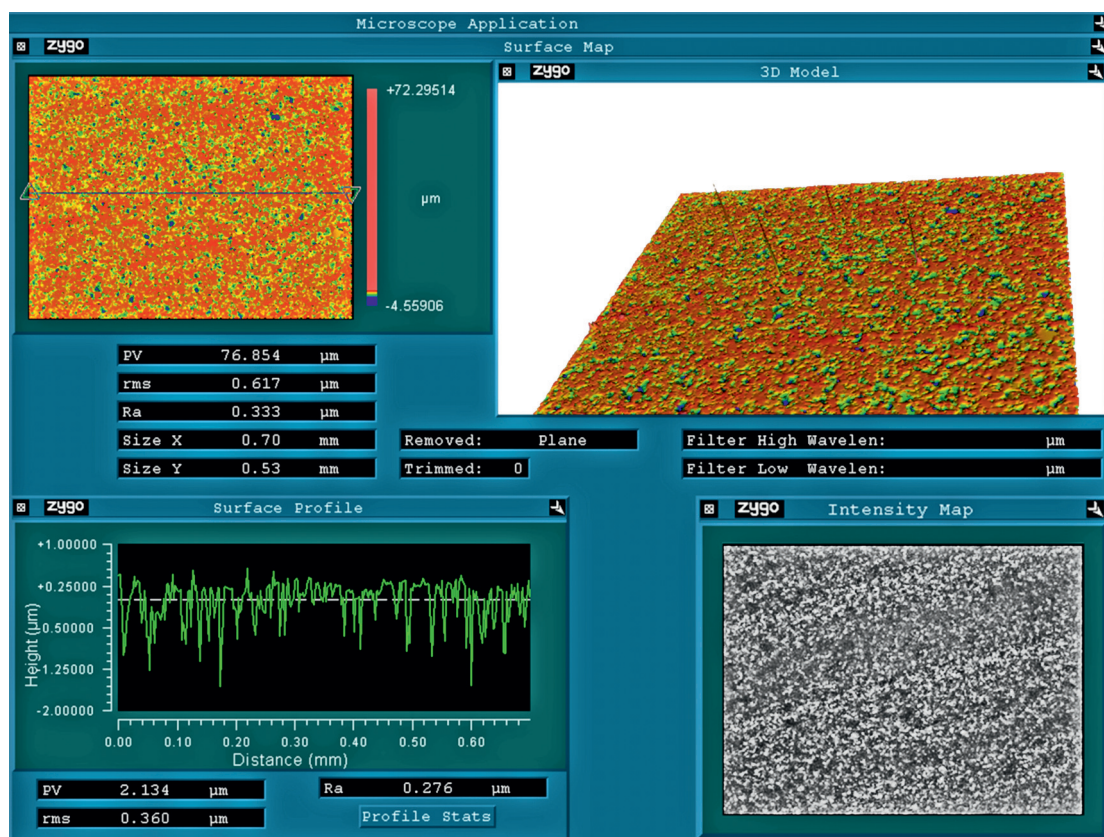


Рис. 7. Топография поверхности твердого сплава ВК8, заточенного комбинированным методом электроалмазной обработки кругом 12А2-45 150×10×3×40×32 АС6 М1-01 100/80.

Режимы обработки:

$$V = 35 \text{ м/с}; S_{if} = 2,0 \text{ м/мин}; S_{tf} = 0,03 \text{ мм/дв.ход}; i_{dr} = 0,25 \text{ А/см}^2; i_{et} = 20 \text{ А/см}^2$$

Fig. 7. Topography of WC-Co hard alloy surface processed by combined electro-discharge diamond grinding with 12A2-45 150×10×3×40×32 AC6 M1-01 100/80 diamond wheel.

Processing modes:

$$V = 35 \text{ m/sec}; S_{if} = 2.0 \text{ m/min}; S_{tf} = 0.03 \text{ mm/double pass}; i_{dr} = 0.25 \text{ A/cm}^2; i_{et} = 20 \text{ A/cm}^2$$

## Выводы

Алмазное шлифование кругами на металлических связках высокопрочных и наноструктурных материалов традиционными методами вызывает определенные трудности, связанные с потерей режущих свойств инструмента ввиду интенсивного засаливания алмазоносного слоя, что сказывается на качестве изделия. Засаленный слой, образующийся при резании, состоит из продуктов обработки и при отсутствии правки со временем полностью скрывает рабочую поверхность круга.

Метод алмазного шлифования с непрерывной электрохимической правкой круга позволяет повысить режущие свойства абразивного инструмента и обеспечить удовлетворительное качество обработанной поверхности. Данный метод может быть рекомендован для удаления припуска на операциях предварительной обработки, где не требуется обеспечение высокого качества.

Комбинированное электроалмазное шлифование, сочетающее одновременную непрерывную правку круга и электрохимическое разупрочнение обрабатываемой поверхности, позволяет обеспечить стабильные режущие свойства алмазного инструмента и высокие показатели качества готового изделия. Данный метод может быть рекомендован на заключительных операциях размерной обработки изделий из различных марок твердых сплавов групп ВК, ТК, ТТК, а также оксидной и карбидной металлокерамики и наноструктурированного материала на основе диборида циркония.

Для практической реализации предлагаемой технологии нами разработаны рекомендации по модернизации оборудования и оснастки, которые заключаются в создании возможности установления регламентируемой подачи станка за счет гидропривода, установке токосъемника на шпиндель заточного станка, монтаже источника технологического тока, создании и изготовлении уникальной специальной оснастки для комбинированной электроалмазной обработки с непрерывной правкой круга.

Применение предлагаемой технологии позволяет значительно увеличить работоспособность и расширить область использования алмазного абразивного инструмента на металлической связке, а также повысить эффективность и качество обработки изделий из исследуемых материалов.

## Список литературы

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / А.Н. Резников, Е.И. Алексенцев, Я.И. Барац, В.Л. Белостоцкий, Н.В. Будник, Ю.П. Бурочкин, Г.М. Гаврилов, М.В. Гомельский, А.В. Гордеев, В.И. Дрожжин, Н.П. Згонник, В.П. Зубарь, З.И. Кремень, Н.М. Мурахтанова, В.И. Муцякко, С.В. Николаев, И.С. Ногин, В.И. Пилинский, К.И. Русаков, В.А. Рыбаков, Ф.Ю. Сакулович, А.Г. Саркисов, М.Ф. Семко, Ф.П. Урывский, О.Б. Федосеев, Л.Н. Филимонов, И.Е. Фрагин, Л.В. Худобин, А.В. Шеин, В.В. Щипанов, Г.Г. Яшин. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Свитковский С.Ю., Иванова Т.Н. Исследование закономерностей и повышения эффективности процесса шлифования деталей из труднообрабатываемых материалов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2004. – № 1. – С. 22–24.
3. Гусев В.В., Медведев А.Л. Влияние механической характеристики инструмента для правки свободным абразивом на режущую способность алмазного шлифовального круга // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2013. – № 4 (61). – С. 98–103.
4. Increase in efficiency of electric powered diamond grinding of conductive material by regulating longitudinal profile of grinding wheels / V. Dobroskok, A. Shpilka, M. Morneva, N. Shpilka // *ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture*. – 2014. – Vol. 14, N 2. – P. 26–33.
5. Алексеев Н.С., Капорин В.А., Иванов С.В. Шлифование микропористых покрытий импрегнированными кругами // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2015. – № 3 (68). – С. 66–74. – doi: 10.17212/1994-6309-2015-3-66-74.
6. Vasil'ev E.V., Popov A.Y., Rechenko D.S. Diamond grinding of hard-alloy plates // *Russian Engineering Research*. – 2012. – Vol. 32, iss. 11–12. – P. 730–732. – doi: 10.3103/S1068798X1.
7. Contact processes in grinding / A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, V.V. Ivancivsky // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 788. – P. 17–21. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17.
8. Yadav R.S., Yadava V. Experimental investigations on electrical discharge diamond peripheral surface grinding (EDDPSG) of hybrid metal matrix composite // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2017. – Vol. 27. – P. 241–251. – doi: 10.1016/j.jmapro.2017.04.004.
9. Ronald B.A., Vijayaraghavan L., Krishnamurthy R. Studies on the influence of grinding wheel bond material on the grindability of metal matrix composites // *Materials & Design*. – 2009. – Vol. 30, iss. 3. – P. 679–686. – doi: 10.1016/j.matdes.2008.05.038.



10. Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning / D. de J. Oliveira, L.G. Guermandi, E.C. Bianchi, A.E. Diniz, P.R. de Aguiar, R.C. Canarim // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2012. – Vol. 212, iss. 12. – P. 2559–2568. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.05.019.
11. Handbook of machining with grinding wheels / I.D. Marinescu, M.P. Hitchiner, E. Uhlmann, W.B. Rowe, I. Inasaki. – 2<sup>nd</sup> ed. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 724 p. – ISBN 978-1-4822-0668-5. – ISBN 978-1-4822-0670-8.
12. Li H.N., Axinte D. Textured grinding wheels: a review // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2016. – Vol. 109. – P. 8–35. – doi: 10.1016/j.ijmachtools.2016.07.001.
13. Череповецкий И.Х. Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке. – Киев: Наукова думка, 1978. – 228 с.
14. Худобин Л.В., Унянин А.Н. Минимизация закаливания шлифовальных кругов. – Ульяновск: УЛГТУ, 2007. – 298 с. – ISBN 978-5-89146-982-2.
15. Diamond-ECM grinding of sintered hard alloys of WC-Ni / V.A. Mogilnikov, M.Y. Chmir, Y.S. Timofeev, V.S. Poluyanov // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 42. – P. 143–148. – doi: 10.1016/j.procir.2016.02.209.
16. The effect of diamond tool performance capability on the quality of processed surface / P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov, S.I. Petrushin // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – Vol. 379. – P. 124–130. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.124.
17. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 91. – P. 012051. – doi: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.
18. Herzenstiel P., Aurich J.C. CBN-grinding wheel with a defined grain pattern – extensive numerical and experimental studies // *Machining Science and Technology*. – 2010. – Vol. 14, iss. 3. – P. 301–322. – doi: 10.1080/10910344.2010.511574.
19. Zishan D., Beizhi L., Steven L.Y. Material phase transformation at high heating rate during grinding // *Machining Science and Technology*. – 2016. – Vol. 20, iss. 2. – P. 290–311. – doi: 10.1080/10910344.2016.1168929.
20. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. Combined electro-diamond grinding of high speed steels // *International Journal of Advances in Machining and Forming Operations*. – 2012. – Vol. 4, N 1. – P. 91–102.
21. The research into the effect of conditions of combined electric powered diamond processing on cutting power / D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, V.Yu. Skeebe // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 736. – P. 81–85. – doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.81.
22. Kremen' Z.I., Popovskii D.A., Yur'ev V.G. Grinding of titanium alloys by Elbor and diamond wheels // *Russian Engineering Research*. – 2013. – Vol. 33, iss. 8. – P. 457–459. – doi: 10.3103/S1068798X1.
23. Strel'chuk P.M., Uzunyan M.D. The energy intensity analysis of the diamond-spark grinding of the WolKar nanostructural hard alloy // *Journal of Superhard Materials*. – 2010. – Vol. 32, iss. 1. – P. 50–54. – doi: 10.3103/S106345761.
24. Batako A.D.L., Tsiakoumis V. An experimental investigation into resonance dry grinding of hardened steel and nickel alloys with element of MQL // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 77, iss. 1–4. – P. 27–41. – doi: 10.1007/s00170-014-6380-8.
25. Experimental study of time-dependent performance in superalloy high-speed grinding with CBN wheels / G. Zhi, X. Li, Z. Qian, H. Liu, Y. Rong // *Machining Science and Technology*. – 2016. – Vol. 20, iss. 4. – P. 615–633. – doi: 10.1080/10910344.2016.1224018.
26. 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.
27. Технологические особенности формирования параметров качества поверхностного слоя при алмазном выглаживании в условиях интегрированной обработки / В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, Д.Ю. Корнев, К.А. Парц // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2015. – № 3 (68). – С. 31–41. – doi: 10.17212/1994-6309-2015-3-31-41.
28. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “diamond smoothing” / V.Yu. Skeebe, V.V. Ivancivsky, D.V. Lobanov, A.K. Zhigulev, P.Yu. Skeebe // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 25. – P. 012031. – doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



# Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)











## Enhancing the Effectiveness of the Diamond Metal Bond Instrument when Grinding High-Strength Materials

Alexander Yanyushkin<sup>1, a</sup>, Dmitry Lobanov<sup>1, b, \*</sup>, Vadim Skeebe<sup>2, c</sup>,  
Viktor Gartfelder<sup>1, d</sup>, Larisa Sekletina<sup>1, e</sup>

<sup>1</sup> I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>a</sup>  <http://orcid.org/0000-0003-1969-7840>,  [yanyushkin@brstu.ru](mailto:yanyushkin@brstu.ru), <sup>b</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-4273-5107>,  [lobanov@front.ru](mailto:lobanov@front.ru),

<sup>c</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-8242-2295>,  [skeebe\\_vadim@mail.ru](mailto:skeebe_vadim@mail.ru), <sup>d</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-6759-6756>,  [harvik48@list.ru](mailto:harvik48@list.ru),

<sup>e</sup>  [larsek@list.ru](mailto:larsek@list.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 11 May 2017

Revised: 26 July 2017

Accepted: 15 August 2017

Available online: 15 September 2017

#### Keywords:

Combined grinding

Diamond wheel

Metallic bond

Electrochemical wheel dressing

Surface quality

### ABSTRACT

**The objective** is to identify the nature of the clogging process at the implementation of abrasive instrument in the processing of tough materials and to propose the technology recommendations to minimize the clogging, which will enable the enhanced use of the diamond metal bond instrument during grinding and reducing the costs of advanced and competitive products manufacturing. The research provides the analysis of the diamond metal bond wheels cutting capacity. It also gives a brief overview of the reasons for the loss of the abrasive instrument working capacity as well as evaluates the adhesive and diffusion processes in the cutting zone. The clogging of the grinding wheel is noted to be the main reason for the low working capacity of the diamond instrument. **Methods:** The experimental research was carried out on the 3D642E machine modernized for the process of the electric discharge diamond grinding and corresponding to the metrological requirements for the verification of product quality indicators. Structural research was carried out using optical and scanning microscopy, spectral and X-ray analysis. The samples were investigated on ARL X'TRA X-ray diffractometer, Carl Zeiss EVO50 scanning electron microscope with the EDS X-Act Integrated Chemical Analyzer and Carl Zeiss Axio Observer A1m optical microscope. The surface of the samples was additionally investigated by optical interferometry techniques using the surface topography complex Zygo Newviewtm 7300 which is designed to define the microrelief and structure parameters of the objects of technical and biological origin. **Results and discussion:** The proposed technology for the grinding of high-strength and nanoreinforced materials by the diamond metal bond wheels is based on maintaining the wheel high cutting properties by a continuous electrochemical dressing. The use of combined grinding technology makes it possible to significantly increase the working capacity and scope of the diamond metal bond abrasive instrument as well as to improve the processing of various hard alloys containing tungsten, cobalt, titanium or tantalum, oxide and carbide metal ceramics and nanostructured material based on zirconium boride.

**For citation:** Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Skeebe V.Yu., Gartfelder V.A., Sekletina L.S. Enhancing the effectiveness of the diamond metal bond instrument when grinding high-strength materials. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017. no. 3 (76), pp. 17–27. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-17-27. (in Russian).

### References

1. Reznikov A.N., Aleksentsev E.I., Barats Ya.I., Belostotskii V.L., Budnik N.V., Burochkin Yu.P., Gavrilo G.M., Gomel'skii M.V., Gordeev A.V., Drozhzhin V.I., Zgonnik N.P., Zubar' V.P., Kremen' Z.I., Murakhtanova N.M.,

#### \* Corresponding author

Lobanov Dmitry V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor

I.N. Ulianov Chuvash State University,

3 Spiridona Mikhailova Str.,

428015, Cheboksary, Chuvash Republic, Russian Federation

Tel.: +7-908-303-47-45, e-mail: [lobanov@front.ru](mailto:lobanov@front.ru)

Mutsyanko V.I., Nikolaev S.V., Nogin I.S., Pilinskii V.I., Rusakov K.I., Rybakov V.A., Sakulovich F.Yu., Sarkisov A.G., Semko M.F., Uryvskii F.P., Fedoseev O.B., Filimonov L.N., Fragin I.E., Khudobin L.V., Shein A.V., Shchipanov V.V., Yashin G.G. *Abrazivnaya i almaznaya obrabotka materialov* [Abrasive and diamond material processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 391 p.

2. Svitkovskii S.Yu., Ivanova T.N. Issledovanie zakonornostei i povysheniya effektivnosti protsessa shlifovaniya detalei iz trudnoobrabatyvaemykh materialov [Research of regularities and increase in efficiency of grinding of details from hard-to-process materials]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2004, no. 1, pp. 22–24.

3. Gusev V.V., Medvedev A.L. Vliyanie mekhanicheskoi kharakteristiki instrumenta dlya pravki svobodnym abrazivom na rezhushchuyu sposobnost' almaznogo shlifoval'nogo kruga [The influence of the tool mechanical characteristic for dressing by the free abrasive on cutting ability of the diamond grinding wheel]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2013, no. 4 (61), pp. 98–103.

4. Dobroskok V., Shpilka A., Morneva M., Shpilka N. Increase in efficiency of electric powered diamond grinding of conductive material by regulating longitudinal profile of grinding wheels. *TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 26–33.

5. Alexeev N.S., Kaporin V.A., Ivanov S.V. Shlifovanie mikroporistykh pokrytii impregirovannymi krugami [Grinding of microporous coatings using impregnated grinding wheels]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2015, no. 3 (68), pp. 66–74. doi: 10.17212/1994-6309-2015-3-66-74.

6. Vasil'ev E.V., Popov A.Y., Rechenko D.S. Diamond grinding of hard-alloy plates. *Russian Engineering Research*, 2012, vol. 32, iss. 11–12, pp. 730–732. doi: 10.3103/S1068798X1.

7. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Ivancivsky V.V. Contact processes in grinding. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 17–21. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17.

8. Yadav R.S., Yadava V. Experimental investigations on electrical discharge diamond peripheral surface grinding (EDDPSG) of hybrid metal matrix composite. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, vol. 27, pp. 241–251. doi: 10.1016/j.jmapro.2017.04.004.

9. Ronald B.A., Vijayaraghavan L., Krishnamurthy R. Studies on the influence of grinding wheel bond material on the grindability of metal matrix composites. *Materials & Design*, 2009, vol. 30, iss. 3, pp. 679–686. doi: 10.1016/j.matdes.2008.05.038.

10. Oliveira D.D.J., Guermendi L.G., Bianchi E.C., Diniz A.E., Aguiar P.R. de, Canarim R.C. Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, vol. 212, iss. 12, pp. 2559–2568. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.05.019.

11. Marinescu I.D., Hitchiner M.P., Uhlmann E., Rowe W.B., Inasaki I. *Handbook of machining with grinding wheels*. 2nd ed. Boca Raton, CRC Press, 2016. 724 p. ISBN 978-1-4822-0668-5. eBook ISBN 978-1-4822-0670-8.

12. Li H.N., Axinte D. Textured grinding wheels: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, vol. 109, pp. 8–35. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2016.07.001.

13. Cherepovetskii I.Kh. *Mekhanika kontaktnogo vzaimodeistviya pri almaznoi obrabotke* [Mechanics of contact interaction in diamond processing]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1978. 228 p.

14. Khudobin L.V., Unyanin A.N. *Minimizatsiya zasalivaniya shlifoval'nykh krugov* [Minimization of grinding wheels loading]. Ul'yanovsk, UIGTU Publ., 2007. 298 p. ISBN 978-5-89146-982-2.

15. Mogilnikov V.A., Chmir M.Y., Timofeev Y.S., Poluyanov V.S. Diamond-ECM grinding of sintered hard alloys of WC-Ni. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 143–148. doi: 10.1016/j.procir.2016.02.209.

16. Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Petrushin S.I. The effect of diamond tool performance capability on the quality of processed surface. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 379, pp. 124–130. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.124.

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

18. Herzenstiel P., Aurich J.C. CBN-grinding wheel with a defined grain pattern – extensive numerical and experimental studies. *Machining Science and Technology*, 2010, vol. 14, iss. 3, pp. 301–322. doi: 10.1080/10910344.2010.511574.

19. Zishan D., Beizhi L., Steven L.Y. Material phase transformation at high heating rate during grinding. *Machining Science and Technology*, 2016, vol. 20, iss. 2, pp. 290–311. doi: 10.1080/10910344.2016.1168929.

20. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. Combined electro-diamond grinding of high speed steels. *International Journal of Advances in Machining and Forming Operations*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 91–102.





21. Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Skeebe V.Yu. The research into the effect of conditions of combined electric powered diamond processing on cutting power. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 736, pp. 81–85. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.81.
22. Kremen' Z.I., Popovskii D.A., Yur'ev V.G. Grinding of titanium alloys by Elbor and diamond wheels. *Russian Engineering Research*, 2013, vol. 33, iss. 8, pp. 457–459. doi: 10.3103/S1068798X1.
23. P.M., Uzunyan M.D. The energy intensity analysis of the diamond-spark grinding of the WolKar nanostructural hard alloy. *Journal of Superhard Materials*, 2010, vol. 32, iss. 1, pp. 50–54. doi: 10.3103/S106345761.
24. Batako A.D.L., Tsiakoumis V. An experimental investigation into resonance dry grinding of hardened steel and nickel alloys with element of MQL. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 77, iss. 1–4, pp. 27–41. doi: 10.1007/s00170-014-6380-8.
25. Zhi G., Li X., Qian Z., Liu H., Rong Y. Experimental study of time-dependent performance in superalloy high-speed grinding with CBN wheels. *Machining Science and Technology*, 2016, vol. 20, iss. 4, pp. 615–633. doi: 10.1080/10910344.2016.1224018.
26. 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.
27. Skeebe V.Yu., Pushnin V.N., Kornev D.Yu., Parts K.A. Tekhnologicheskie osobennosti formirovaniya parametrov kachestva poverkhnostnogo sloya pri almaznom vyglazhivanii v usloviyakh integrirovannoi obrabotki [Technological features of forming the quality characteristics of the surface layer during diamond smoothing in the integrated processing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2015, no. 3 (68), pp. 31–41. doi: 10.17212/1994-6309-2015-3-31-41.
28. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Zhigulev A.K., Skeebe P.Yu. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “diamond smoothing”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 125, pp. 012031. doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.

### Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Исследование сварных соединений рельсов после механической обработки при различной послесварочной температуре

Андрей Ильиных<sup>1, a</sup>, Марина Галай<sup>1, b, \*</sup>, Эдуард Сидоров<sup>1, c</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Д. Ковальчук, 191, г. Новосибирск, 630049, Россия

<sup>a</sup> <http://orcid.org/0000-0002-4234-6216>, [asi@stu.ru](mailto:asi@stu.ru), <sup>b</sup> <http://orcid.org/0000-0002-7897-1750>, [galayms@mail.ru](mailto:galayms@mail.ru),

<sup>c</sup> <http://orcid.org/0000-0001-6237-142X>, [sesnsk@mail.ru](mailto:sesnsk@mail.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 625.143.482

#### История статьи:

Поступила: 15 мая 2017  
 Рецензирование: 17 июня 2017  
 Принята к печати: 25 июля 2017  
 Доступно онлайн: 15 сентября 2017

#### Ключевые слова:

Рельсы  
 Алюминотермитная сварка  
 Шлифование  
 Твердость  
 Шероховатость

#### АННОТАЦИЯ

Исследовано влияние процесса шлифования алюминотермитных сварных соединений рельсов, выполняемого при разных значениях остаточной послесварочной температуры сварного шва, на физико-механические свойства и шероховатость поверхности катания. Интервал послесварочных температур в зоне шлифования сварных швов составлял 600...850 °С. Установлено, что разные температурные режимы при выполнении технологической операции шлифования алюминотермитных стыков приводят к формированию неидентичных механических свойств металла поверхности головки рельса в зоне сварного шва. Шлифование при остаточной послесварочной температуре поверхности сварного шва 850 или 600 °С позволяет обеспечить наиболее высокие значения твердости металла 33...36 HRC, в то время как проведение операции шлифования при остаточной температуре 800 или 700 °С приводит к снижению твердости металла шва до значений 25...30 HRC. Снижение температуры металла поверхности головки рельса перед выполнением шлифования с 850 до 600 °С позволяет уменьшить значения шероховатости поверхности катания с 2,5 до 0,7 мкм. Наиболее высокие значения твердости и чистоты поверхности могут быть достигнуты, если производить шлифование головки рельса сварного шва после снижения температуры металла обрабатываемой поверхности до 600 °С при проведении процесса сварки.

**Для цитирования:** Ильиных А.С., Галай М.С., Сидоров Э.С. Исследование сварных соединений рельсов после механической обработки при различной послесварочной температуре // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 3 (76). – С. 28–34. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-28-34.

### Введение

Внедрение инновационных технологий на железнодорожном транспорте рассматривает широкий круг аспектов по разным отраслям и направлениям. Одним из таких направлений является создание бесстыкового пути с помощью алюминотермитной сварки. Применение алюминотермитной сварки на полигоне магистральных путей получило большое распространение

в странах Западной Европы и Азии. Высокими темпами идет внедрение данного способа сварки и в России.

Сварные соединения традиционно являются слабым местом в конструкции бесстыкового пути. Это подтверждается как зарубежными, так и российскими научными исследованиями. В Японии научно-исследовательским институтом железнодорожной техники выявлено, что при нарушении установки оборудования для литья появляются такие дефекты, как непровары и шлаковые включения [1]. В работах [2, 3] рассматриваются вопросы обеспечения механических свойств алюминотермитных сварных швов, схожих со свойствами свариваемых рельсов за

#### \*Адрес для переписки

Галай Марина Сергеевна, к.т.н., доцент  
 Сибирский государственный университет путей сообщения  
 ул. Д. Ковальчук, 191,  
 630049, г. Новосибирск, Россия  
**E-mail:** [galayms@mail.ru](mailto:galayms@mail.ru)

счет легирования термитной смеси. В статьях [4, 5] представлены результаты моделирования дефектов в сварных соединениях и их влияние на напряженно-деформированное состояние сварных швов при нагружении. Кроме того, имеются работы по изучению влияния термической обработки [7] и поверхностной пластической деформации [8–10] на структуру и свойства металла алюминотермитных сварных соединений рельсов.

В настоящее время технологический процесс алюминотермитной сварки регламентируется техническими условиями [11]. Согласно данному нормативному документу весь процесс алюминотермитной сварки можно разделить на три этапа: подготовительный, процесс сварки и послесварочная обработка сварного стыка. В процессе подготовительных работ формируют стыковую зазор между рельсами размером 24...26 мм, затем выравнивают концы рельсов по поверхности катания. После этого на рельсы устанавливают сварочные полуформы и уплотняют их по всему периметру прилегания к рельсу с помощью пасты. Завершающим действием при подготовке к сварке является установка стойки, на которой фиксируют тигель и газовую горелку.

Процесс сварки начинается с предварительного подогрева концов рельсов в стыке до температуры 800...850 °С. После этого в тигель засыпают термитную смесь и поджигают её, при этом выпуск расплавленного металла и заполнение им сварочной формы происходит через 20...28 с при завершении реакции горения термитной смеси.

Послесварочная обработка рельсовых стыков выполняется через 3...5 мин после заливки металла в сварочную форму. Сначала осуществляется демонтаж сварочных полуформ, затем слой лишнего металла (грат), образовавшийся на поверхности катания головки рельса, срезается специальными гидравлическими ножами, а литники, расположенные на подошве рельса, подрубаются в горячем состоянии и отбиваются с помощью кувалды и зубила.

Для обеспечения необходимой геометрии головки рельса в зоне стыка выполняют шлифование по поверхности катания и боковым граням головки рельса шлифовальным гидравлическим станком в два приема: черновое шлифование (проводится сразу после снятия грата) и чисто-

вое шлифование (проводится после остывания сварного стыка до температуры не более 100 °С).

Следует отметить, что шлифование является заключительной операцией в технологическом процессе производства алюминотермитных сварных соединений рельсов, которое не только формирует профиль рельса в зоне сварного соединения, но оказывает воздействие на физико-механические свойства поверхностного слоя. Из инструкции [11] известно, что шлифование осуществляется сразу после снятия грата, при этом сварной шов находится в горячем состоянии и может иметь разную остаточную послесварочную температуру. Отсутствие сведений о шлифовании алюминотермитных сварных соединений рельсов при разной остаточной послесварочной температуре шва и его влиянии на твердость и шероховатость определили цель настоящей работы. Выбор в качестве оцениваемых показателей твердости и шероховатости связан с тем, что данные параметры можно проконтролировать непосредственно при производстве бесстыковой конструкции железнодорожного пути в полевых условиях с применением мобильных измерительных устройств.

### Материал и методы исследования

Для оценки влияния шлифования на твердость и шероховатость сварного соединения рельса были взяты образцы, которые получали путем сваривания рельсов алюминотермитным способом сварки. В качестве исходных материалов для сварки были использованы железнодорожные рельсы из рельсовой стали и сварочный термит, состоящий из порошкообразного металлического алюминия и окиси железа [12].

После окончания процесса сварки у образцов срезали грат при помощи гидравлических ножниц. Далее образцы шлифовали при разной остаточной послесварочной температуре металла сварного шва, которая составляла 850, 800, 700 и 600 °С. Температурный диапазон 850...600 °С выбран экспериментально, поскольку в нормативной документации [11] не установлен температурный интервал, при котором необходимо выполнять операцию шлифования. Поэтому за наибольшее значение послесварочной температуры сварного соединения принято значение 850 °С, которое зафиксировано сразу



после снятия грата. Нижняя граница температурного диапазона выбрана 600 °С из-за того, что при данной температуре полностью произошли фазовые превращения. Температуру металла в зоне сварного шва измеряли бесконтактным способом с помощью цифрового пирометра Mastech MS6550A. Образцы шлифовали шлифовальным гидравлическим станком СШГ-1 фирмы «СНАГА» при частоте вращения 3000 об/мин и глубине резания – 0,2 мм.

Для измерения твердости и шероховатости поверхности катания сварного шва рельса были вырезаны темплеты с помощью горизонтального полуавтоматического ленточного станка UE-350 SA. Твердость измеряли универсальным твердомером HBRV-187.5 по методу Роквелла в соответствии с ГОСТ 9013–59. Схема нанесения отпечатков при измерении твердости показана на рис. 1. Измерение шероховатости поверхности проводили на профилометре MarSurf PS1 в соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 2789–73.

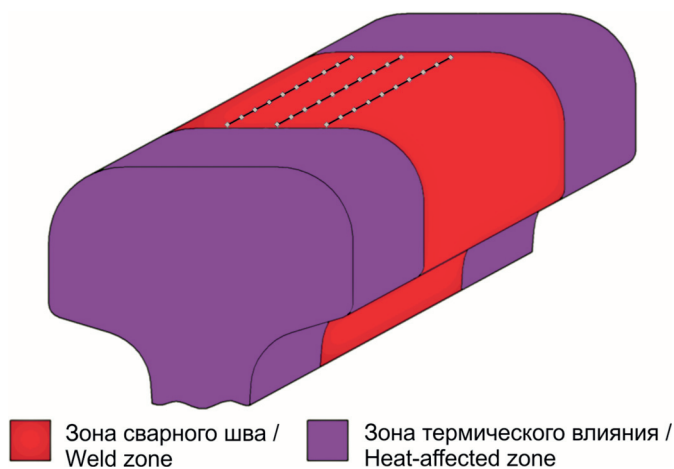


Рис. 1. Схема измерения твердости сварного шва  
Fig. 1. The hardness measurement design of a weld

### Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены результаты измерения твердости образцов, шлифованных при разной остаточной послесварочной температуре рельса. Следует отметить, что значения твердости образцов находятся в широком диапазоне от 24 до 35 HRC.

Наибольшее увеличение твердости до 34...36 HRC наблюдается при шлифовании сварного соединения, когда остаточная послесварочная

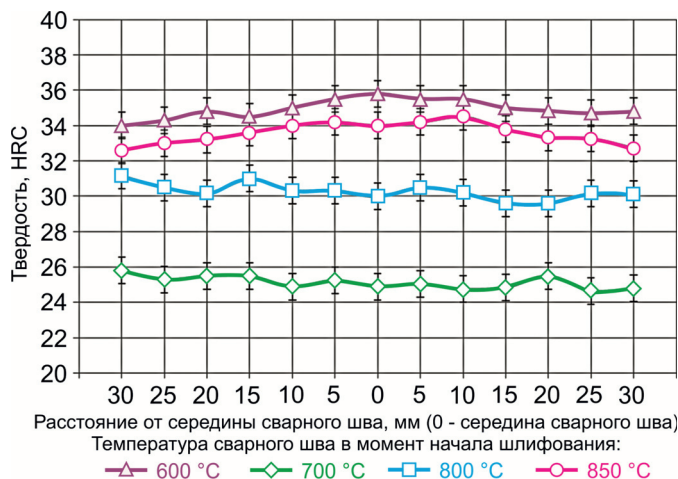


Рис. 2. Распределение твердости сварного шва на поверхности катания головки рельса после шлифования при разной остаточной послесварочной температуре  
Fig. 2. The distribution of hardness of the weld on the rolling surface of the rail head after grinding at different residual post-weld temperature

температура рельса составляет 600 °С. По-видимому, это связано с тем, что при шлифовании под действием сил резания в металле происходит пластическая деформация в области уже перлитной структуры. Однако пластическая деформация при остаточной послесварочной температуре 700 °С происходит в области самого перлитного превращения, при этом наблюдается снижение твердости до 24...25 HRC.

Шлифование сварных соединений рельсов в диапазоне температур 800...850 °С приводит к эффекту высокотемпературной термомеханической обработки. В результате деформации в аустените образуются субструктурные построения, которые наследуются при последующем фазовом превращении перлитом [13, 14]. Твердость сварных швов, шлифованных при температуре 800...850 °С, составляет 30...34 HRC.

Результаты исследования влияния шлифования сварных соединений рельсов, имеющих разную остаточную послесварочную температуру, на величину шероховатости поверхности представлены на рис. 3.

Из графика видно, что значения шероховатости уменьшаются со снижением послесварочной температуры сварного шва. Так, при шлифовании сварного соединения с остаточной послесварочной температурой 850 °С шероховатость варьируется от 2,3 до 2,6 мкм, а при шлифовании с остаточной послесварочной температурой 600 °С шероховатость составляет 0,6...0,8 мкм.

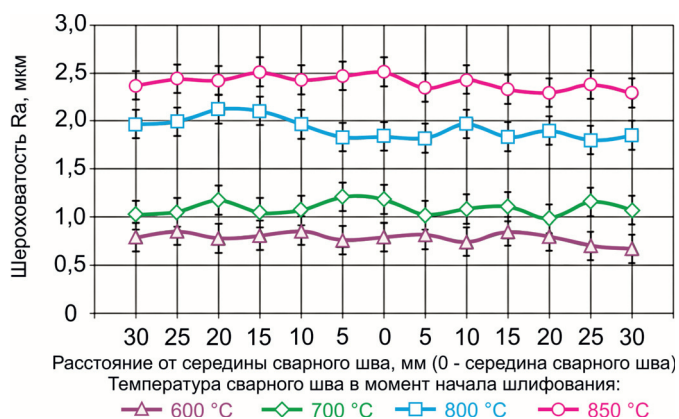


Рис. 3. Распределение шероховатости сварного шва после шлифования при разной остаточной послесварочной температуре

Fig. 3. The distribution of the roughness of the weld after grinding at different residual post-weld temperature

Это объясняется тем, что при температуре 850 °C в зоне резания сконцентрировано много теплоты, в результате чего металл поверхностного слоя значительно размягчается, повышается шероховатость [15]. При температуре шлифования 600 °C тепловое воздействие уменьшается и деформация поверхности происходит в меньшей степени.

При проведении электронно-микроскопических исследований, представленных на рис. 4, на поверхности образцов, шлифованных при остаточной послесварочной температуре 850 °C, зафиксировано наличие грубых бороздок. Известно, что грубые поперечные риски, возникающие при шлифовании, могут приводить к образова-

нию продольных трещин контактной усталости, которые, развиваясь, иногда способны вызывать опасность полного разрушения рельсов [16]. На поверхности образцов, которые шлифовали при остаточной послесварочной температуре 600 °C, бороздки такого рода отсутствуют.

## Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что остаточная послесварочная температура сварного соединения оказывает влияние на твердость и шероховатость в процессе шлифования. Характер распределения твердости образцов, шлифованных при остаточной температуре 850 и 600 °C, одинаков и составляет 34...36 HRC. При шлифовании сварных соединений рельсов с остаточной послесварочной температурой 700 и 800 °C происходит снижение твердости на 6...10 HRC по сравнению с шлифованием швов с остаточной температурой 850 и 600 °C. Экспериментально установлено, что шлифование, осуществляемое при варьировании остаточной послесварочной температуры сварного соединения от 600 до 850 °C, приводит к увеличению шероховатости поверхности от 0,6 до 2,6 мкм.

Полученные при исследовании данные позволяют определить оптимальное значение остаточной послесварочной температуры, при которой необходимо проводить шлифование алюмини-

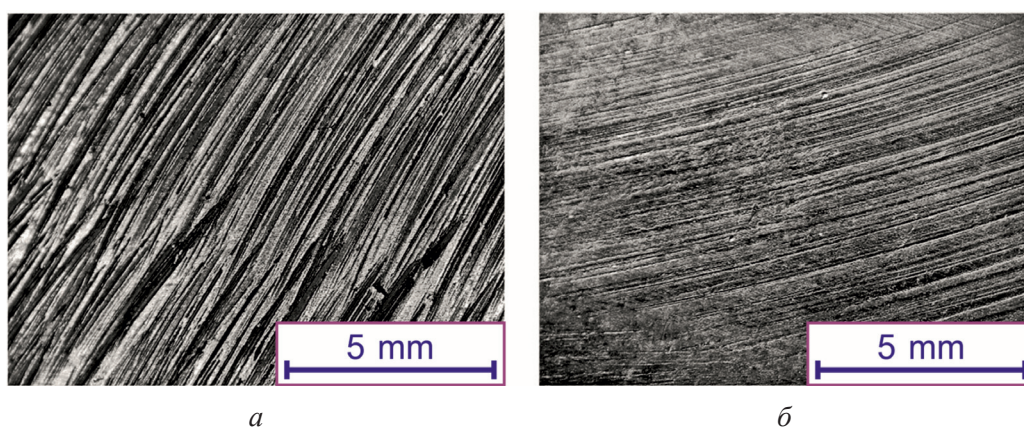


Рис. 4. Вид поверхностей образцов после шлифования:

*a* – при остаточной послесварочной температуре шва 850 °C; *б* – при остаточной послесварочной температуре шва 600 °C

Fig. 4. The surface of the samples after grinding:

*a* – at a residual post-weld temperature of 850 °C; *б* – at a residual post-weld temperature of 600 °C

мальным значением остаточной послесварочной температуры является 600 °С. При шлифовании образцов, имеющих данную остаточную послесварочную температуру, наблюдается повышенное значение твердости и минимальное значение шероховатости. На основании проведенных исследований можно утверждать, что шлифование сварных соединений рельсов в горячем состоянии является перспективным направлением в области совершенствования технологических процессов послесварочной обработки сварных соединений.

### Список литературы

1. Investigation of cause and prevention measures against surface defects on thermit welds / R. Yamamoto, Y. Terashita, M. Tatsumi, H. Itoh, K. Umenai // Quarterly Report of RTRI. – 2016. – Vol. 57, N 2. – P. 112–117.
2. Costea D.M., Gáman M.N., Dumitru G. The weld aluminothermic optimization of rail track by microalloyed // Bulletin of the Transilvania University of Braşov CIBV. – 2014 – Vol. 7 (56), special iss. 1. – P. 285–288.
3. Brânzei M., Coman T. Structure improvement of aluminothermic welding joints by using modifiers // International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering. – 2012 – Vol. 6, N 8. – P. 745–748.
4. Mouallif Z., Radi B., Mouallif I. The thermomechanical modeling of aluminothermic welds affected by different defects // International Journal of Engineering Research and Development. – 2015 – Vol. 11, iss. 10. – P. 44–48.
5. Mohassel A., Kokabi H., Davami P. Mechanical and metallurgical properties of wide-gap aluminothermic rail welds // Iranian Journal of Materials & Engineering. – 2011. – Vol. 8, N 4. – P. 27–33.
6. Способы повышения качества алюминотермитных сварных соединений рельсов / Д.С. Насонов, А.В. Гудков, А.И. Борц, А.И. Николин // Развитие железнодорожного транспорта в условиях реформирования: сборник статей ученых и аспирантов. – М., 2006. – С. 189–194.
7. Влияние нормализации на структуру и механические свойства алюминотермитных сварных соединений рельсов / Л.Б. Тихомирова, А.С. Ильиных, М.С. Галай, Э.С. Сидоров // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 1 (70). – С. 60–66. – doi: 10.17212/1994-6309-2016-1-60-66.
8. Каргин В.А., Тихомирова Л.Б., Галай М.С. Упрочнение сварных соединений рельсов методом поверхностного пластического деформирования // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 3 (48). – С. 17–18.
9. Влияние виброударной обработки на физико-механические свойства поверхностного слоя сварных соединений рельсов / В.А. Каргин, Л.Б. Тихомирова, А.Д. Абрамов, М.С. Галай // Сварочное производство. – 2013. – № 3. – С. 38–40.
10. Improving service properties of welded joints produced by aluminothermic welding / V.A. Karguin, L.B. Tikhomirova, M.S. Galay, Ye.S. Kuznetsova // Welding International. – 2015. – Vol. 29, iss. 2. – P. 155–157. – doi: 10.1080/09507116.2014.897809.
11. ТУ 0921-127-01124323–2005. Сварка рельсов алюминотермитным методом промежуточного литья. Технические условия. – Введ. 01.04.2005. – М.: ФГУП ВНИИЖТ, 2005. – 27 с.
12. Пасько С.В., Тихомирова Л.Б., Болотова О.В. Алюмотермитная сварка рельсов методом промежуточного литья по технологии фирмы «СНАГА»: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2010. – 99 с. – ISBN 5-93461-418-5.
13. Тушинский Л.И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов. – Новосибирск: Наука, 1990. – 306 с.
14. Капуткина Л.М., Берштейн М.Л., Займовский В.А. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 430 с.
15. Зубарев Ю.М. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов: учебное пособие. – М.: Лань, 2010. – 304 с. – ISBN 978-5-8114-0973-0.
16. Шур Е.А. Повреждения рельсов. – М.: Интекст, 2012. – 192 с. – ISBN 978-5-89277-108-5.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.





## Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)





### Investigation of Welded Rail Joints after Machining at Different Post-Weld Temperature

Andrey Ilinykh<sup>1, a</sup>, Marina Galay<sup>1, b, \*</sup>, Eduard Sidorov<sup>1, c</sup>

<sup>1</sup> Siberian Transport University, 191 Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

<sup>a</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-4234-6216>,  [asi@stu.ru](mailto:asi@stu.ru), <sup>b</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-7897-1750>,  [galayms@mail.ru](mailto:galayms@mail.ru),

<sup>c</sup>  <http://orcid.org/0000-0001-6237-142X>,  [sesnsk@mail.ru](mailto:sesnsk@mail.ru)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 15 May 2017

Revised: 17 June 2017

Accepted: 25 July 2017

Available online: 15 September 2017

##### Keywords:

Rails

Aluminothermic Welding

Grinding Process

Hardness

Surface Roughness

#### ABSTRACT

Welded rail joints are integral part of continuous welded rail. However, its reliability during the operation is not sufficiently high. The influence of the grinding process of aluminothermite welded rail joints, performed at different values of the residual post-weld temperature of the weld, on the physical and mechanical properties and roughness of the rolling surface is investigated. The process of grinding is carried out at different values of residual post-weld temperature. The interval of post-weld temperatures in the zone of grinding of welded joints was 600...850 °C. It is established that, different temperature regimes, when performing the technological operation of grinding aluminothermite joints, lead to the formation of non-identical mechanical properties of the metal surface of the rail head in the weld zone. Grinding at a residual post-weld temperature of the weld surface of 850 °C or 600 °C allows the highest hardness values of 33 ... 36 HRC to be achieved, while grinding at a residual temperature of 800 °C or 700 °C results in a decrease in the hardness of the weld metal to 25 ... 30 HRC. However, after grinding when the residual post-weld temperature is 800...700 °C hardness of the welded metal decreases from 25 to 30 HRC. Reducing the temperature of the metal surface of the railhead before grinding from 850 °C to 600 °C allows reducing the roughness of the rolling surface from 2.5 microns to 0.7 microns. The received results indicate that the highest values of hardness and surface finish can be reached when temperature of rail welded joint head metal is 600 °C during grinding when carrying out process of welding. It can be claimed that grinding of rails welded joints in a hot state is the perspective direction in the field of improvement of post-weld technological process of welded joints.

**For citation:** Ilinykh A.S., Galay M.S., Sidorov E.S. Investigation of welded rail joints after machining at different post-weld temperature. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017. no. 3 (76), pp. 28–34. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-28-34. (in Russian).

#### References

1. Yamamoto R., Terashita Y., Tatsumi M., Itoh H., Umenai K. Investigation of cause and prevention measures against surface defects on thermit welds. *Quarterly Report of RTRI*, 2016, vol. 57, no. 2, pp. 112–117. doi: 10.2219/rtriqr.57.2\_112.
2. Costea D.M., Găman M.N., Dumitru G. The weld aluminothermic optimization of rail track by microalloyed. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov CIBv*, 2014, vol. 7 (56), special iss. 1, pp. 285–288.
3. Brânzei M, Coman T. Structure improvement of aluminothermic welding joints by using modifiers. *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 2012, vol. 6, no. 8, pp. 745–748.
4. Mouallif Z., Radi B., Mouallif I. The thermomechanical modeling of aluminothermic welds affected by different defects. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2015, vol. 11, iss. 10, pp. 44–48.

##### \* Corresponding author

Galay Marina S., Ph.D. (Engineering)

Siberian Transport University,

191 Dusi Kovalchuk st.,

630049, Novosibirsk, Russian Federation

E-mail: [galayms@mail.ru](mailto:galayms@mail.ru)

5. Mohassel A., Kokabi H., Davami P. Mechanical and metallurgical properties of wide-gap aluminothermic rail welds. *Iranian Journal of Materials & Engineering*, 2011, vol. 8, no. 4, pp. 27–33.
6. Nasonov D.S., Gudkov A.V., Borts A.I., Nikolin A.I. [Ways to improve the quality of aluminothermic welded joints of rails]. *Razvitie zhelezнодорожного транспорта v usloviyakh reformirovaniya: sbornik statei uchenykh I aspirantov* [The development of railway transport in the conditions of reforming: proceedings of scientists and Ph.D. students “]. Moscow, 2006, pp. 189–194. (In Russian).
7. Ilinykh A.S., Tikhomirova L.B., Galay M.S., Sidorov Je.S. Vliyanie normalizatsii na strukturu i mekhanicheskie svoystva alyuminotermitykh svarnykh soedinenii rel'sov [The effect of normalization on the structure and mechanical properties of rails aluminotermite welded joints]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2016, no. 1 (70), pp. 60–66. doi: 10.17212/1994-6309-2016-1-60-66.
8. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Galay M.S. Uprochnenie svarnykh soedinenii rel'sov metodom poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya [Strengthening of butt rail neck by the surface plastic deformation]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2010, no. 3 (48), pp. 17–18.
9. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Abramov A.D., Galay M.S. Vliyanie vibroudarnoi obrabotki na fiziko-mekhanicheskie svoystva poverkhnostnogo sloya svarnykh soedinenii rel'sov [Influence of shock-vibrating machining on physical-mechanical properties of the surface layer of metal welds]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding International*, 2013, no. 3. pp. 38–40. (In Russian).
10. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Galay M.S., Kuznetsova Ye.S. Improving service properties of welded joints produced by aluminothermic welding. *Welding International*, 2015, vol. 29, iss. 2, pp. 155–157. doi: 10.1080/09507116.2014.897809.
11. TU 0921-127-01124323–2005. *Svarka rel'sov alyuminotermitym metodom promezhutochnogo lit'ya. Tekhnicheskie usloviya* [Specifications 0921-127-01124323–2005. The aluminothermic rail welding methods-house of the intermediate casting]. Moscow, VNIIZhT Publ., 2005. 27 p.
12. Pas'ko S.V., Tikhomirova L.B., Bolotova O.V. *Alyumotermitynaya svarka rel'sov metodom promezhutochnogo lit'ya po tekhnologii firmy “SNAGA”* [Aluminothermic rail welding by intermediate casting method as developed by the SNAGA Co.]. Novosibirsk, SGUPS Publ., 2010. 99 p. ISBN 5-93461-418-5.
13. Tushinskii L.I. *Teoriya i tekhnologiya uprochneniya metallicheskiy splyavov* [Theory and technology of hardening metal alloys]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 306 p.
14. Kaputkina L.M., Bershtein M.L., Zaimovskii V.A. *Termomekhanicheskaya obrabotka stali* [Thermomechanical treatment of steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 480 p.
15. Zubarev Yu.M. *Teoriya i praktika povysheniya effektivnosti shlifovaniya materialov* [Theory and practice of improving the efficiency of grinding materials]. Moscow, Lan' Publ., 2010. 304 p. ISBN 978-5-8114-0973-0.
16. Shur E.A. *Povrezhdeniya rel'sov* [Damages of rails]. Moscow, Intekst Publ., 2012. 192 p. ISBN 978-5-89277-108-5.

## Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

© 2017 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](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Динамическая потеря устойчивости тяги рулевого устройства самолета при технологических испытаниях

Владимир Атапин<sup>1, а,\*</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

<sup>а</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-5030-6054>,  [atapin.49@mail.ru](mailto:atapin.49@mail.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 519.6:621.9.06

#### История статьи:

Поступила: 07 марта 2017  
 Рецензирование: 15 мая 2017  
 Принята к печати: 25 июля 2017  
 Доступно онлайн: 15 сентября 2017

#### Ключевые слова:

Моделирование  
 Динамическая потеря устойчивости  
 Уравнение Матье  
 Диаграмма Айнса-Стретта  
 Тяга рулевого устройства

#### АННОТАЦИЯ

Для технологического контроля прочности тяги рулевого устройства самолета применяют выборочные разрушающие испытания готовых изделий при статической и повторно-статической осевой нагрузке. Для уменьшения времени и применения неразрушающих методов контроля тяги испытывают на установке, имеющей двухмассовую колебательную систему. Колебательная система состоит из тяги постоянного поперечного сечения с двумя одинаковыми концевыми грузами и подвешена на тонкой стальной струне в вертикальном положении. В тяге под воздействием переменной продольной силы  $P(t) = P \cos \Omega t$  создаются резонансные продольные колебания, имеющие место в реальных условиях эксплуатации. Продольные колебания тяги реализуются по второй собственной форме. Первая собственная форма колебаний соответствует движению тяги с грузами как жесткого целого и не представляет практического интереса. Эксперименты показали, что при продольных колебаниях существует потеря устойчивости тяги в форме параметрического резонанса. В этом случае кроме продольных колебаний дополнительно появляются поперечные (изгибные) колебания. Представляет интерес определение условий возникновения параметрического резонанса тяги рулевого устройства самолета в процессе технологических испытаний. Аналитическое решение задачи приводит к уравнению Матье, результаты решения которого для различных комбинаций коэффициентов уравнения представляются в виде диаграммы Айнса-Стретта. Расчет тяги с размерами  $D \times d \times l = 35 \times 32 \times 1200$  (мм) по уравнению Матье показал, что при рабочих напряжениях 10 МПа тяга работает в зоне динамической неустойчивости. Этот факт подтвержден экспериментально. Эксперимент с короткой тягой, имеющей размеры  $D \times d \times l = 25 \times 22 \times 600$  (мм), показал, что тяга испытывает продольные колебания без поперечных колебаний до напряжений 68 МПа. Таким образом, для коротких тяг имеется больший диапазон рабочих напряжений на данной экспериментальной установке. Уравнение Матье справедливо для всех типоразмеров тяг. Уравнение позволяет определять такие параметры колебательной системы, при которых тяга будет испытывать только продольные колебания, адекватные для работы тяги в реальных условиях.

**Для цитирования:** Атапин В.Г. Динамическая потеря устойчивости тяги рулевого устройства самолета при технологических испытаниях // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 3 (76). – С. 35–41. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-35-41.

### Введение

Для контроля прочности тяг рулевого устройства самолета (рис. 1) согласно действующим на предприятии техническим условиям приме-

няются выборочные разрушающие испытания готовых изделий при статической и повторно-статической (циклической) нагрузке по схеме, изображенной на рис. 2. Циклическая нагрузка при испытании плавно увеличивается от нуля до значения  $P_{\max} = 0,5 P_{\text{расчет}}$  в соответствии с графиком, приведенным на рис. 2. Здесь  $P_{\text{расчет}} = \sigma_B / A$ , где  $\sigma_B$  – предел прочности материала тяги;  $A$  – площадь поперечного сечения тяги.

#### \*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.49@mail.ru](mailto:atapin.49@mail.ru)



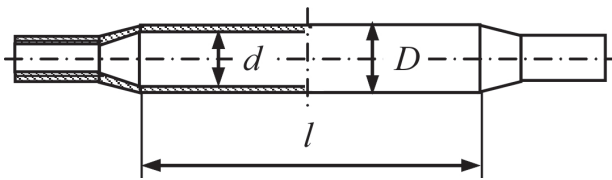


Рис. 1. Эскиз тяги

Fig. 1. Rough drawing of the rod

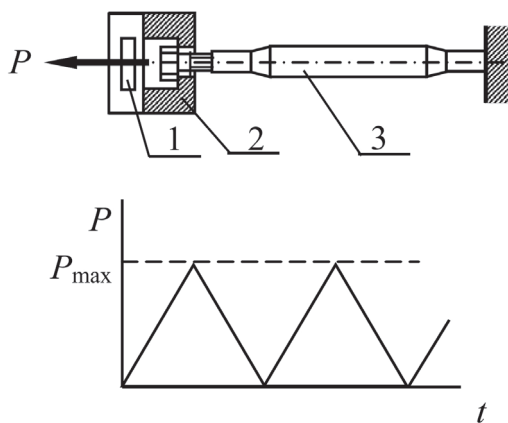


Рис. 2. Схема нагружения тяги и график изменения нагрузки от времени  $t$  при повторно-статических испытаниях:

1 – датчик; 2 – ползун; 3 – тяга

Fig. 2. The load configuration of the rod and the load-time curve at repeated-static tests:

1 – sensor; 2 – slider; 3 – rod

Испытания проводятся до базового числа  $N_6 = 5 \cdot 10^4$  циклов (испытания изделий, выдержавших  $5 \cdot 10^4$  циклов, прекращаются). Частота нагружения составляет 10...20 циклов в минуту.

Заводской метод контроля прочности тяг имеет ряд недостатков:

1) большая длительность контроля одной партии изделий (состоит из пяти одновременно контролируемых тяг) – 80 ч;

2) при контроле разрушаются годные тяги, так как это – разрушающий метод контроля;

3) отсутствует надлежащая гарантия в правильной оценке генеральной совокупности, так как это – выборочный контроль.

Анализ технической литературы по неразрушающим методам контроля и экспериментальным установкам [1–3] показывает, что альтернативу заводским испытаниям может составить неразрушающий метод испытаний с регистрацией логарифмического декремента при

свободных колебаниях на установке, позволяющей осуществлять свободные и вынужденные колебания тяги. Расчетная схема такой экспериментальной установки показана на рис. 3, а. Прямолинейный стержень (тяга) 3 постоянного поперечного сечения с двумя одинаковыми концевыми грузами 2 подвешен вертикально на тонкой стальной струне 1 и испытывает воздействие продольной силы  $P(t) = P \cos \Omega t$ , где  $\Omega$  – частота вынужденных колебаний. Масса концевой груза  $M \gg ml$ , где  $m$  – погонная масса стержня;  $l$  – длина стержня. Реализуются резонансные продольные колебания тяги с грузами. Эксперименты показали, что при испытании имеет место динамическая потеря устойчивости тяги в форме параметрического резонанса [4, 5].

Цель работы заключается в изучении условий возникновения параметрического резонанса и в анализе способов его устранения при технологических испытаниях тяги рулевого устройства самолета.

## Теория

В стержне (тяге) возбуждаются вынужденные резонансные продольные колебания по второй собственной форме, первая собственная форма колебаний соответствует движению стержня с грузами как жесткого целого и не представляет практического интереса. При расчете необходим учет влияния продольных сил инерции. Силы инерции, связанные с поворотами поперечных сечений относительно главных осей, не учитываются, так как их влияние ощутимо только для элементов, поперечные размеры которых соизмеримы с их длиной. При продольных колебаниях по второй собственной форме вследствие симметрии системы посередине стержня образуется узел колебаний, поэтому в дальнейшем при анализе продольных колебаний рассматривается половина стержня (рис. 3, б). При анализе поперечных колебаний рассматривается шарнирно-опертый по концам стержень (рис. 3, в). Принятые расчетные схемы колебаний стержня подтверждаются экспериментально.

Дифференциальные уравнения, учитывающие взаимное влияние продольных и поперечных колебаний, имеют следующий вид [4]:

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} =$$

$$= m \int_0^x \left[ \frac{\partial v}{\partial \xi} \frac{\partial^3 v}{\partial \xi \partial t^2} + \left( \frac{\partial^2 v}{\partial \xi \partial t} \right)^2 \right] d\xi, \quad (1)$$

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + EA \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $u(x,t)$  и  $v(x,t)$  – продольное и поперечное перемещения текущего сечения стержня соответственно;  $EA$  и  $EI$  – жесткость поперечного сечения стержня при растяжении-сжатии и изгибе соответственно [6, 7];  $E$  – модуль упругости материала стержня;  $I$  – осевой момент инерции поперечного сечения стержня.

Совместное решение (1) и (2) затруднительно. Однако для выяснения незатухающих поперечных колебаний можно пренебречь нелинейными членами правой части уравнения (1), которые по своему смыслу учитывают влияние «нелинейной инерционности». Тогда уравнение (1) содержит только  $u(x,t)$  и может быть разрешено независимо от уравнения (2):

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0.$$

Стационарные вынужденные продольные колебания происходят с частотой возбуждения и описываются законом

$$u(x,t) = u(x) \cos \Omega t. \quad (3)$$

При граничных условиях (рис. 3, б) [4, 5]

$$x = 0 \quad u = 0,$$

$$x = l/2 \quad u' = \frac{P}{EA} + \frac{M\Omega^2}{EA} u$$

имеем полное решение уравнения (3) в виде

$$u(x,t) = \frac{P \cos \Omega t}{EA \frac{\Omega}{c} \cos \frac{\Omega l}{2c} - M\Omega^2 \sin \frac{\Omega l}{2c}} \sin \frac{\Omega}{c} x,$$

где  $c = \sqrt{\frac{EA}{m}}$ . Обозначая  $k = \Omega \sqrt{m/(EA)}$ , окончательно получаем

$$u(x,t) = \frac{P \cos \Omega t}{kEA \cos \frac{kl}{2} - M\Omega^2 \sin \frac{kl}{2}} \sin kx. \quad (4)$$

При стремлении знаменателя в выражении (4) к нулю  $u(x,t)$  обращается в бесконечность. Это

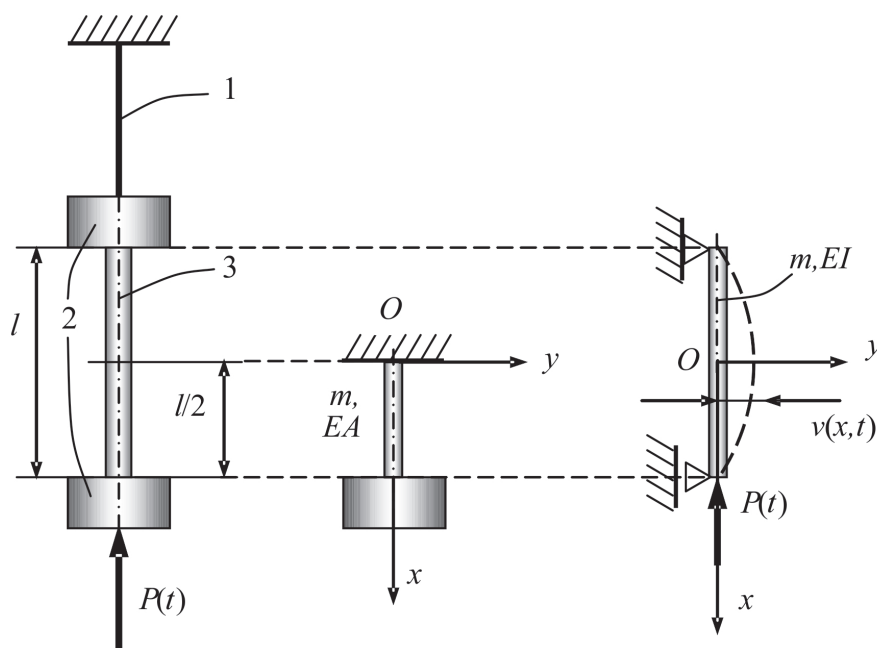


Рис. 3. Расчетная схема установки (а), расчетная схема для продольных (б) и поперечных (в) колебаний

Fig. 3. The analytical model of the installation (a), the analytical model for longitudinal (б) and transverse (в) oscillations

соответствует резонансу продольных колебаний, и частотное уравнение имеет следующий вид:

$$kl \operatorname{tg}(kl/2) = ml/M.$$

В нашем случае  $ml \ll M$  и решающее влияние на частоту продольных колебаний оказывает масса концевого груза. В этом случае для низшей собственной частоты приближенно можно принять [4]

$$\Omega = \sqrt{\frac{2EA}{Ml(1 + \alpha/3)}}, \quad (5)$$

где  $\alpha = ml/M$ .

Найденное выражение  $u(x,t)$  подставляем в уравнение (2) и получаем

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + EA \frac{P \cos \Omega t}{kEA \cos(kl/2) - M\Omega^2 \sin(kl/2)} \times \left( -\frac{\partial v}{\partial x} k^2 \sin kx + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} k \cos kx \right) + m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0. \quad (6)$$

Решение уравнения (6) разыскиваем с помощью вариационного метода Бубнова–Галеркина [8]. В качестве аппроксимирующей функции прогиба принимаем

$$v(x,t) = f(t) \cos(\pi x/l),$$

отвечающей граничным условиям задачи:

$$\text{при } x = \pm l/2 \quad v = 0, \quad \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0.$$

Окончательно с учетом (5) получаем следующее уравнение:

$$\ddot{f} + \omega^2 (1 - 2\mu\psi \cos \Omega t) f = 0, \quad (7)$$

где  $\omega^2 = \pi^4 EI/ml^4$  – частота поперечных колебаний стержня;  $\mu = P/2P_*$ ;  $P_* = \pi^2 EI/l^2$  – критическая сила по Эйлеру [7];

$$\psi = \frac{\frac{4}{l} \int_0^{l/2} \cos kx \cos^2 \frac{\pi x}{l} dx - \frac{2k}{\pi} \int_0^{l/2} \sin kx \sin \frac{2\pi x}{l} dx}{\cos(kl/2) - \sqrt{2M/ml(1 + \alpha/3)} \sin(kl/2)}.$$

Вычисление  $\psi$  дает следующее выражение:

$$\psi = \frac{2(1 - k^2 l^2 / \pi^2)}{kl(1 - k^2 l^2 / 4\pi^2)} \times \frac{\sin(kl/2)}{\cos(kl/2) - \sqrt{2M/ml(1 + \alpha/3)} \sin(kl/2)}.$$

Если положить  $\Omega t = 2\tau$ ,  $a = 4\omega^2/\Omega^2$ ,  $q = 4\mu\psi\omega^2/\Omega^2$ , уравнение (7) приводится к уравнению Матъе [4, 5]:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \tau^2} + (a - 2q \cos 2\tau) f = 0. \quad (8)$$

Результаты решения уравнения Матъе для различных комбинаций коэффициентов  $a$  и  $q$  представляются в виде диаграммы Айнса–Стретта [5, 9]. Различные аспекты исследования уравнения Матъе и представлений диаграммы Айнса–Стретта изложены в работах [10–16].

## Результаты и обсуждение

Расчеты выполнены для тяги с размерами  $D \times d \times l = 35 \times 32 \times 1200$  (мм), материал Д16Т, концевой груз с размерами  $D \times h = 120 \times 100$  (мм), материал – сталь 45. Вычисленные коэффициенты уравнения (8), например при рабочем напряжении  $\sigma = 10$  МПа, имеют следующие значения:  $a = 0,36$ ,  $q = 0,89$ . На диаграмме Айнса–Стретта (рис. 4) эта точка находится в белой зоне (неустойчивость), и, как показали эксперименты, стержень при этом напряжении испытывает совместные продольные и поперечные колебания. Для устранения поперечных колебаний тяги данного типоразмера следует изменить условия испытания, в частности, за счет изменения длины тяги, массы концевых грузов, вариации частот продольных и поперечных колебаний. Так, проведенные эксперименты для тяги с размерами



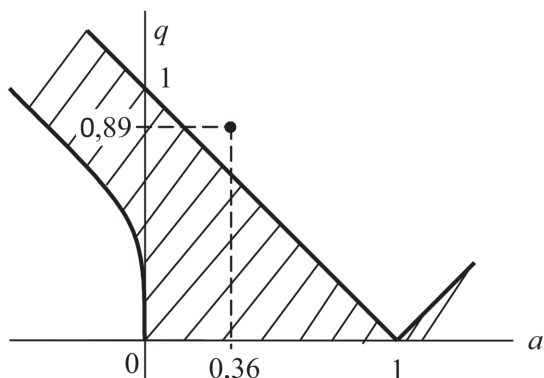


Рис. 4. Фрагмент диаграммы Айнса-Стретта [5] (зона устойчивости заштрихована)

Fig. 4. Fragment of the Ains-Strett diagram [5] (the zone of stability is shaded)

$D \times d \times l = 25 \times 22 \times 600$  (мм) и уменьшенными грузами на концах тяги показали их динамическую устойчивость до уровня рабочих напряжений  $\sigma = 68$  МПа. Таким образом, для коротких тяг имеет место большой диапазон рабочих напряжений на данной экспериментальной установке.

Полученное уравнение (8) позволяет подобрать необходимые параметры колебательной системы для проведения испытаний в условиях только продольных колебаний.

## Выводы

Уравнение (8) справедливо для всех типоразмеров тяг. Оно позволяет определять такие параметры колебательной системы, при которых тяга будет испытывать только продольные колебания. Показана возможность проведения технологических испытаний тяг рулевого устройства на рассмотренной двухмассовой установке с учетом использования уравнения (8).

## Список литературы

1. Туманов А.Т. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов: справочное пособие. Т.1. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
2. Испытательная техника. В 2 кн. Кн. 2: справочник / Г.С. Батуев, В.С. Голубков, В.В. Ключев, А.С. Больших; под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1982. – 560 с.

3. Неразрушающий контроль металлов и изделий: справочник / под ред. Г.С. Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.

4. Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем. – М.: Гостехиздат, 1956. – 600 с.

5. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. – М.: Либроком, 2010. – 274 с. – ISBN 978-5-397-01066-5.

6. Прочность, устойчивость, колебания. Т. 3: справочное руководство / под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 568 с.

7. Атапин В.Г. Сопротивление материалов. – М.: Юрайт, 2016. – 342 с. – ISBN 978-5-534-01762-5.

8. Вольмир А.С., Григорьев А.И., Станкевич А.И. Сопротивление материалов. – М.: Дрофа, 2007. – 592 с. – ISBN 978-5-358-01283-7.

9. Pol B. van der, Strutt M.J. On the stability of the solutions of Mathieu's equation // Philosophical Magazine. – 1928. – Vol. 5. – P. 18–38.

10. Нестерев А.В., Нестерев С.В. Исследование решений уравнения Матье в первой области устойчивости при моделировании нестационарных объектов управления // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2011. – № 1-1. – С. 102–107.

11. Грибков В.А., Хохлов А.О. Прием, упрощающий решение задачи устойчивости параметрически стабилизируемых статически неустойчивых маятниковых систем // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – № 11 (668). – С. 29–38. – doi: 10.18698/0536-1044-2015-11-29-38.

12. Arkhipova I.M., Luongo A., Seyranian A.P. Vibrational stabilization of the upright statically unstable position of a double pendulum // Journal of Sound and Vibration. – 2012. – Vol. 331, iss. 2. – P. 457–469. – doi: 10.1016/j.jsv.2011.09.007.

13. Parovik R.I. Fractal parametric oscillator as a model of a nonlinear oscillation system in natural mediums // International Journal of Communications, Network and System Sciences. – 2013. – Vol. 6, N 3. – P. 134–138. – doi: 10.4236/ijcns.2013.63016.

14. Rand R.H., Sah S.M., Suchrsky M.K. Fractional Mathieu equation // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2010. – Vol. 15. – P. 3254–3262.

15. Паровик Р.И. Диграмы Стретта-Айнса для обобщенного уравнения Матье // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2012. – Т. 4, № 1. – С. 24–30. – doi: 10.18454/2079-6641-2012-4-1-24-30.



# Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science



Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Dynamic Instability of the Flight Control Connecting Rod in Technological Tests

Vladimir Atapin<sup>1, a, \*</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>a</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-5030-6054>,  [atapin.49@mail.ru](mailto:atapin.49@mail.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 7 March 2017

Revised: 15 May 2017

Accepted: 25 July 2017

Available online: 15 September 2017

#### Keywords:

Simulation

Dynamic stability

Mathieu's equation

Ince-Strutt diagram

Flight control connecting rod

### ABSTRACT

For technological control strength of the flight control connecting rod (further rod) selective destructive tests of ready details in static and pulsating axial loads are used. In order to decrease the time and to use non-destructive control methods rods are tested on the experimental installation, which has the two-mass oscillating system. The oscillating system consists of a rod with two identical tipweights and hanging on a thin steel string vertically. A rod under action a longitudinal force  $P(t) = P \cos \Omega t$  has the resonant longitudinal oscillations which occur in actual use. A rod is the resonant longitudinal oscillations for the second natural form. The first natural form corresponds to the movement of a rod with end loads as a rigid body and has no practical interest. Experiments showed that there is a dynamic instability in the form of parametric resonance of longitudinal oscillations. In this case, besides the longitudinal oscillations further transverse (bending) oscillations appear. It is interesting to determine the conditions for the emergence of parametric resonance of a rod in the process of technological tests. The analytical solution of the problem results in the Mathieu's equation. The results of solving this equation for various combinations of the coefficients of the equation represented as Ince-Strutt diagram. The calculation of the Mathieu's equation of the rod with dimensions  $D \times d \times l = 35 \times 32 \times 1200$  (mm) shows that at operating stress of 10 MPa the rod works in the zone of dynamic instability. This fact is confirmed experimentally. Experiment with the short rod by dimensions  $D \times d \times l = 25 \times 22 \times 600$  (mm) showed that the rod is experiencing longitudinal oscillations without transverse oscillations up to stress 68 MPa. Thus, the short rods have a bigger range of working stresses at the experimental installation. The Mathieu's equation is valid for all rod sizes. The equation allows determining such parameters of the oscillating system, in which the rod would experience only the longitudinal oscillations, which takes place in real conditions.

**For citation:** Atapin V.G. Dynamic instability of the flight control connecting rod in technological tests. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017. no. 3 (76), pp. 35–41. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-35-41. (in Russian).

### References

1. Tumanov A.T. *Metody ispytaniya, kontrolya i issledovaniya mashino-stroitel'nykh materialov*. T. 1 [Methods of testing, control and research of engineering materials. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 320 p.
2. Batuev G.S., Golubkov V.S., Klyuev V.V., Bol'shikh A.S. *Ispytatel'naya tekhnika*. Kn. 2 [Test technique. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 560 p.
3. Samoilovich G.S., ed. *Nerazrushayushchii kontrol' metallov i izdelii* [Non-destructive testing of metals and products]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 456 p.
4. Bolotin V.V. *Dinamicheskaya ustoichivost' uprugikh sistem* [Dynamic stability of elastic systems]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1956. 600 p.
5. Panovko Ya.G. *Osnovy prikladnoi teorii kolebaniy i udara* [Fundamentals of applied theory of oscillations and impact]. Moscow, Librokom Publ., 2010. 274 p. ISBN 978-5-397-01066-5.
6. Birger I.A., Panovko Ya.G., eds. *Prochnost', ustoichivost', kolebaniya*. T. 3 [Strength, stability, oscillations. Vol. 3]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 568 p.

#### \* Corresponding author

Atapin Vladimir G., D.Sc. (Engineering), Professor  
 Novosibirsk State Technical University,  
 20 Prospect K. Marksa,  
 630073, Novosibirsk, Russian Federation  
 Tel.: 8 (383) 346-17-77, e-mail: [atapin.49@mail.ru](mailto:atapin.49@mail.ru)



7. Atapin V.G. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Yurait Publ., 2016. 342 p. ISBN 978-5-534-01762-5.
8. Vol'mir A.S., Grigor'ev A.I., Stankevich A.I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Drofa Publ., 2007. 592 p. ISBN 978-5-358-01283-7.
9. Pol B. van der, Strutt M.J. On the stability of the solutions of Mathieu's equation. *Philosophical Magazine*, 1928, vol. 5, pp. 18–38.
10. Nesterov A.V., Nesterov S.V. Issledovanie reshenii uravneniya Mat'e v pervoi oblasti ustoichivosti pri modelirovani nestatsionarnykh ob'ektov upravleniya [The research of Mathieu equation solution of the first stability region at modeling of non-stationary objects of control]. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie sistem v promyshlennoi i sotsial'noi sferakh – Software of systems in the industrial and social fields*, 2011, no. 1-1, pp. 102–107.
11. Gribkov V.A., Khokhlov A.O. Priem, uproshchayushchii reshenie zadachi ustoichivosti parametricheski stabiliziruemykh staticheski neustoichivykh mayatnikovykh sistem [A method to simplify solution of stability problem for parametrically stabilized statically unstable pendulum systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie – Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2015, no. 11 (668), pp. 29–38. doi: 10.18698/0536-1044-2015-11-29-38.
12. Arkhipova I.M., Luongo A., Seyranian A.P. Vibrational stabilization of the upright statically unstable position of a double pendulum. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, vol. 331, iss. 2, pp. 457–469. doi: 10.1016/j.jsv.2011.09.007.
13. Parovik R.I. Fractal parametric oscillator as a model of a nonlinear oscillation system in natural mediums. *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, 2013, vol. 6, no. 3, pp. 134–138. doi: 10.4236/ijcns.2013.63016.
14. Rand R.H., Sah S.M., Suchrsky M.K. Fractional Mathieu's equation. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, vol. 15, pp. 3254–3262.
15. Parovik R.I. Digrammy Stretta-Ainsa dlya obobshchennogo uravneniya Mat'e [Charts Strutt-Ince for generalized Mathieu equation]. *Vestnik KRAUNTs. Fiziko-matematicheskie nauki – Bulletin KRASEC. Physical & Mathematical Sciences*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 24–30. doi: 10.18454/2079-6641-2012-4-1-24-30.





# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Структурные особенности плазменных покрытий $B_4C-Ni-P$

Елена Корниенко<sup>1, a, \*</sup>, Виктор Кузьмин<sup>2, b</sup>, Василий Ложкин<sup>1, c</sup>, Игорь Гуляев<sup>2, d</sup>,  
 Александр Сивков<sup>3, e</sup>, Александр Ивашутенко<sup>3, f</sup>, Ильяс Рахматуллин<sup>3, g</sup>,  
 Дмитрий Сергачев<sup>2, h</sup>, Виктория Безрукова<sup>1, i</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

<sup>2</sup> Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

<sup>a</sup> <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, [kornienko\\_ee@mail.ru](mailto:kornienko_ee@mail.ru), <sup>b</sup> <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, [vikuzmin57@mail.ru](mailto:vikuzmin57@mail.ru),  
<sup>c</sup> <http://orcid.org/0000-0002-1686-0369>, [lozhkin@corp.nstu.ru](mailto:lozhkin@corp.nstu.ru), <sup>d</sup> <http://orcid.org/0000-0001-5186-6793>, [gulyaev@itam.nsc.ru](mailto:gulyaev@itam.nsc.ru),  
<sup>e</sup> <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>, [SivkovAA@mail.ru](mailto:SivkovAA@mail.ru), <sup>f</sup> <http://orcid.org/0000-0002-6513-5438>, [ivaschutenko@mail.ru](mailto:ivaschutenko@mail.ru),  
<sup>g</sup> <http://orcid.org/0000-0001-5643-2134>, [riam@tpu.ru](mailto:riam@tpu.ru), <sup>h</sup> <http://orcid.org/0000-0003-2469-5946>, [yosergach@gmail.com](mailto:yosergach@gmail.com),  
<sup>i</sup> <http://orcid.org/0000-0002-0329-9920>, [vikabezrukova1995@mail.ru](mailto:vikabezrukova1995@mail.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.71

#### История статьи:

Поступила: 28 июня 2017  
 Рецензирование: 28 июля 2017  
 Принята к печати: 15 августа 2017  
 Доступно онлайн: 15 сентября 2017

#### Ключевые слова:

Плазменное напыление  
 Карбид бора  
 $B_4C-Ni-P$   
 Покрытие

#### Благодарности:

Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

### АННОТАЦИЯ

Рассматривается нанесение покрытия из порошка карбида бора ( $B_4C$ ), плакированного 30 мас. % Ni-P, на трубы из низкоуглеродистой стали при помощи воздушно-плазменного напыления с узлом кольцевого ввода. Структурные исследования покрытий проводили с использованием оптической микроскопии, растровой и просвечивающей электронной микроскопии, а также рентгенофазового анализа. Показано, что материал плазменных покрытий состоит из частиц  $B_4C$  размером до 30 мкм, равномерно распределенных в металлической матрице. Частицы карбида бора окружены областями с округлыми включениями размерами до 500 нм. Металлическая матрица представляет собой бориды никеля ( $Ni_3B$ ,  $NiB$  и  $Ni_3B_4$ ). Кроме того, в материале покрытий были зафиксированы оксиды никеля и бора. Просвечивающей электронной микроскопией было выявлено, что между частицами карбида бора и металлической матрицей формируются тонкие прослойки, имеющие аморфно-кристаллическое строение. Металлическая матрица представляет собой участки, расположенные в объеме покрытий случайным образом, с нанокристаллической структурой и столбчатыми кристаллами.

**Для цитирования:** Структурные особенности плазменных покрытий  $B_4C-Ni-P$  / Е.Е. Корниенко, В.И. Кузьмин, В.С. Ложкин, И.П. Гуляев, А.А. Сивков, А.С. Ивашутенко, И.А. Рахматуллин, Д.В. Сергачев, В.А. Безрукова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 3 (76). – С. 42–50. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-42-50.

## Введение

Известно, что карбид бора ( $B_4C$ ) обладает высокой твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью как при комнатных, так и при

повышенных температурах [1–3]. Кроме того, он характеризуется высокой температурой плавления и низкой плотностью [2]. Это обуславливает применение  $B_4C$  в качестве абразива для шлифования и полирования твердых материалов, сопел пескоструйных аппаратов и распылителей, вставок матриц пресс-форм для прессования порошков абразивных материалов, деталей насосов для перекачки холодных и нагретых растворов

#### \*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

кислот, насадок сопел для распыления химически активных растворов, деталей мешалок и т. д. [3, 4].

Обычно из карбида бора формируют небольшие по толщине покрытия на уже готовых изделиях. В качестве основных методов нанесения покрытий из этого материала можно отметить технологии напыления [3, 5–11]. К сожалению, при нанесении покрытий из  $B_4C$  возникают определенные трудности, что связано со свойствами наносимого материала. Из-за низкой теплопроводности невозможно полностью прогреть частицы порошка, а высокая твердость не позволяет частицам карбида бора пластически деформироваться на подложке или уже затвердевшем материале покрытия.

Решением данной проблемы является добавка связующего: различных металлов или химических соединений, обладающих более высокой пластичностью и теплопроводностью. Стоит отметить, что на сегодняшний день изучены структура и свойства композиционных покрытий, сформированных из смесей порошков  $B_4C+Ni$  [12, 13],  $B_4C+Ti$  [14],  $B_4C+Al-Ti-V$  [10],  $B_4C+Al-Si$  [5],  $B_4C+W$  [14],  $B_4C+Mo$  [15],  $B_4C+TiB_2+TiC$  [16],  $B_4C+Ni+P$  [17], полученных различными методами. Ранее авторами настоящей работы было показано, что эффективным технологическим процессом, позволяющим получать высококачественные покрытия, является воздушно-плазменное напыление с узлом кольцевого ввода порошка [18–20]. Особенности формирования композиционных покрытий  $B_4C-Ni-P$  с использованием этой технологии в литературе не описаны. Таким образом, цель данной работы состоит в изучении структуры покрытий из  $B_4C-Ni-P$ , полученных методом воздушно-плазменного напыления с узлом кольцевого порошка.

### Материалы и методы исследований

Коммерческий порошок карбида бора ( $B_4C$ ), плакированный 30 вес. %  $Ni-P$  (НПО «ТулаЧермет»), использовали в качестве материала для нанесения покрытий. Изображение частиц напыляемого порошка представлено на рис. 1. Видно, что  $Ni-P$ -покрытие равномерно распределено на частицах произвольной формы. Размеры частиц порошка находились в диапазоне 40...100 мкм.

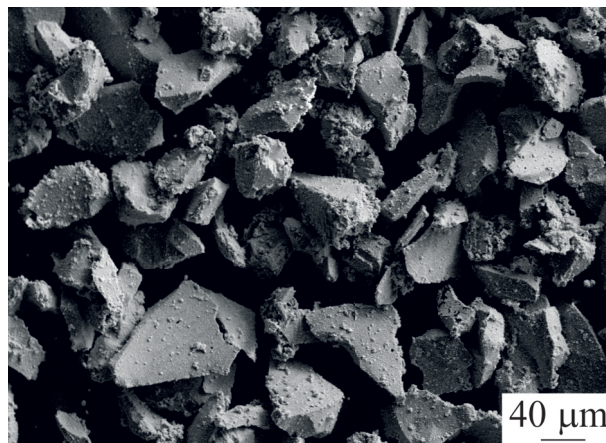


Рис. 1. Внешний вид частиц порошка  $B_4C-Ni-P$

Fig. 1. The particles of  $B_4C-Ni-P$  powder

Напыление покрытий проводили в ИТПМ СО РАН на установке плазменного напыления порошковых материалов «Термоплазма 50-01» с кольцевым вводом порошка. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа использовали воздух, в качестве защитного – смесь воздуха и пропан-бутана. Режимы плазменного напыления: сила тока – 180 А, напряжение – 265 В, дистанция напыления – 170 мм. Порошок напыляли на трубы из низкоуглеродистой стали 20, внутренний диаметр которых был равен 25 мм, толщина стенки 3 мм. Непосредственно перед напылением поверхность труб подвергали пескоструйной обработке.

Структурные исследования выполняли с использованием оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m и растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 50 XVP с микроанализатором EDS X-Act. В качестве объектов выступали образцы, вырезанные из труб в направлении, перпендикулярном покрытию. Микрошлифы подготавливали по стандартной методике: механическое шлифование при помощи абразивных шкурки и полирование с использованием порошка оксида алюминия. Травление поверхности покрытий осуществляли раствором 10 мл  $HCl$ , 0,1 мл  $HNO_3$  и 10 г  $FeCl_3$ . Тонкое строение структуры полученных покрытий исследовали при помощи просвечивающего электронного микроскопа Technai G2 FEI. Образцы для просвечивающей электронной микроскопии готовили следующим образом: из покрытий вырезали заготовки диаметром 3 мм, которые механически утоняли до толщины 90...100 мкм при помощи абразивной бумаги. На механически

утоненных заготовках вышлифовывали сферические лунки с использованием абразивных паст зернистостью от 5 до 1 мкм и суспензии оксида алюминия зернистостью 0,05 мкм. Ионное утонение полученных углублений фольг выполняли на установке Gatan PIPS model 659. Фазовый состав порошка и покрытий был изучен с использованием рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA в  $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Дифрактограммы регистрировали в режиме времени  $t = 3$  с с шагом  $\Delta 2\theta = 0,05^\circ$ . Объемную долю частиц карбида бора в покрытиях оценивали при помощи программного обеспечения Axio Vision Multiphase (Carl Zeiss). Микротвердость структурных составляющих определяли на приборе Wolpert Group 402MVD при нагрузке 50 г.

## Результаты и обсуждение

Фазовый состав частиц исходного порошка и покрытий приведен на рис. 2. Видно, что основными фазами порошкового материала являются карбид бора ( $\text{B}_4\text{C}$ ) и Ni (рис. 2, *a*). Уширение пиков никеля на рентгенограмме порошка свидетельствует об его аморфном состоянии. Кроме того, наблюдаются рефлексы оксида бора ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ). На рентгенограмме покрытий (рис. 2, *б*) присутствуют рефлексы боридов никеля ( $\text{Ni}_3\text{B}$ ,  $\text{NiB}$  и  $\text{Ni}_4\text{B}_3$ ), Ni и карбида бора ( $\text{B}_4\text{C}$ ). Наличие оксидов никеля ( $\text{NiO}$ ) и бора ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) может сви-

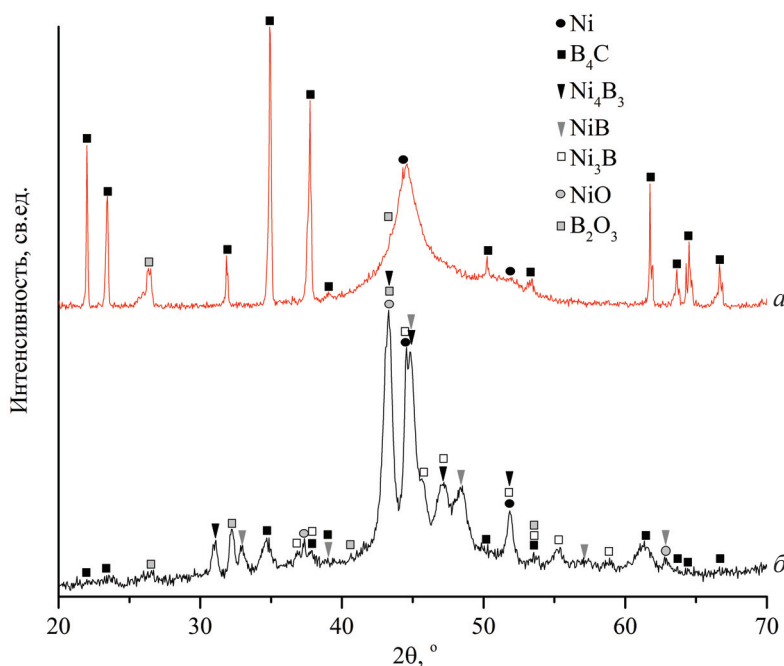


Рис. 2. Рентгенограммы порошка (*a*) и покрытия (*б*)

Fig. 2. XRD patterns of the powder (*a*) and coating (*б*)

детельствовать о недостаточной защите порошка в плазменной струе.

Изображение поперечного сечения покрытий представлено на рис. 3. Видно, что плазменное напыление композиционного порошка  $\text{B}_4\text{C-Ni-P}$  позволяет сформировать плотные покрытия (пористость  $\sim 1\%$ ) толщиной около 1200 мкм. Граница раздела «покрытие–основной металл» выявляется в виде тонкой линии, отслоений не наблюдается (рис. 3, *a*).

Более детальное изображение материала покрытий приведено на рис. 3, *б-г*. Отчетливо видно, что темно-серые включения произвольной формы размерами до 30 мкм (рис. 3, *б*) равномерно распределены в металлической матрице. Согласно данным микрорентгеноспектрального анализа (таблица, участок 1) указанные включения являются нерасплавившимися до конца в плазменной струе частицами  $\text{B}_4\text{C}$ . Объемная доля карбида бора в покрытиях – около 24 %.

Карбид бора разлагается по реакции:  $\text{B}_4\text{C} \rightarrow 4\text{B(тв)} + \text{C(тв)}$ . Высокие скорости перемешивания и охлаждения материала покрытий способствуют неравномерному распределению химических элементов в металлической матрице, о чем свидетельствуют результаты микрорентгеноспектрального анализа (таблица, участки 2–4). Согласно полученным данным в результате взаимодействия Ni и B в материале покрытий формируются бориды никеля с различным химическим составом.

При избытке кислорода карбид бора окисляется по реакции  $\text{B}_4\text{C} + 4\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2(\text{г}) + 2\text{B}_2\text{O}_3(\text{тв})$ . Оксидная пленка  $\text{B}_2\text{O}_3$ , образующаяся на поверхности частиц  $\text{B}_4\text{C}$ , остается в покрытии вместе с карбидным ядром. В свою очередь, никель окисляется по реакции  $2\text{Ni} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NiO(тв)}$ . Образовавшиеся оксиды остаются в металлической матрице покрытий (отмечены стрелками на рис. 3, *г*).

В результате травления поверхности покрытий было выявлено, что рядом с частицами  $\text{B}_4\text{C}$  располагаются области с округлыми включениями размерами менее 500 нм (рис. 3, *в, г*, область 5), химический состав которых указан в таблице (участок 5). Повышенное содержание Ni, P и B в этих



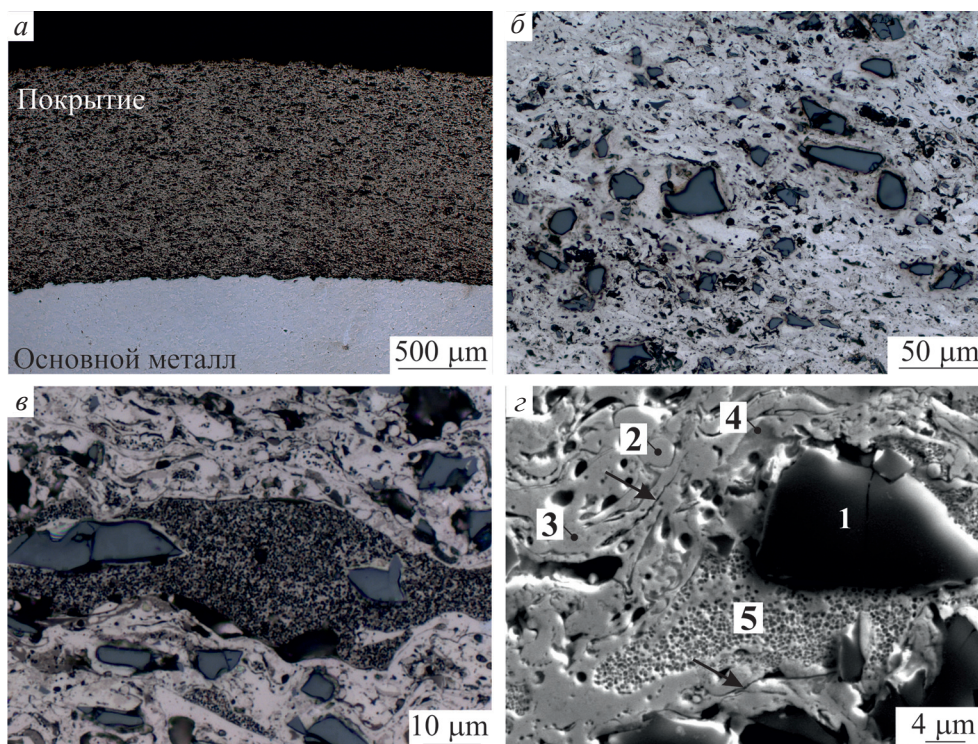


Рис. 3. Общий вид композиции «основной металл-покрытие» (а); структура материала покрытия до травления (б); структура материала покрытия после травления (в, з); а-в – оптическая микроскопия; з – растровая электронная микроскопия в обратно-отраженных электронах:

1 – частица  $B_4C$ ; 2–4 – бориды никеля; 5 – эвтектические области. Стрелками отмечены оксиды никеля

Fig. 3. The image of «base metal-coating» compounds (a); the material structure of the coating before etching (б); the material structure of the coating after etching (в, з); а-в – optical microscopy; з – scanning electron microscopy in the regime of reflected electrons:

1 –  $B_4C$  particle; 2–4 – nickel borides; 5 – eutectic areas. The arrows show the nickel oxides

#### Данные микрорентгеноспектрального анализа различных участков покрытия

##### The data of micro-X-ray spectral analysis of various areas of coating

Номер 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

областях свидетельствует о том, что основные реакции происходят с участием этих элементов.

Полученные данные подтверждаются дюрометрическими исследованиями. В результате локальных измерений микротвердости было установлено, что микротвердость частиц карбида бора находится в пределах 30...40 ГПа, металли-

ческой матрицы – 4,0...5,5 ГПа, эвтектических участков – 2 ГПа.

Как было показано выше, высокие скорости охлаждения материала покрытий приводят к формированию структуры, идентификация которой методами оптической микроскопии является достаточно затруднительной. Тонкое стро-

ение покрытий  $B_4C-Ni-P$  изучали при помощи просвечивающей электронной микроскопии. На рис. 4 представлено изображение различных участков плазменных покрытий. В результате анализа полученных изображений было выявлено, что керамические частицы  $B_4C$  окружены тонкими прослойками шириной до 1 мкм (рис. 4, а). Присутствие этих прослоек свидетельствует о надежном сцеплении частиц карбида бора с металлической матрицей. Более детальный анализ позволил выявить, что характерной особенностью материала прослоек является наличие округлых участков с кристаллической структурой размерами менее 10 нм, расположенных в аморфной матрице (рис. 4, б).

Анализ электронограммы, полученной при исследовании материала прослойки, подтверждает наличие аморфно-кристаллической структуры: хорошо видно широкое диффузное кольцо, а также точечные рефлексы от кристаллических фаз.

Участки, скорость охлаждения которых была ниже, характеризуются нанокристаллической структурой, что подтверждается соответствующей электронограммой (рис. 4, в). Видно, что размеры зерен составляют менее 20 нм. Различный контраст между зернами указывает на то, что они имеют разные кристаллографические ориентации. На рис. 4, г приведено изображение структуры, сформированной в условиях одновременного воздействия высоких степеней пере-

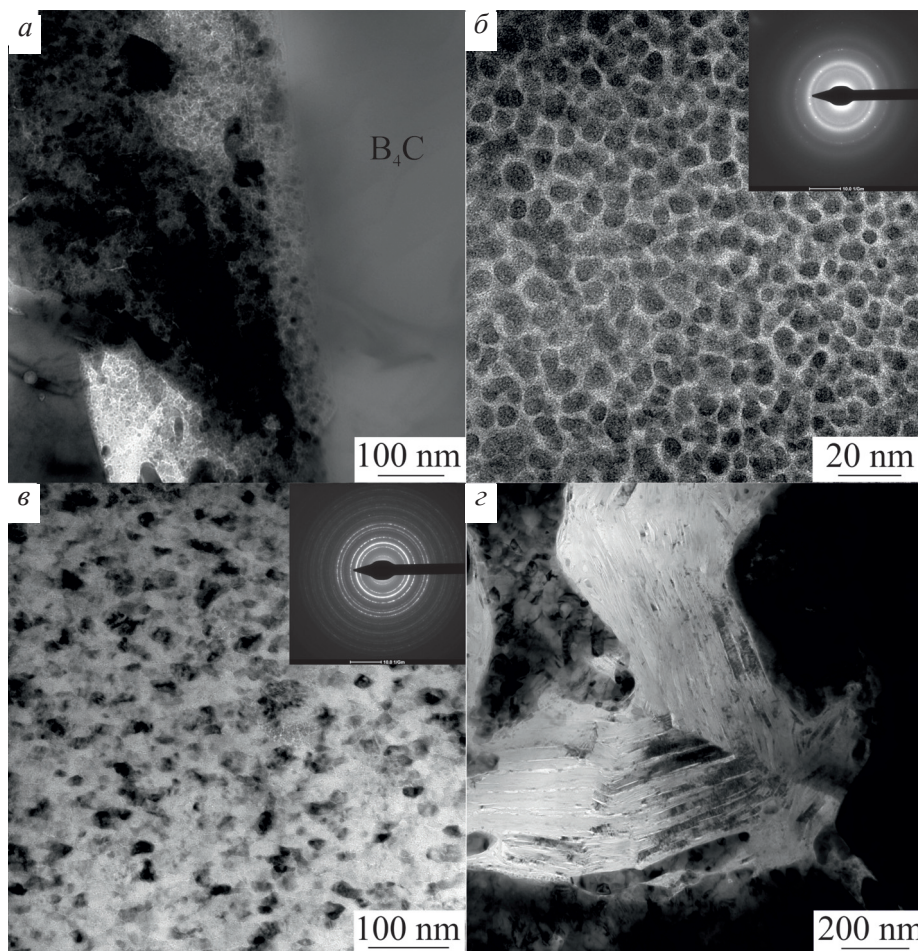


Рис. 4. Особенности тонкой структуры плазменных покрытий  $B_4C-Ni-P$ : а – частица  $B_4C$  и прослойка; б – светлопольное изображение и дифракционная картина материала прослойки; в – светлопольное изображение и дифракционная картина наноструктурированного участка металлической матрицы; г – светлопольное изображение столбчатой структуры

Fig. 4. The feature of fine structure of  $B_4C-Ni-P$  plasma coatings: а –  $B_4C$  particle and interlayer; б – bright field image and electron diffraction of interlayer; в – bright field image and electron diffraction of metal matrix; г – bright field image of columnar structure



охлаждения и пластической деформации. Видны пакеты столбчатых кристаллов шириной от 20 нм, которые растут от границ зерен. В свою очередь, каждый столбчатый кристалл состоит из более мелких выделений. Анализ строения металлической матрицы позволил выявить, что участки с нанокристаллической структурой и столбчатыми кристаллами располагаются в объеме покрытий случайным образом.

### Выводы

1. Оптической микроскопией показано, что при помощи плазменного напыления удается сформировать качественные композиционные покрытия, характеризующиеся высокой плотностью.

2. Методами оптической и растровой электронной микроскопии, а также рентгенофазового анализа выявлено, что материал плазменных покрытий состоит из частиц  $B_4C$  размерами до 30 мкм, равномерно распределенных в металлической матрице, представляющей собой бориды никеля ( $Ni_3B$ ,  $NiB$  и  $Ni_3B_4$ ). Частицы карбида бора окружены областями с округлыми включениями. Данные области характеризуются повышенным содержанием никеля, фосфора и бора. В покрытии также присутствуют оксиды бора и никеля.

3. В результате локальных измерений микротвердости было установлено, что микротвердость частиц карбида бора находится в пределах 30...40 ГПа, металлической матрицы – 4,0...5,5 ГПа, областей с округлыми включениями – 2 ГПа.

4. Методом просвечивающей электронной микроскопии выявлено, что в процессе плазменного напыления между частицами карбида бора и металлической матрицей формируются тонкие прослойки, имеющие аморфно-кристаллическое строение, ширина которых не превышает 1 мкм. Металлическая матрица представляет собой участки с нанокристаллической структурой и столбчатыми кристаллами.

### Список литературы

1. Бор в ядерной технике / В.Д. Рисованный, А.В. Захаров, Е.П. Клочков, Т.М. Гусева. – Димитровград: ГНЦ НИИАР, 2011. – 668 с. – ISBN 5-9483-016-7.

2. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений / под ред. Т.Я. Косолаповой. – М.: Металлургия, 1986. – 928 с.

3. Fabrication and tribological evaluation of vacuum plasma-sprayed  $B_4C$  / H. Zhu, Y. Niu, C. Lin, L. Huang, H. Ji, X. Zheng // *Coating Journal of Thermal Spray Technology*. – 2012. – Vol. 21, iss. 6. – P. 1216–1223. – doi: 10.1007/s11666-012-9815-5.

4. Wear of boron carbide ceramics by abrasive waterjets / K.A. Schwetz, L.S. Sigl, J. Greim, H. Knoch // *Wear*. – 1995. – Vol. 181–183. – P. 148–155. – doi: 10.1016/j.wear.2005.01.020.

5. Al-Si/ $B_4C$  composite coatings on Al-Si substrate by plasma spray technique / O. Sarikaya, S. Anik, S. Aslanlar, S.C. Okumus, E. Celik // *Materials and Design*. – 2007. – Vol. 28, iss. 9. – P. 2443–2449. – doi: 10.1016/j.matdes.2006.09.007.

6.  $B_4C/Ni$  Composite coatings prepared by cold spray of blended or CVD-coated powders / C. Feng, V. Guipont, M. Jeandin, O. Amsellem, F. Pauchet, R. Saenger, S. Bucher, C. Iacob // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2012. – Vol. 21, iss. 3–4. – P. 561–570. – doi: 10.1007/s11666-012-9774-x.

7. Effects of boron carbide content on the microstructure and properties of atmospheric plasma-sprayed  $NiCoCrAlY/Al_2O_3-B_4C$  composite coatings / Y. Cao, C. Huang, W. Liu, W. Zhang, L. Du // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2014. – Vol. 23, iss. 4. – P. 716–724. – doi: 10.1007/s11666-014-0061-x.

8. Zeng Y., Lee S.W., Ding C. Study on plasma sprayed boron carbide coating // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2002. – Vol. 11, iss. 1. – P. 129–133. – doi: 10.1361/105996302770349069.

9. Zeng Y., Feng J., Ding C. Microstructure and properties of plasma spraying boron carbide coating // *Journal of Materials Science and Technology*. – 2000. – Vol. 16, iss. 1. – P. 63–66.

10. Moradi M., Moazeni M., Salimijazi H.R. Microstructural characterization and failure mechanism of vacuum plasma sprayed  $Ti-6Al-4V/B_4C$  composite // *Vacuum*. – 2014. – Vol. 107. – P. 34–40. – doi: 10.1016/j.vacuum.2014.03.028.

11. Microstructure of vacuum plasma-sprayed boron carbide / H.R. Salimijazi, T.W. Coyle, J. Mostaghimi, L. Leblanc // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2005. – Vol. 14, iss. 3. – P. 362–368. – doi: 10.1361/105996305X59431.

12. Microstructures and tribological properties of vacuum plasma sprayed  $B_4C-Ni$  composite coatings / H. Zhu, Y. Niu, C. Lin, L. Huang, H. Ji, X. Zheng // *Ceramics International*. – 2013. – Vol. 39, iss. 1. – P. 101–110. – doi: 10.1016/j.ceramint.2012.05.101.

13. Preparation and oxidation behavior of  $B_4C-Ni$  and  $B_4C-TiB_2-TiC-Ni$  composite coatings produced by



an HVOF process / M. Rafiei, M. Salehi, M. Shamanian, A. Motallebzadeh // *Ceramics International*. – 2014. – Vol. 40, iss. 8, pt. B. – P. 13599–13609. – doi: 10.1016/j.ceramint.2014.05.081.

14. Comparison of the coatings deposited using Ti and B<sub>4</sub>C powder by reactive plasma spraying in air and low pressure / Z. Mao, J. Ma, J. Wang, B. Sun // *Journal of Materials Science*. – 2009. – Vol. 44, iss. 12. – P. 3265–3272. – doi: 10.1007/s10853-009-3438-3.

15. Lin C., Kong M., Zhu H. Tribological behavior of vacuum plasma sprayed B<sub>4</sub>C-Mo composite coating // *Journal of Inorganic Materials*. – 2016. – Vol. 31, iss. 1. – P. 100–106. – doi: 10.15541/jim20150384.

16. Rafiei M., Salehi M., Shamanian M. Formation mechanism of B<sub>4</sub>C-TiB<sub>2</sub>-TiC ceramic composite produced by mechanical alloying of Ti-B<sub>4</sub>C powders // *Advanced Powder Technology*. – 2014. – Vol. 25, iss. 6. – P. 1754–1760. – doi: 10.1016/j.appt.2014.07.003.

17. Ebrahimian-Hoaaeinabadi M., Azari-Dorcheh K., Moomir-Vagheft S.M. Wear behavior of electroless Ni-P-B<sub>4</sub>C composite coatings // *Wear*. –

2006. – Vol. 260, iss. 1–2. – P. 123–127. – doi: 10.1016/j.wear.2005.01.020.

18. Влияние температуры оплавления на структуру и свойства самофлюсующихся покрытий на основе никеля / Е.Е. Корниенко, А.А. Никулина, А.Г. Баннов, В.И. Кузьмин, М. Мильдебрах, В.А. Безрукова, А.А. Жойдик // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2016. – № 4 (73). – С. 52–62. – doi: 10.17212/1994-6309-2016-4-52-62.

19. Структура и свойства материалов из алюминидов никеля, полученных с использованием различных технологий / Е.Е. Корниенко, Л.И. Шевцова, Н.С. Белоусова, А.А. Никулина, А.И. Смирнов, В.И. Кузьмин, О.А. Рубцова // *Перспективные материалы*. – 2017. – № 3. – С. 49–58.

20. Effect of plasma spraying regimes on structure and properties of Ni<sub>3</sub>Al coatings / E.E. Kornienko, D.O. Mul', O.A. Rubtsova, S.P. Vaschenko, V.I. Kuzmin, I.P. Gulyaev, D.V. Sergachev // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2016. – Vol. 23, iss. 6. – P. 919–927. – doi: 10.1134/S0869864316060147.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2017 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](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Structure Features of B<sub>4</sub>C-Ni-P Plasma Coatings

Elena Kornienko<sup>1, a, \*</sup>, Viktor Kuz'min<sup>2, b</sup>, Vasiliy Lozhkin<sup>1, c</sup>, Igor Gulyaev<sup>2, d</sup>,  
 Alexander Sivkov<sup>3, e</sup>, Alexander Ivashutenko<sup>3, f</sup>, Ilyas Rahmatullin<sup>3, g</sup>,  
 Dmitrii Sergachev<sup>2, h</sup>, Viktoriya Bezrukova<sup>1, i</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

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

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>a</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>,  [kornienko\\_ee@mail.ru](mailto:kornienko_ee@mail.ru), <sup>b</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>,  [vikuzmin57@mail.ru](mailto:vikuzmin57@mail.ru),  
<sup>c</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-1686-0369>,  [lozhkin@corp.nstu.ru](mailto:lozhkin@corp.nstu.ru), <sup>d</sup>  <http://orcid.org/0000-0001-5186-6793>,  [gulyaev@itam.nsc.ru](mailto:gulyaev@itam.nsc.ru),  
<sup>e</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>,  [SivkovAA@mail.ru](mailto:SivkovAA@mail.ru), <sup>f</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-6513-5438>,  [ivaschutenko@mail.ru](mailto:ivaschutenko@mail.ru),  
<sup>g</sup>  <http://orcid.org/0000-0001-5643-2134>,  [riam@tpu.ru](mailto:riam@tpu.ru), <sup>h</sup>  <http://orcid.org/0000-0003-2469-5946>,  [yosergach@gmail.com](mailto:yosergach@gmail.com),  
<sup>i</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-0329-9920>,  [vikabezrukova1995@mail.ru](mailto:vikabezrukova1995@mail.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 28 June 2017

Revised: 28 July 2017

Accepted: 15 August 2017

Available online: 15 September 2017

#### Keywords:

Plasma spraying

Boron carbide

B<sub>4</sub>C-Ni-P

Coating

#### Acknowledgements:

The research is carried out at Tomsk Polytechnic University within the framework of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program grant.

### ABSTRACT

**Purpose:** This paper considers the structural features of B<sub>4</sub>C-Ni-P coatings obtained by air-plasma spraying with the unit for annular injection of powder. **Materials and methods:** (B<sub>4</sub>C) boron carbide powder clad with 30 wt. % Ni-P is used. The powder is deposited on pipes of low-carbon steel (0.2 % C) by air-plasma spraying with the unit for annular injection of powder. The structure and phase composition of coatings are studied by optical microscopy, scanning electron microscopy with the microanalyser EDS, transmission electron microscopy and X-ray diffractometry. The microhardness measurements results are also presented. **Results and discussion:** The high-quality composite coatings with low porosity can be formed using plasma spraying. The combination of the optical and scanning electron microscopy as well as X-ray diffractometry revealed the composition of the plasma coatings. It consists of B<sub>4</sub>C particles up to 30 μm sizes that are equally spaced in a metal matrix. The metal matrix consists of nickel borides (Ni<sub>3</sub>B, NiB and Ni<sub>3</sub>B<sub>4</sub>). Areas with roundish inclusions about 500 nm diameter are surrounded by boron carbide particles. These areas are characterized by a higher content of nickel, phosphorus and boron. B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> boron oxide and NiO nickel oxide are also presented in the coating. The microhardness local measurements demonstrated that the microhardness of boron carbide particles is 3000...4000 HV, the metal matrix is 400...550 HV and the areas with roundish inclusions is 200 HV. According to the transmission electron microscopy data thin interlayers with an amorphous-crystalline structure up to 1 μm width are formed between the boron carbide particles and the metal matrix. The metal matrix constitutes areas with a nanocrystalline structure and columnar crystals that located in the coatings volume at random.

**For citation:** Kornienko E.E., Kuz'min V.I., Lozhkin V.S., Gulyaev I.P., Sivkov A.A., Ivashutenko A.S., Rahmatullin I.A., D.V. Sergachev, Bezrukova V.A. Structure features of B<sub>4</sub>C-Ni-P plasma coatings. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017. no. 3 (76), pp. 42–50. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-42-50. (in Russian).

### References

1. Risovannyi V.D., Zakharov A.V., Klochkov E.P., Guseva T.M. *Bor v yadernoi tekhnike* [Boron in nuclear engineering]. Dimitrograd, GNTs NIIAR Publ., 2011. 668 p. ISBN 5-9483-016-7.
2. Alekseev A.G., Bovkun G.A., Bolgar A.S., Borisova A.L., Brakhnova I.T., Vinitskii I.M., Gordienko S.P., Goryachev Yu.M., Dvorina L.A., Drozdova S.V., Koval'chenko M.S., Kosolapova T.Ya., Kulik O.P., Obolonchik V.A., Paderno Yu.B., Panasyuk A.D., Popova O.I., Rud' B.M., Serebryakova T.I., Timofeeva I.I., Fomenko V.S. *Svoistva*,

#### \* Corresponding author

Kornienko Elena E., Ph.D. (Engineering), Associate Professor  
 Novosibirsk State Technical University,  
 20 Prospect K. Marksa, 630073, Novosibirsk, Russian Federation  
 Tel.: 8 (383) 346-11-71, e-mail: [kornienko\\_ee@mail.ru](mailto:kornienko_ee@mail.ru)

*poluchenie i primenenie tugoplavkikh soedinenii* [Properties, production and using of refractory compounds]. Ed. by T.Ya. Kosolapova. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 928 p.

3. Zhu H., Niu Y., Lin C., Huang L., Ji H., Zheng X. Fabrication and tribological evaluation of vacuum plasma-sprayed B<sub>4</sub>C. *Coating Journal of Thermal Spray Technology*, 2012, vol. 21, iss. 6, pp. 1216–1223. doi: 10.1007/s11666-012-9815-5.

4. Schwetz K.A., Sigl L.S., Greim J., Knoch H. Wear of boron carbide ceramics by abrasive waterjets. *Wear*, 1995, vol. 181–183, pp. 148–155. doi: 10.1016/j.wear.2005.01.020.

5. Sarikaya O., Anik S., Aslanlar S., Okumus S.C., Celik E. Al-Si/B<sub>4</sub>C composite coatings on Al-Si substrate by plasma spray technique. *Materials and Design*, 2007, vol. 28, iss. 9, pp. 2443–2449. doi: 10.1016/j.matdes.2006.09.007.

6. Feng C., Guipont V., Jeandin M., Amsellem O., Pauchet F., Saenger R., Bucher S., Iacob C. B<sub>4</sub>C/Ni Composite coatings prepared by cold spray of blended or CVD-coated powders. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012, vol. 21, iss. 3–4, pp. 561–570. doi: 10.1007/s11666-012-9774-x.

7. Cao Y., Huang C., Liu W., Zhang W., Du L. Effects of boron carbide content on the microstructure and properties of atmospheric plasma-sprayed NiCoCrAlY/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>4</sub>C composite coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, vol. 23, iss. 4, pp. 716–724. doi: 10.1007/s11666-014-0061-x.

8. Zeng Y., Lee S.W., Ding C. Study on plasma sprayed boron carbide coating. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2002, vol. 11, iss. 1, pp. 129–133. doi: 10.1361/105996302770349069.

9. Zeng Y., Feng J., Ding C. Microstructure and properties of plasma spraying boron carbide coating. *Journal of Materials Science and Technology*, 2000, vol. 16, iss. 1, pp. 63–66.

10. Moradi M., Moazeni M., Salimijazi H.R. Microstructural characterization and failure mechanism of vacuum plasma sprayed Ti-6Al-4V/B<sub>4</sub>C composite. *Vacuum*, 2014, vol. 107, pp. 34–40. doi: 10.1016/j.vacuum.2014.03.028.

11. Salimijazi H.R., Coyle T.W., Mostaghimi J., Leblanc L. Microstructure of vacuum plasma-sprayed boron carbide. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2005, vol. 14, iss. 3, pp. 362–368. doi: 10.1361/105996305X59431.

12. Zhu H., Niu Y., Lin C., Huang L., Ji H., Zheng X. Microstructures and tribological properties of vacuum plasma sprayed B<sub>4</sub>C-Ni composite coatings. *Ceramics International*, 2013, vol. 39, iss. 1, pp. 101–110. doi: 10.1016/j.ceramint.2012.05.101.

13. Rafiei M., Salehi M., Shamanian M., Motallebzadeh A. Preparation and oxidation behavior of B<sub>4</sub>C-Ni and B<sub>4</sub>C-TiB<sub>2</sub>-TiC-Ni composite coatings produced by an HVOF process. *Ceramics International*, 2014, vol. 40, iss. 8, pt. B, pp. 13599–13609. doi: 10.1016/j.ceramint.2014.05.081.

14. Mao Z., Ma J., Wang J., Sun B. Comparison of the coatings deposited using Ti and B<sub>4</sub>C powder by reactive plasma spraying in air and low pressure. *Journal of Materials Science*, 2009, vol. 44, iss. 12, pp. 3265–3272. doi: 10.1007/s10853-009-3438-3.

15. Lin C., Kong M., Zhu H. Tribological behavior of vacuum plasma sprayed B<sub>4</sub>C-Mo composite coating. *Journal of Inorganic Materials*, 2016, vol. 31, iss. 1, pp. 100–106. doi: 10.15541/jim20150384.

16. Rafiei M., Salehi M., Shamanian M. Formation mechanism of B<sub>4</sub>C-TiB<sub>2</sub>-TiC ceramic composite produced by mechanical alloying of Ti-B<sub>4</sub>C powders. *Advanced Powder Technology*, 2014, vol. 25, iss. 6, pp. 1754–1760. doi: 10.1016/j.appt.2014.07.003.

17. Ebrahimian-Hoaeinabadi M., Azari-Dorcheh K., Moomir-Vaghefi S.M. Wear behavior of electroless Ni-P-B<sub>4</sub>C composite coatings. *Wear*, 2006, vol. 260, iss. 1–2, pp. 123–127. doi: 10.1016/j.wear.2005.01.020.

18. Kornienko E.E., Nikulina A.A., Bannov A.G., Kuz'min V.I., Mildebrath M., Bezrukova V.A., Zhoidik A.A. Vliyaniye temperatury oplavleniya na strukturu i svoistva samoflyusuyushchikhsya pokrytii na osnove nikelya [The influence of flowing temperature on the structure and properties of the self-fluxing coatings]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2016, no. 4 (73), pp. 52–62. doi: 10.17212/1994-6309-2016-4-52-62.

19. Kornienko E., Shevtsova L., Belousova N., Nikulina A., Smirnov A., Kuz'min V., Rubtsova O. Struktura i svoistva materialov iz alyuminidov nikelya, poluchennykh s ispol'zovaniem razlichnykh tekhnologii [Structure and properties of the nickel aluminide materials obtained using different technologies]. *Perspektivnye materialy = Journal of Advanced Materials*, 2017, no. 3, pp. 49–58.

20. Kornienko E.E., Mul' D.O., Rubtsova O.A., Vaschenko S.P., Kuzmin V.I., Gulyaev I.P., Sergachev D.V. Effect of plasma spraying regimes on structure and properties of Ni<sub>3</sub>Al coatings. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2016, vol. 23, iss. 6, pp. 919–927. doi: 10.1134/S0869864316060147.

## Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

© 2017 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](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)





### Модифицирование сплава марки АК12 частицами ультрадисперсного порошка вольфрама

Никита Мартюшев<sup>1, a, \*</sup>, Анна Зыкова<sup>1, b</sup>, Василий Башев<sup>1, c</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

<sup>a</sup>  <http://orcid.org/0000-0003-0620-9561>,  [martjushev@tpu.ru](mailto:martjushev@tpu.ru), <sup>b</sup>  <http://orcid.org/0000-0001-8779-3784>,  [zykovaap@mail.ru](mailto:zykovaap@mail.ru),

<sup>c</sup>  <http://orcid.org/0000-0003-0605-9110>,  [bashevassilly@gmail.com](mailto:bashevassilly@gmail.com)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 67.02

#### История статьи:

Поступила: 28 июня 2017  
 Рецензирование: 28 июля 2017  
 Принята к печати: 15 августа 2017  
 Доступно онлайн: 15 сентября 2017

#### Ключевые слова:

Силумин  
 АК12  
 Модифицирование  
 Ультрадисперсный порошок  
 Вольфрам

#### Благодарности:

Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

#### АННОТАЦИЯ

Широко распространенным методом, оказывающим влияние на равномерное формирование микроструктуры и повышение прочностных свойств Al-Si сплавов, является модифицирование ультра- и нанодисперсными частицами различного химического состава. Несмотря на значительные успехи в исследованиях влияния различных модифицирующих составов на структуру и механические свойства литых силуминов, в литературе отсутствуют данные о влиянии нанодисперсного порошка W на формирование структурно-фазового состояния и механические свойства сплава АК12. В работе исследовано влияние нанопорошка W в количестве 0,1 масс.% на структурно-фазовое состояние и механические свойства сплава АК12 при разной выдержке модифицированного расплава. Выплавку металла осуществляли в муфельной печи. Модифицирование расплава ультрадисперсным порошком производили перед разливкой. Перед введением в расплав было проведено исследование химического, фазового и гранулометрического состава используемого порошка. Для полученных образцов проводили металлографические исследования и определяли химический состав, также определялась ударная вязкость. Результаты проведенных экспериментов показали, что часть порошка не усваивается расплавом и выпадает на стенки и дно тигля. Количество порошка, не усвоенного расплавом, зависит от времени выдержки. Усвоившийся порошок значительно влияет на структуру отливки, значительно измельчаются пластины кремния, уменьшаются размеры осей первого порядка и расстояния между осями второго порядка для кристаллов матрицы отливок. Такие изменения в структуре в значительной мере сказываются на свойствах. Модифицирование сплава АК12 порошком вольфрама с выдержкой расплава в печи в течение 10 мин дает увеличение ударной вязкости на ~15 %. По результатам экспериментов установлено, что добавка 0,1 масс.% W в расплав и выдержка его в нагретом состоянии перед разливкой является оптимальным режимом. Такой режим приводит к равномерному распределению эвтектики ( $\alpha$ -Al + Si), уменьшению пластин эвтектического кремния в 1,5 раза, изменению формы грубых пластин на тонкую волокнистую форму и увеличению механических свойств на 15–20 %.

**Для цитирования:** Мартюшев Н.В., Зыкова А.П., Башев В.С. Модифицирование сплава марки АК12 частицами ультрадисперсного порошка вольфрама // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 3 (76). – С. 51–58. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-51-58.

### Введение

В настоящее время силумины являются одним из самых распространенных сплавов цветных металлов. Силумины широко используются

в авиации, судостроении, автомобилестроении, а также для бытовых нужд. Их широкое применение обусловлено высокой жидкотекучестью, низкой склонностью к образованию усадки при литье, возможностью пайки и сварки, низкой стоимостью. Хорошими литейными свойствами из-за малой усадки и высокой жидкотекучести обладают эвтектические и заэвтектические силумины. Эвтектические силумины содержат

#### \*Адрес для переписки

Мартюшев Никита Владимирович, к.т.н., доцент  
 Томский политехнический университет  
 пр. Ленина, 30, 634050, г. Томск, Россия  
 Тел.: +7 (3822) 60-62-85, e-mail: [martjushev@tpu.ru](mailto:martjushev@tpu.ru)

около 12 % кремния и при комнатной температуры состоят из эвтектики – смеси твердого раствора алюминия с содержанием Si до 1,65 % и кристаллов чистого кремния. Такой фазовый состав эвтектических силуминов в твердом состоянии обуславливает их невысокие механические свойства. Невысокие механические свойства эвтектических силуминов ограничивают сферу применения этого материала. Повысить механические характеристики силуминов можно за счет [1–4]:

1) изменения морфологии и уменьшения размеров кристаллов первичного и эвтектического кремния;

2) измельчения структурных компонентов сплава, включая нерастворимые в матрице интерметаллиды, преимущественно на основе железа;

3) подавления дендритной кристаллизации путем диспергирования и превращения дендритов твердого раствора в равноосные кристаллы;

4) модифицирования добавками различных ультрадисперсных порошков [4–10].

Одним из эффективных путей реализации данных механизмов является увеличение числа зародышей в процессе кристаллизации путем модифицирования силуминов. Распространенным методом, оказывающим влияние на равномерное формирование микроstructures и повышение прочностных свойств Al-Si сплавов, является модифицирование ультра- и нанодисперсными частицами различного химического состава. Основными используемыми наноразмерными модификаторами для силуминов являются порошки оксидов и карбидов металлов. Они обладают высокой температурой плавления

и высокой инертностью, что позволяет им не растворяться в расплаве и служить центрами кристаллизации. Подобным образом действуют и частицы тугоплавких металлов (W, Ti, Mo и др.). При введении частиц порошка в расплав необходимо для достижения эффекта модифицирования обеспечить их смачиваемость.

Действие частиц химических соединений отличается от действия чистых металлов. Металлы порошков (Ti, Mo, Cr, Sb etc.) хорошо взаимодействуют с расплавом силумина [5–9].

Согласно диаграмме состояния Al-W растворимость W в твердом растворе  $\alpha$ -Al составляет 0,16...0,20 масс. % [10]. Поэтому введенные в расплав частицы нанодисперсного порошка W в количестве до 0,5 масс. % будут полностью растворяться в твердом растворе  $\alpha$ -Al. В процессе формирования структуры силуминов тугоплавкие частицы вольфрама, являющиеся дополнительными центрами кристаллизации, будут влиять на измельчение структурных составляющих отливок [11–15].

Настоящая работа направлена на исследование влияния времени выдержки расплава силумина с модифицирующим нанопорошком вольфрама на микроstructure и свойства эвтектического силумина марки АК12(Al-12%Si).

### Методика экспериментального исследования

В качестве материала исследования был выбран силумин марки АК12. Для плавки в качестве шихты использовали чушковый силумин с металлургического завода с химическим составом по ГОСТ 1583-93 (табл. 1).

Таблица 1  
Table 1

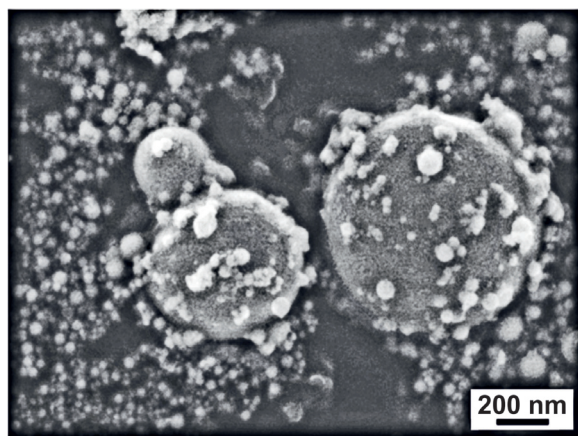
Химический состав сплава марки АК 12 (масс. %)   
 Chemical composition of Al-12%Si alloy (mass. %)

Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Mg	Ca	Pb	Ni
11,2	0,44	0,29	0,28	0,08	0,04	0,05	0,04	0,01	0,03

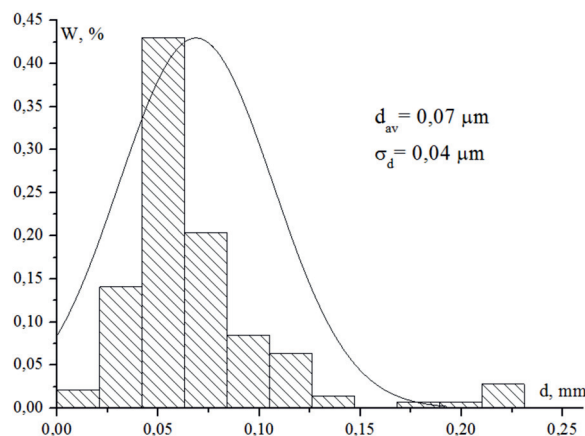
Для его модифицирования применялся порошок вольфрама, полученный электровзрывным способом со средним размером частиц 240...380 нм и площадью удельной поверхности 1,7...2,4 м<sup>2</sup>/г. Средний размер частиц W составляет  $d_{av} = 1,32$  мкм. На поверхности частиц W присут-

ствуют наночастицы, средний размер которых составляет  $d_{av} = 0,07$  мкм (рис. 1).

Плавка силуминов осуществлялась в муфельной печи. Для форсирования плавки сначала нагревалась печь до 800 °С, затем в печь помещался стальной тигель с порцией шихты. Масса



а



б

Рис. 1. Наночастицы на поверхности частиц W (а) и гистограмма распределения наночастиц по размерам (б)

Fig. 1. Nanoparticles on the surface of tungsten particles (а) and the histogram of size distribution of nanoparticles (б)

одной плавки составляла 500 г. Масса загружаемого металла и масса порошков для модифицирования измерялась с помощью аналитических весов Shinko HJR-620CE с точностью до 0,01 г. После плавления силумина тигель извлекался из печи, производилась очистка зеркала расплава от окисной пленки и затем вводился модификатор. Количество вводимого модификатора составляло 0,1 масс. %. После введения модификатора расплав выдерживался в печи при температуре 800 °С в течение 10, 60, 120 мин. Разливка производилась со скоростью 0,06...0,09 л/с. Для каждого времени выдержки проводилось по три плавки для накопления статистики.

Гранулометрический анализ нанодисперсных порошков W проводили методом лазерной дифракции (анализатор частиц SALD-7101). Химический и фазовый состав нанопорошка вольфрама исследовали методами оптико-эмиссионной спектроскопии (PMI-MASTER Sort) и рентгенофазового анализа (XRD-7000S). Химический анализ силуминов определялся по среднему значению пяти измерений. Перед измерением поверхность образцов фрезеровалась на глубину 5 мм. Погрешность измерения прибора составляла 0,01 %.

Для металлографического анализа структуры применяли оптические микроскопы МИМ-8М, ZEISS AXIO Observer.A1m со встроенной фотокамерой и ZEISS Axiovert 40 MAT. Измерение расстояния параметров микроструктуры осуществлялось с помощью программы анализа структур фирмы Carl ZEISS.

Для проведения испытаний применялся маятниковый копер марки 2130KM-0,3 с максимальным запасом энергии маятника 300 Дж. Объектами исследований служили стандартные образцы Шарпи размерами 55×10×10 без надреза (ГОСТ 9454–78). Количество образцов составляло 4...6 для каждой серии испытаний.

## Результаты и обсуждение

Результаты проведенного эксперимента показали, что после проведения плавки и выдержки расплава с порошком в течение 10 мин в печи при 800 °С на стенках тигля после заливки расплава остается 25...30 % порошка. Увеличение времени выдержки тигля с нанопорошком, введенным в расплав в печи до 60 мин, приводит к тому, что количество порошка, остающегося в тигле после разливки, сокращается до 10...15 %. При увеличении времени выдержки до 120 мин на стенках тигля порошка не остается.

Исследования показали, что по составу порошок, оставшийся на стенках тигля после плавки, отличается от исходного. По данным XRD, исходный порошок вольфрама содержит металлический вольфрам (85 % по объему) и оксид вольфрама W<sub>3</sub>O (15 % по объему) (рис. 2, а). По данным XRD, порошок, оставшийся в тигле после плавки, состоит из остатков металлического W и его оксидов различной модификации (WO<sub>3</sub>, W<sub>3</sub>O) (рис. 2, б). После плавки объемная доля металлического W составляет 72 % по объему, W<sub>3</sub>O – 8 % по объему и WO<sub>3</sub> – 20 % по объему.



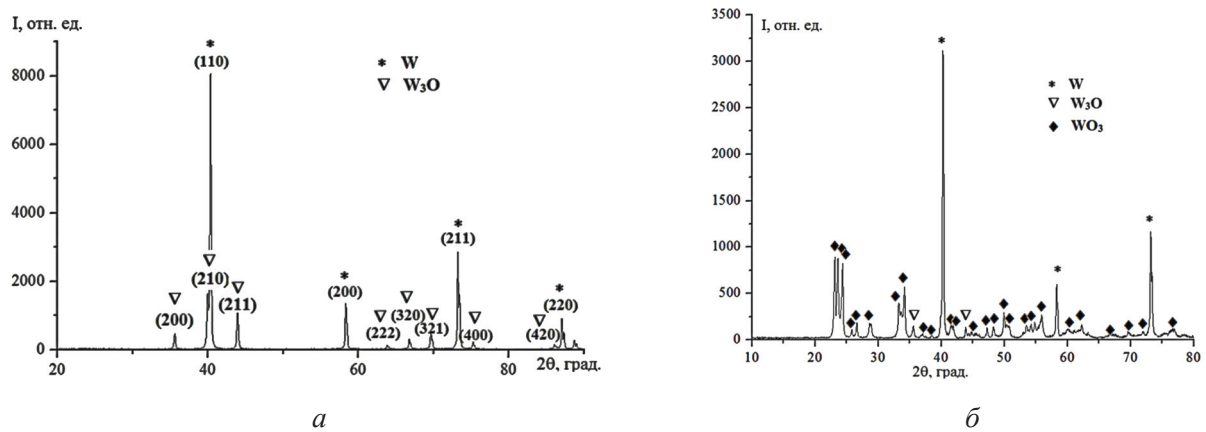


Рис. 2. Рентгенограмма нанопорошка W:

*a* – исходный порошок; *б* – оставшийся в тигле после плавки (выдержка расплава с порошком в печи в течение 60 мин)

Fig. 2. The X-ray diffraction pattern of the tungsten nanopowder:

*a* – initial powder; *б* – powder that remained in the crucible after melting (soaking of the melt with the powder in the furnace during 60 min)

Изменение времени выдержки модифицированного расплава в печи приводит к достаточно существенному изменению в микроструктуре (табл. 2). В немодифицированных образцах длина осей первого порядка составляет 500...800 мкм (рис. 3, *a*). Выдержка расплава в течение 10 мин перед разливкой значительно измельчает дендриты твердого раствора (рис. 3, *б*). Формируются короткие оси первого порядка длиной менее 200 мкм и короткие оси второго порядка (длиной не более 30...40 мкм). Значительно измельчаются пластины кремния. При выдержке расплава с нанопорошком вольфрама в печи в течение 60 мин в структуре отливок формируются развитые дендриты твер-

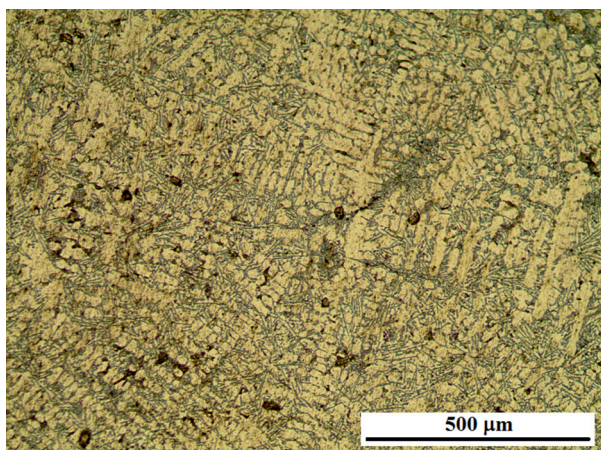
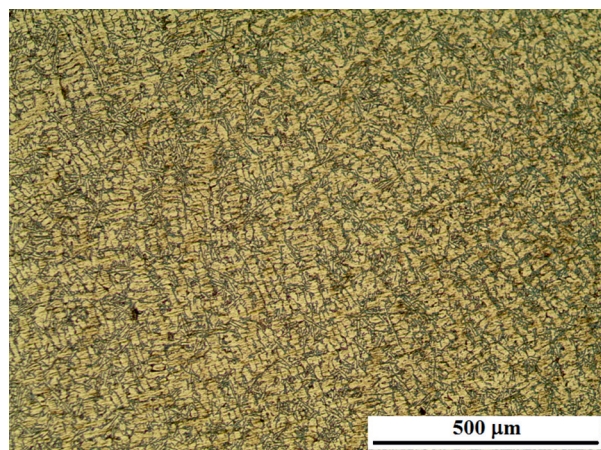
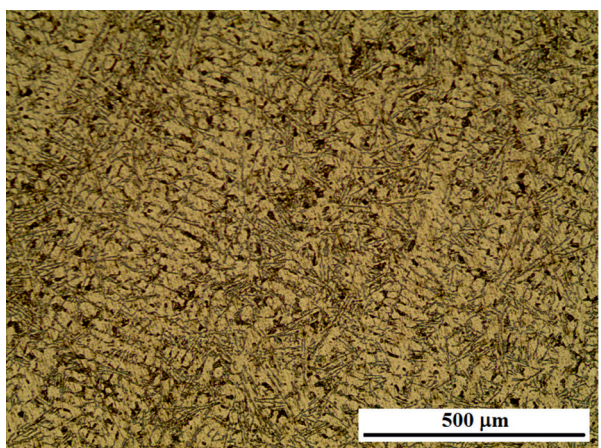
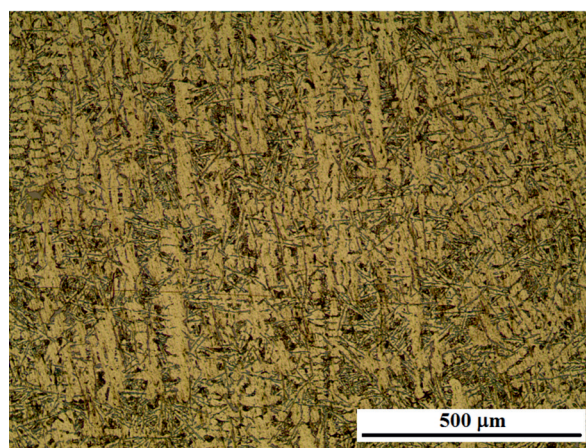
дого раствора кремния в алюминии. По данным оптической микроскопии (рис. 3, *в*), видно, что дендриты твердого раствора имеют развитые оси первого порядка длиной более 500 мкм, а также достаточно развитые оси второго порядка. При увеличении времени выдержки до 120 мин (рис. 3, *г*) длина осей первого порядка существенно уменьшается. Аналогично уменьшается и длина осей второго порядка, они становятся менее развитыми (меньшей длины и толщины). Изменения происходят и с пластинами кремния. Так, рост времени выдержки в печи до 120 мин уменьшает среднюю длину пластин кремния на 15...25 %. При этом возрастает толщина пластин.

Таблица 2

Table 2

**Параметры микроструктуры и ударная вязкость образцов сплава марки АК 12**  
**The microstructure parameters and impact strength of castings from the Al-12%Si alloy**

Время выдержки расплава с модификатором перед разливкой, мин / Holding time of the melt with the modifier before casting, min	Длина дендритов первого порядка, мкм / The length of dendrites of the first order, μm	Расстоянием между осями дендритов второго порядка, мкм / Distance between the axes of dendrites of the second order, μm	Ударная вязкость, КС / Impact strength, J/m <sup>2</sup>
Без модификатора / Without modifier	500...800	32	15,6
10	200	17	18
60	500...700	34	14,2
120	300...400	29	13,4

*a**б**в**г*

*Рис. 3.* Микроструктура отливок из сплава АК12:

*a* – без модифицирования; *б* – 0,1 масс. % W, выдержка 10 мин; *в* – 0,1 масс. % W, выдержка 60 мин.;  
*г* – 0,1 масс. % W выдержка 120 мин

*Fig. 3.* The microstructure of castings from the Al-12%Si alloy:

*a* – without modification; *б* – 0.1. mass. % of tungsten, soaking for 10 min; *в* – 0.1. mass. % of tungsten, soaking for 60 min; *г* – 0.1. mass. % of tungsten, soaking for 120 min

Такие изменения в структуре в значительной мере сказываются на свойствах. Проведенные испытания образцов, полученных при различной выдержке с введенным модификатором в печи, показали значительное влияние на ударную вязкость. Данные испытаний показывают, что ударная вязкость немодифицированных образцов составляет КС 15,6. Добавка порошка и выдержка расплава с порошком в печи в течение 10 мин дает рост ударной вязкости до КС18. Дальнейшее увеличение времени выдержки расплава в печи приводит к снижению ударной вязкости до КС13,4.

### Выводы

На основании проведенных экспериментальных работ можно сделать вывод о том, что

введение нанопорошка вольфрама в расплав силумина АК12 оказывает существенный модифицирующий эффект и позволяет изменить микроструктуру. При этом существенное влияние на эффект модифицирования порошком будет оказывать время выдержки расплава с порошком в нагретом состоянии. В случае введения порошка, выдержки в течение 10 мин и заливки расплава в тигле остается до 30 % неусвоившегося порошка. Избежать этого можно путем увеличения времени нахождения расплава с порошком в печи до 120 мин.

Оптимальным с точки зрения ударной вязкости является выдержка в печи расплава с модификатором в течение 10 мин и дальнейшая заливка. Это хорошо согласуется с данными металлографического анализа. Образцы, полу-



ченные при 10-минутной выдержке, обладают измельченными дендритами с неразвитой структурой и короткими пластинами кремния. Увеличение выдержки расплава в печи приводит к увеличению размеров дендритов и пластин кремния даже в сравнении с немодифицированной структурой. Поэтому ударная вязкость таких образцов снижается.

### Список литературы

1. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.
2. Influence of additives on the microstructure and tensile properties of near-eutectic Al-10.8%Si cast alloy / A.M.A. Mohamed, A.M. Samuel, F.H. Samuel, H.W. Doty // *Materials & Design*. – 2009. – Vol. 30, iss. 10. – P. 3943–3957. – doi: 10.1016/j.matdes.2009.05.042.
3. Белов Н.А., Савченко С.В., Хван А.В. Фазовый состав и структура силуминов: справочное издание. – М.: Изд-во МИСиС, 2007. – 283 с. – ISBN 978-5-87623-181-9.
4. Формирование структуры в системе Al-Si / С.С. Петров, А.Г. Пригунова, Д.Н. Ключник, С.В. Пригунов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – Днепропетровск, 2008. – № 1. – С. 43–52.
5. Куцова В.З., Носко О.А., Шерстобитова А.С. Влияние легирования на структуру, фазовый состав и свойства промышленных заэвтектических поршневых силуминов // *Стародубовские чтения 2008*. – Днепропетровск, 2008. – Ч. 3. – С. 10–19.
6. Nanoparticle-inhibited growth of primary aluminum in Al-10Si alloys / K. Wang, H.Y. Jiang, Y.W. Jia, H. Zhou, Q.D. Wang, B. Ye, W.J. Ding // *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 103. – P. 252–263. – doi: 10.1016/j.actamat.2015.10.005.
7. Eideh W. Modification of  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi compound in recycled Al-Si-Fe cast alloy by using Sr, Mg and Cr additions // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2008. – Vol. 24, N 1. – P. 45–47.
8. О влиянии Sr, Ti и В на модифицируемость доэвтектических силуминов / В.И. Никитин, К.В. Никитин, С.А. Акишин, Д.С. Криволапов // *Литейное производство*. – 2012. – № 1. – С. 24–28.
9. Effect of in situ  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles on the microstructure of hypereutectic Al-20%Si alloy / Q. Li, T. Xia, Y. Lan, W. Zhao, L. Fan, P. Li // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2013. – Vol. 577. – P. 232–236. – doi: 10.1016/j.jallcom.2013.04.043.
10. El-Mahallawi I.S., Shash A.Y., Amer A.E. Nanoreinforced cast Al-Si alloys with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> nanoparticles // *Metals*. – 2015. – Vol. 5, N 2. – P. 802–821. – doi: 10.3390/met5020802.
11. Modification of Al-Si alloys by metallothermic reduction using submerged SrO powders injection / C.M. Molina, A.F. Valdes, R.M. Valdez, J.T. Torres, N.R. Rosales, R.G. Estrada // *Materials Letters*. – 2009. – Vol. 63, iss. 9–10. – P. 815–818. – doi: 10.1016/j.matlet.2009.01.019.
12. Zykova A.P., Kazantseva L.A., Kurzina I.A. The effect of ultrafine powders on the structural formation processes and mechanical properties of Al-7%Si alloy // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – Vol. 1772, iss. 1. – P. 030020-1–030020-7. – doi: 10.1063/1.4964558.
13. Modification of eutectic Si in Al-Si alloys with Eu addition / J.H. Li, X.D. Wang, T.H. Ludwig, Y. Tsunekawa, L. Arnberg, J.Z. Jiang, P. Schumacher // *Acta Materialia*. – 2015. – Vol. 84. – P. 153–163. – doi: 10.1016/j.actamat.2014.10.064.
14. Yuansheng R.A.O., Hong Y.A.N., Zhi H.U. Modification of eutectic silicon and  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi phases in as-cast ADC12 alloys by using samarium addition // *Journal of Rare Earths*. – 2013. – Vol. 31, iss. 9. – P. 916–922. – doi: 10.1016/S1002-0721(12)60379-2.
15. Martyushev N.V., Bashev V.S., Zykova A.P. Influence of soaking time of modifier in melt on microstructure of Al-12%Si alloys // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 177. – P. 012118. – doi: 10.1088/1757-899X/177/1/012118.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2017 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](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)





## Modification of Al–Si Alloys with Particles of Ultrafine Tungsten Powder

Nikita Martyshev<sup>1, a, \*</sup>, Anna Zykova<sup>1, b</sup>, Vasily Bashev<sup>1, c</sup>

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>a</sup>  <http://orcid.org/0000-0003-0620-9561>,  [martjushev@tpu.ru](mailto:martjushev@tpu.ru), <sup>b</sup>  <http://orcid.org/0000-0001-8779-3784>,  [zykovaap@mail.ru](mailto:zykovaap@mail.ru),

<sup>c</sup>  <http://orcid.org/0000-0003-0605-9110>,  [bashevassilly@gmail.com](mailto:bashevassilly@gmail.com)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 28 June 2017

Revised: 28 July 2017

Accepted: 15 August 2017

Available online: 15 September 2017

#### Keywords:

Silumin

Al-Si alloy

Modifying

Ultradisperse powder

Tungsten

#### Acknowledgements:

The research is carried out at Tomsk Polytechnic University within the framework of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program grant.

### ABSTRACT

**Purpose:** A widespread method, exerting the influence on the homogeneous formation of the microstructure and enhancement of strength properties of Al-Si alloys, is a modification by super- and nanodispersed particles of different chemical compositions. Despite the significant advances in the studies of the influence of various modifying compositions on the structure and mechanical properties of casted silumins, there are no data about the influence of nanodispersed tungsten powder on the formation of the structural-phase state and mechanical properties of the Al-Si alloy in the literature. **Materials and methods:** The paper investigates the influence of the tungsten nanopowder in the amount of 0.01...0.5 mass.% on the structural-phase state and mechanical properties of the Al-12 %Si alloy with different soaking time of the modified melt. Metal smelting is conducted in the muffle furnace. Modification of the melt by the ultrafine powder is carried out before pouring. Before introducing the powder into the melt, its chemical, phase and granulometric composition is studied. For the obtained samples, metallographic examinations are made and the chemical composition, as well as impact toughness are determined. **Results and discussion:** The results of the conducted experiments showed that a part of the powder is not assimilated by the melt, but precipitated on the walls and the bottom of the crucible. The amount of the powder, not assimilated by the melt, depends on the soaking time. The assimilated powder influences significantly the cast structure; silicon plates are significantly refined; the sizes of the first-order axes and the distances between the axes of the second order decrease for the matrix crystals of casts. These changes in the structure influence largely the properties. Modification of the Al-12%Si alloy by the tungsten powder and soaking it in the furnace during 10 minutes allow increasing impact toughness by ~15 %. By the results of the experiments, it has been established that addition of 0.1 mass.% of tungsten into the melt and soaking it in the heated condition before pouring is an optimal mode. Such mode leads to a uniform distribution of eutectic ( $\alpha$ -Al + Si), a 1.5-time reduction of eutectic silicon plates, a change of the form of coarse plates into a fine fibrous form and enhancement of mechanical properties by 15...20 %.

**For citation:** Martyshev N.V., Zykova A.P., Bashev V.S. Modification of Al–Si alloys with particles of ultrafine tungsten powder. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017. no. 3 (76), pp. 51–58. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-51-58. (in Russian).

### References

1. Mondolfo L.F. *Aluminum alloys: structure and properties*. Butterworths, 1976. 971 p. ISBN 10: 0408706805. ISBN 13: 9780408706803 (Russ. ed.: Mondolfo L.F. *Struktura i svoistva alyuminievyykh splavov*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 640 p).
2. Mohamed A.M.A., Samuel A.M., Samuel F.H., Doty H.W. Influence of additives on the microstructure and tensile properties of near-eutectic Al-10.8%Si cast alloy. *Materials & Design*, 2009, vol. 30, iss. 10, pp. 3943–3957. doi: 10.1016/j.matdes.2009.05.042.
3. Belov N.A., Savchenko S.V., Khvan A.V. *Fazovyi sostav i struktura siluminov: spravochnoe izdanie [Phase composition and structure of alpacex: reference book]*. Moscow, MISiS Publ., 2007. 283 p. ISBN 978-5-87623-181-9.

#### \* Corresponding author

Martyshev Nikita V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor  
 Tomsk Polytechnic University,  
 30 Lenin Avenue, 634050, Tomsk, Russian Federation  
 Tel.: +7 (3822) 60-62-85, e-mail: [martjushev@tpu.ru](mailto:martjushev@tpu.ru)

4. Petrov S.S., Prigunova A.G., Klyuchnik D.N., Prigunov S.V. Formirovanie struktury v sisteme Al-Si [Formation of structure in the Al-Si system]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, 2008, no. 1, pp. 43–52.
5. Kutsova V.Z., Nosko O.A., Sherstobitova A.S. [Influence of alloying on structure, phase structure and properties of industrial piston alpxes]. *Starodubovskie chteniya 2008* [The Proceedings in Memory of Starodubov 2008]. Dnepropetrovsk, 2008, pt. 3, pp. 10–19.
6. Wang K., Jiang H.Y., Jia Y.W., Zhou H., Wang Q.D., Ye B., Ding W.J. Nanoparticle-inhibited growth of primary aluminum in Al–10Si alloys. *Acta Materialia*, 2016, vol. 103, pp. 252–263. doi: 10.1016/j.actamat.2015.10.005.
7. Eidhed W. Modification of  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi compound in recycled Al-Si-Fe cast alloy by using Sr, Mg and Cr additions. *Journal of Materials Science & Technology*, 2008, vol. 24, no. 1, pp. 45–47.
8. Nikitin V.I., Nikitin K.V., Akishin S.A., Krivolapov D.S. O vliyanii Sr, Ti i B na modifitsiruemost' doevtekticheskikh siluminov [Effect of Sr, Ti and B on the modifiability of hypoeutectic silumins]. *Liteinoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 2012, no. 1, pp. 24–28.
9. Li Q., Xia T., Lan Y., Zhao W., Fan L., Li P. Effect of in situ  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles on the microstructure of hypereutectic Al-20%Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 577, pp. 232–236. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.04.043.
10. El-Mahallawi I.S., Shash A.Y., Amer A.E. Nanoreinforced cast Al-Si alloys with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> nanoparticles. *Metals*, 2015, vol. 5, no. 2, pp. 802–821. doi: 10.3390/met5020802.
11. Molina C.M., Valdes A.F., Valdez R.M., Torres J.T., Rosales N.R., Estrada R.G. Modification of Al–Si alloys by metallothermic reduction using submerged SrO powders injection. *Materials Letters*, 2009, vol. 63, iss. 9–10, pp. 815–818. doi: 10.1016/j.matlet.2009.01.019.
12. Zykova A.P., Kazantseva L.A., Kurzina I.A. The effect of ultrafine powders on the structural formation processes and mechanical properties of Al–7%Si alloy. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1772, iss. 1, pp. 030020-1–030020-7. doi: 10.1063/1.4964558.
13. Li J.H., Wang X.D., Ludwig T.H., Tsunekawa Y., Arnberg L., Jiang J.Z., Schumacher P. Modification of eutectic Si in Al–Si alloys with Eu addition. *Acta Materialia*, 2015, vol. 84, pp. 153–163. doi: 10.1016/j.actamat.2014.10.064.
14. Yuansheng R.A.O., Hong Y.A.N., Zhi H.U. Modification of eutectic silicon and  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi phases in as-cast ADC12 alloys by using samarium addition. *Journal of Rare Earths*, 2013, vol. 31, iss. 9, pp. 916–922. doi: 10.1016/S1002-0721(12)60379-2.
15. Martyushev N.V., Bashev V.S., Zykova A.P. Influence of soaking time of modifier in melt on microstructure of Al-12%Si alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 177, pp. 012118. doi: 10.1088/1757-899X/177/1/012118.

## Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

## 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](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:

- неяршливости, 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 повторов, 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, степень 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 украшает 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 (или других) языках, 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](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, 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 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 разделе «Правила оформления» [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov/rules](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules).

## ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

(структура, содержание и объем авторского резюме (аннотации) к научным статьям в журнале; фрагменты из работы **О. В. Кирилловой «Редакционная подготовка научных журналов для включения в зарубежные индексы цитирования: методические рекомендации. – Москва, 2012»**, кандидата технических наук, заведующей отделением ВИНТИ РАН, члена Консультативного совета по формированию контента (Content Selection and Advisory Board – CSAB) SciVerse Scopus, Elsevier)

Авторское резюме должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте авторского резюме. Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в авторском резюме, не приводятся.

В тексте авторского резюме следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, и избегать сложных грамматических конструкций. В тексте авторского резюме следует применять значимые слова из текста статьи. Текст авторского резюме должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначащих формулировок. Текст должен быть связным, разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого. Сокращения и условные обозначения применяют в исключительных случаях или дают их расшифровку и определения при первом употреблении в авторском резюме. В авторском резюме не делаются ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Объем текста авторского резюме определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), но не менее 100–250 слов (для русскоязычных публикаций – предпочтительнее больший объем).

### Пример авторского резюме на русском языке

Значительная часть инновационных планов по внедрению изменений, содержащих в своей основе нововведения, либо не доходит до практической реализации, либо в действительности приносит гораздо меньше пользы, чем планировалось. Одна из причин этих тенденций кроется в отсутствии у руководителя реальных инструментов по планированию, оценке и контролю над инновациями. В статье предлагается механизм стратегического планирования компании, основанный на анализе как внутренних возможностей организации, так и внешних конкурентных сил, поиске путей использования внешних возможностей с учетом специфики компании. Стратегическое планирование опирается на свод правил и процедур, содержащих серию методов, использование которых позволяет руководителям компаний обеспечить быстрое реагирование на изменение внешней конъюнктуры. К таким методам относятся: стратегическое сегментирование; решение проблем в режиме реального времени; диагностика стратегической готовности к работе в условиях будущего; разработка общего плана управления; планирование предпринимательской позиции фирмы; стратегическое преобразование организации. Процесс стратегического планирования представлен в виде замкнутого цикла, состоящего из 9 последовательных этапов, каждый из которых представляет собой логическую последовательность мероприятий, обеспечивающих динамику развития системы. Результатом разработанной автором методики стратегического планирования является предложение перехода к «интерактивному стратегическому менеджменту», который в своей концептуальной основе ориентируется на творческий потенциал всего коллектива и изыскание путей его построения на базе оперативного преодоления ускоряющихся изменений, возрастающей организационной сложности и непредсказуемой изменчивости внешнего окружения.



### Это же авторское резюме на английском языке

A considerable part of innovative plans concerning implementation of developments with underlying novelties either do not reach the implementing stage, or in fact yield less benefit than anticipated. One of the reasons of such failures is the fact that the manager lacks real tools for planning, evaluating and controlling innovations. The article brings forward the mechanism for a strategic planning of a company, based on the analysis of both inner company's resources, and outer competitive strength, as well as on searching ways of using external opportunities with account taken of the company's specific character. Strategic planning is based on a code of regulations and procedures containing a series of methods, the use of which makes it possible for company's manager to ensure prompt measures of reaction to outer business environment changes. Such methods include: strategic segmentation; solving problems in real-time mode; diagnostics of strategic readiness to operate in the context of the future; working out a general plan of management; planning of the business position of the firm; strategic transformation of the company. Strategic planning process is presented as a closed cycle consisting of 9 successive stages, each of them represents a logical sequence of measures ensuring the dynamics of system development. The developed by the author strategic planning methods result in the recommendation to proceed to "interactive strategic management" which is conceptually based on the constructive potential of the collective body, on searching ways of its building on the basis of effective overcoming accelerating changes, increasing organizational complexity, and unpredictable changeability of the environment.

### Пример структурированного авторского резюме из иностранного журнала в Scopus

**Purpose:** Because of the large and continuous energetic requirements of brain function, neurometabolic dysfunction is a key pathophysiologic aspect of the epileptic brain. Additionally, neurometabolic dysfunction has many self-propagating features that are typical of epileptogenic processes, that is, where each occurrence makes the likelihood of further mitochondrial and energetic injury more probable. Thus abnormal neurometabolism may be not only a chronic accompaniment of the epileptic brain, but also a direct contributor to epileptogenesis.

**Methods:** We examine the evidence for neurometabolic dysfunction in epilepsy, integrating human studies of metabolic imaging, electrophysiology, microdialysis, as well as intracranial EEG and neuropathology.

**Results:** As an approach of noninvasive functional imaging, quantitative magnetic resonance spectroscopic imaging (MRSI) measured abnormalities of mitochondrial and energetic dysfunction (via  $^1\text{H}$  or  $^{31}\text{P}$  spectroscopy) are related to several pathophysiologic indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative  $^{13}\text{C}$ -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  $^{31}\text{P}$ 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 один из другого;

– необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т. е. “The study tested”, но не “It was tested in this study” (частая ошибка российских аннотаций);

– стиль письма должен быть компактным (плотным), поэтому предложения, вероятнее всего, будут длиннее, чем обычно.

Примеры, как не надо писать реферат, приведены на сайте издательства (<http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/abstracts.htm?part=3&>).

На сайте издательства также приведены примеры хороших рефератов для различных типов статей (обзоры, научные статьи, концептуальные статьи, практические статьи):

<http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/abstracts.htm?part=2&PHPSESSID=hdac5rtkb73ae013ofk4g8nrv1>.

**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<sup>1, a, \*</sup>, Виктор Кузьмин<sup>2, b</sup>, Александр Сивков<sup>3, c</sup>**





*(Полный список авторов с указанием Ф.И.О. Полностью должны быть написаны Имя и Фамилия автора (ов))*



<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

<sup>2</sup> Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

<sup>3</sup> 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)*

<sup>a</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>,  kornienko\_ee@mail.ru, <sup>b</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>,  vikuzmin57@mail.ru,

<sup>c</sup>  <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 Ф.И.О., 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 повторений, 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/м<sup>3</sup> (17.5 mol/m<sup>3</sup>); 77 К; 58 Дж/моль (58 J/mol), 50 м/с<sup>2</sup>, 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<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> или  $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ , так и скобок:  $J/(mol \cdot K)$  или  $J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$ , 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 ( $T_{пл}$  – 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 °С или 56,5 °N; 85,0 °В или 85,0 °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!**).

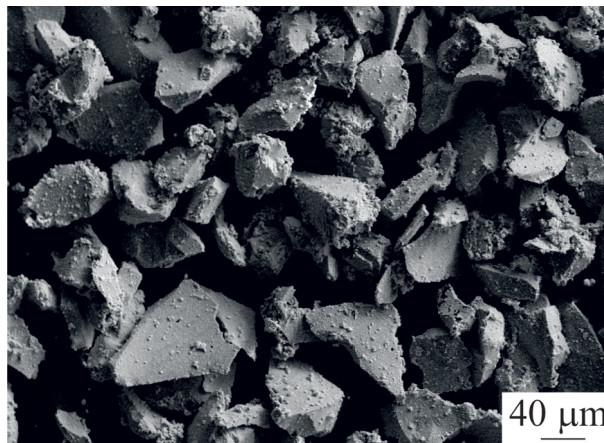


Рис. 1. Внешний вид частиц порошка  $B_4C-Ni-P$

Fig. 1. The particles of  $B_4C-Ni-P$  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 (или других) языке, 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, 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: «**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 B<sub>4</sub>C-Ni-P plasma coatings

(Заглавие статьи на английском языке. Название должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким)

**Elena Kornienko**<sup>1, a, \*</sup>, **Viktor Kuz'min**<sup>2, b</sup>, **Alexander Sivkov**<sup>3, c</sup>

(Полный список авторов с указанием Ф.И.О. Полностью должны быть написаны Имя и Фамилия автора (ов))

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

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

<sup>3</sup> 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)

<sup>a</sup> <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, kornienko\_ee@mail.ru, <sup>b</sup> <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, vikuzmin57@mail.ru,

<sup>c</sup> <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.)

#### 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

B<sub>4</sub>C-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 B<sub>4</sub>C-Ni-P Plasma Coatings. *Obrabotka 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 Prospect K. Marksa,

630073, Novosibirsk, Russian Federation

Tel.: 8 (383) 346-11-71, e-mail: kornienko\_ee@mail.ru

(Указывается полностью Ф.И.О., 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.)*

<sup>1</sup>Корниенко Елена Евгеньевна, <sup>2</sup>Кузьмин Виктор Иванович, <sup>3</sup>Сивков Александр Анатольевич

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

<sup>3</sup>Томский 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](mailto:kornienko_ee@mail.ru)

**Кузьмин В.И.** ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, e-mail: [vikuzmin57@mail.ru](mailto:vikuzmin57@mail.ru)

**Сивков А.А.** ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>, e-mail: [SivkovAA@mail.ru](mailto:SivkovAA@mail.ru)

### Структурные особенности плазменных покрытий В<sub>4</sub>С-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, В<sub>4</sub>С-Ni-P, покрытие.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бор в ядерной технике / В.Д. Рисованный, А.В. Захаров, Е.П. Клочков, Т.М. Гусева – Дмитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2011. – 668 с. ISBN 5-9483-016-7.

2. Fabrication and Tribological Evaluation of Vacuum Plasma-Sprayed В<sub>4</sub>С / Н. Zhu, Y. Niu, C. Lin, L. Huang, H. 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.)*

<sup>1</sup>Kornienko Elena E., <sup>2</sup>Kuz'min Viktor I., <sup>3</sup>Sivkov Alexander A.

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

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

<sup>3</sup>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](mailto:kornienko_ee@mail.ru)

**Kuz'min V.I.** ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, e-mail: [vikuzmin57@mail.ru](mailto:vikuzmin57@mail.ru)

**Sivkov A.A.** ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>, e-mail: [SivkovAA@mail.ru](mailto:SivkovAA@mail.ru).

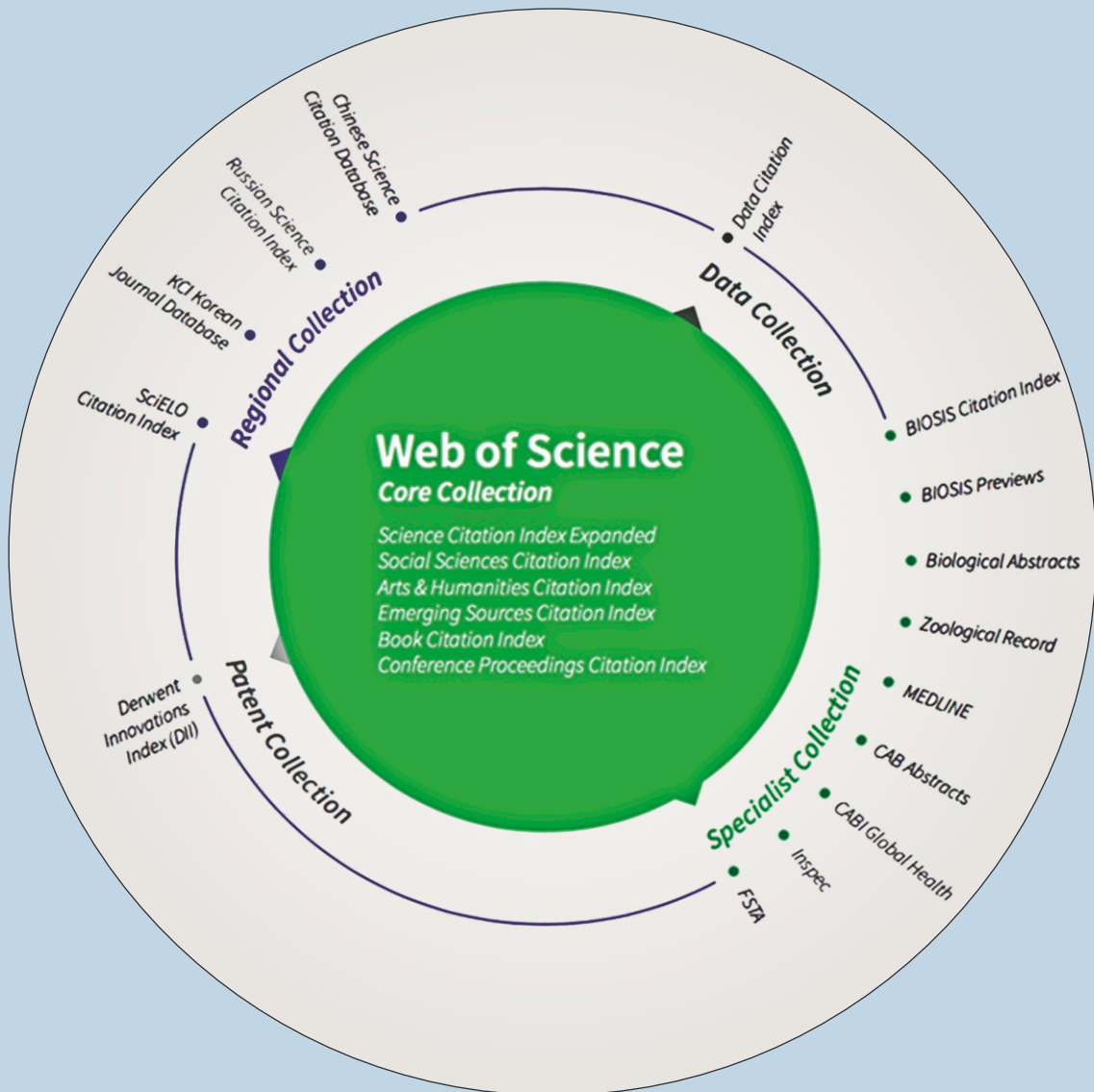
### Structure features of B<sub>4</sub>C-Ni-P plasma coatings

**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 следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

**Keywords:**

Plasma praying, Boron carbide, B<sub>4</sub>C-Ni-P, Coating

# ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ Web of Science



## 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

## Emerging Sources Citation Index

As a new index in the Web of Science™ Core Collection, Emerging Sources Citation Index (ESCI) expands the citation universe and reflects the growing global body of science and scholarly activity. ESCI complements the highly selective indexes by providing earlier visibility for sources under evaluation as part of SCIE, SSCI, and AHCI's rigorous journal selection process. Inclusion in ESCI provides greater discoverability which leads to measurable citations and more transparency in the selection process.

For a complete office list, visit:  
**clarivate.com**



**Clarivate  
Analytics**



## 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;
- WorldCat;
- The European Library;
- AcademicKeys;
- Research Bible.

### Журнал представлен:

- сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov/](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, ком. 137 ВЦ, зам. гл. редактора – В. Ю. Скиба.

 [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)

 +7 (383) 346-17-75

 [metal\\_working@mail.ru](mailto:metal_working@mail.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/>

