

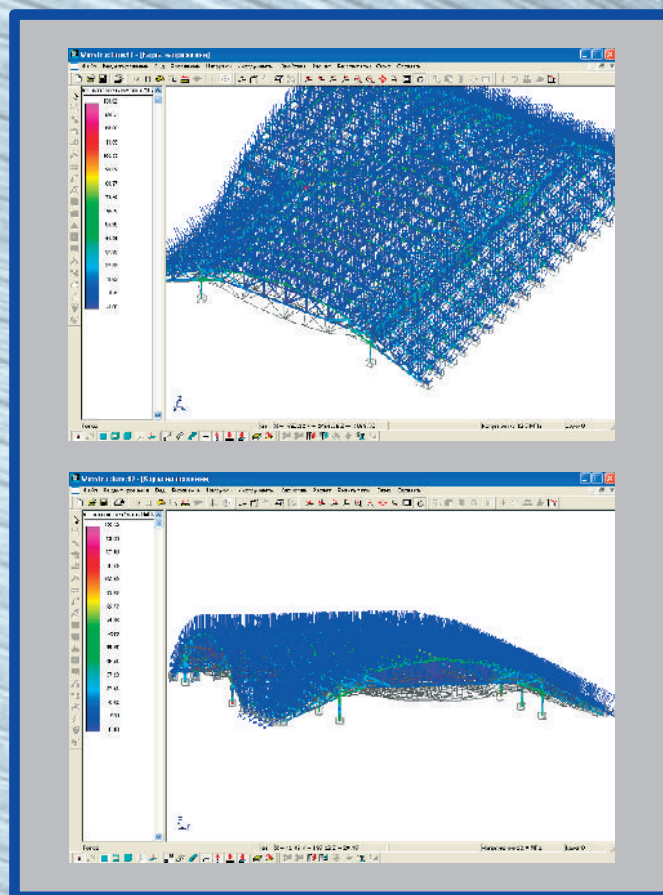
# ОБРАБОТКА

ISSN 1994-6309

# ОМ МЕТАЛЛОВ

## ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

№ 2 (67) АПРЕЛЬ–ИЮНЬ 2015 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



Деформированное состояние

НОВОСИБИРСК

## МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ»

С 24 по 27 марта компания «ИТЕ Сибирь» провела в Новосибирском Экспоцентре Международную выставку машиностроения и металлообработки *Mashex Siberia* – наиболее значимое событие отрасли за Уралом. Выставка является инструментом для технического перевооружения предприятий Сибирского Федерального округа и создает условия для опережающего развития машиностроительного комплекса. На выставке демонстрируются новинки отрасли, что способствует внедрению инноваций в производство, обновлению основных фондов предприятий и повышению их конкурентоспособности. В выставке приняли участие более 100 компаний из 21 региона России – от Калининграда до Владивостока, а также из Германии и Китая. За четыре дня на выставке побывало 3389 посетителей.

25 марта в рамках выставки состоялась 2-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы в машиностроении». Организаторами конференции в этом году выступили: Новосибирский государственный технический университет, *Hochschule RheinMain University of Applied Sciences*, *Leibniz Universität Hannover*, Донбасская государственная машиностроительная академия, Белорусский национальный технический университет, научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов», Выставочная компания «ИТЕ Сибирь», Братский государственный университет, Кузбасский государственный технический университет, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Бийский технологический институт.



Открыл конференцию и выступил с приветственным словом проректор по учебной работе НГТУ, профессор Батаев А.А. В своем выступлении Анатолий Андреевич выразил надежду, что конференция внесет значительный вклад в развитие технической науки и решение её актуальных проблем. Успехов в проведении конференции и творческих достижений пожелал участникам

декан механико-технологического факультета НГТУ В.В. Янпольский.

На конференции были рассмотрены вопросы взаимодействия науки и промышленных предприятий, совершенствования технологии производства деталей машин, создания и исследования передовых конструкционных материалов, инновационных и инвестиционных подходов в промышленности. В конференции приняли участие более 250 представителей отечественной и зарубежной промышленности, научно-исследовательские институты и вузы Бразилии, Германии, Франции, Республики Беларусь, Украины и России.

В ходе конференции освещены следующие темы: «Инновационные технологии в машиностроении», «Технологическое оборудование, оснастка и инструменты», «Материаловедение в машиностроении», «Экономика и организация инновационных процессов в машиностроении». Работу конференции отличала обстановка доброжелательности, продуктивной критики, разнообразие рассматриваемых проблем машиностроения. Многие выводы, представленные докладчиками во время выступлений, представляют не только теоретический интерес, но и обладают несомненной практической ценностью.

В заключение конференции были подведены ее итоги и всем участникам за высокий научно-технический уровень, актуальность тематики и практическую значимость представленных докладов вручены почетные грамоты.

Материалы конференции будут опубликованы в периодических журналах “*Applied Mechanics and Materials*” и «Актуальные проблемы в машиностроении».



# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

## ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309

№ 2 (67) АПРЕЛЬ–ИЮНЬ 2015 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

#### Председатель совета

**Пустовой Николай Васильевич** – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, член Национального комитета по теоретической и прикладной механике, президент НГТУ, г. Новосибирск (Российская Федерация)

#### Члены совета

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

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

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

*Украина:* **Ковалевский С.В.**, доктор технических наук, профессор, проректор по научно-педагогической работе Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск

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

Журнал входит в *Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий*, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 2 марта 2012 года № 8/13)

#### СОУЧРЕДИТЕЛИ

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

#### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

#### ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

**Атапин Владимир Григорьевич** – профессор,  
доктор технических наук

**Буров Владимир Григорьевич** – профессор,  
доктор технических наук  
(технология, материаловедение)

**Скиба Вадим Юрьевич** – доцент, кандидат технических наук  
(оборудование, инструменты)

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

#### ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

#### ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВПО «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. 274, Атапин В.Г.

Тел. (383) 346-17-77

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>Алексеев Н.С., Капорин В.А., Иванов С.В.</b> Эффективность шлифования микропористых покрытий с применением СОЖ.....	6
<b>Щукин В.Г., Марусин В.В.</b> Упрочнение фрикционного клина вагонной тележки.....	17
<b>Пантелеенко Ф.И., Громько Г.Ф., Оковитый В.В.</b> Проверка на адекватность модели растекания частицы на подложке при плазменном напылении теплозащитных покрытий.....	24

### ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

<b>Атапин В.Г.</b> Исследование прочности несущих конструкций сооружения промышленного назначения.....	32
--	----

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<b>Оковитый В.А., Пантелеенко Ф.И., Талако Т.Л., Пантелеенко А.Ф.</b> Технология получения композиционного материала на основе многофункциональной оксидной керамики.....	39
<b>Оковитый В.А., Пантелеенко А.Ф.</b> Оптимизация процесса напыления износостойких покрытий на основе многофункциональной оксидной керамики.....	46
<b>Самойленко В. В., Лазуренко Д.В., Поляков И.А., Руктуев А.А., Ленивцева О.Г., Ложкин В.С.</b> Влияние прокатки и термической обработки на структуру и свойства слоёв, сформированных на титановых заготовках методом электронно-лучевой наплавки.....	55
Рекомендации по написанию научной статьи .....	64
Подготовка аннотации .....	67
Правила для авторов .....	70

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 03.06.2015. Выход в свет 15.06.2015. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
 Усл. печ.л. 9,0. Уч.-изд. л. 16,74. Изд. № 103. Заказ 951. Тираж 300 экз.

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

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ METAL WORKING and MATERIAL SCIENCE

ISSN 1994-6309

Journal no.2 (67) APRIL–JUNE 2015

## EDITORIAL BOARD

### EDITOR-IN-CHIEF:

**Anatoliy A. Bataev**, D.Sc. (Engineering), Professor, Rector,  
Head, Department of Material Science in Mechanical Engineering,  
Novosibirsk State Technical University,  
*Novosibirsk, Russian Federation*

### DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

**Vladimir G. Atapin**, D.Sc. (Engineering), Professor,  
Department of Aircraft Strength,  
Novosibirsk State Technical University,  
*Novosibirsk, Russian Federation*

**Vladimir G. Burov**, D.Sc. (Engineering), Professor,  
Department of Material Science in Mechanical Engineering,  
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»

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

Tel.: (383) 3461777

[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*;

**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*;

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

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

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

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

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

**Aleksey V. Makarov**, D.Sc. (Engineering), Senior Researcher,  
Institute of Engineering Science,  
Russian Academy of Sciences (Ural Branch), *Yekaterinburg*;

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

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

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

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

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

## CONTENTS

### TECHNOLOGY

<b>Alexeev N. S., Kaporin V. A., Ivanov S. V.</b> Efficiency of microporous coatings grinding using coolant.....	6
<b>Shchukin V.G., Marusin V.V.</b> The hardening of friction wedge of freight car bogie.....	17
<b>Panteleenko F.I., Gromyko G.F., Okovity V.V.</b> Test for adequacy of model of particle spreading over the substrate during plasma spraying of thermal barrier coatings.....	24

### EQUIPMENT. INSTRUMENTS

<b>Atapin V.G.</b> Investigation of the strength of carrier constructions of industrial building.....	32
---	----

### MATERIAL SCIENCE

<b>Okovity V.A., Panteleenko F.I., Talako T.L., Panteleenko A.F.</b> The technology of producing a composite material based on a multifunctional oxide ceramics.....	39
<b>Okovity V.A., Panteleenko A.F.</b> Optimization of the deposition process of wear-resistant coatings based on multifunctional oxide ceramics.....	46
<b>Samoylenko V. V., Lazurenko D.V., Polyakov I.A., Ruktuev A.A., Lenivtseva O.G., Lozhkin V.S.</b> Influence of rolling and heat treatment on the structure and properties of the coatings fabricated on the titanium substrates by electron beam cladding.....	55
Guidelines for Writing a Scientific Paper .....	64
Abstract requirements .....	67
Rules for authors .....	70

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ ШЛИФОВАНИЯ МИКРОПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОЖ

*Н.С. АЛЕКСЕЕВ, канд. техн. наук, доцент  
В.А. КАПОРИН, инженер  
С.В. ИВАНОВ, инженер  
(РИИ АлтГТУ, г. Рубцовск)*

Поступила 11 марта 2015  
Рецензирование 11 апреля 2015  
Принята к печати 4 мая 2015

**Алексеев Н.С.** – 658207, г. Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6,  
Рубцовский индустриальный институт АлтГТУ,  
e-mail: tm@rubinst.ru

Износостойкие микропористые покрытия на никелевой и железной основе относятся к группе трудно-обрабатываемых материалов, абразивная обработка которых сопряжена со значительными трудностями. Основные причины плохой обрабатываемости этих покрытий шлифованием кроются в быстрой потере режущих свойств абразивного круга вследствие его износа, затупления и активного налипания частиц покрытия на рабочую поверхность инструмента. В статье представлены результаты исследований режущей способности кругов из электрокорунда и карбида кремния при шлифовании микропористых покрытий без применения смазочно-охлаждающей жидкости (всухую) с использованием водопроводной воды и масляной смазочно-охлаждающей жидкости. Исследован износ абразивных зерен и характер их взаимодействия с обрабатываемым материалом в зависимости от состава смазочно-охлаждающей жидкости. Предлагаются пути повышения эффективности процесса шлифования микропористых покрытий за счет применения химически активной среды, способной уменьшить взаимодействие покрытий с абразивными материалами. Испытаны новые смазочно-охлаждающие жидкости с химически активными веществами, пассивирующими поверхность микропористых покрытий на операциях круглого наружного шлифования.

Результатом проведенных исследований является предложение о целесообразности замены масляных составов смазочно-охлаждающих жидкостей на водные составы, позволяющие увеличить производительность обработки и стойкость кругов из электрокорунда и карбида кремния при одновременном снижении высоты микронеровностей по сравнению с масляными составами. Комплексная оценка результатов испытаний по рейтинговому методу показала, что наибольшей эффективностью при круглом наружном шлифовании микропористых покрытий на никелевой и железной основе обладает водный раствор эмульсола «ЭПМ – 1ш».

**Ключевые слова:** плазменные покрытия, абразивная обработка, смазочно-охлаждающая жидкость, шлифовальные круги, силы резания, износ инструмента, шероховатость поверхности.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-6-16

## Введение

Процесс шлифования износостойких микропористых покрытий (далее покрытий) деталей сопровождается интенсивным физико-химическим взаимодействием обрабатываемого материала с абразивными зёрнами (АЗ), засаливанием и затуплением рабочей поверхности шлифовального круга (ШК), повышением сил резания и

контактных температур [1]. В результате возрастает шероховатость обработанной поверхности, на ней появляются прижоги и огранка.

Для восстановления режущей способности ШК используют правку. Глубина проникновения шлама в пространство между АЗ и в поры ШК достигает значительных величин (до 0,3 мм) [2, 3]. Если не предпринимать мер для снижения интенсивности засаливания кругов в процессе



шлифования, то при каждой правке придется удалять значительный слой абразива и связки. Соответственно резко возрастает и расход ШК.

Режущая способность ШК стабилизируется при его непрерывной правке [4, 5]. Наибольшее распространение этот способ правки нашел при операциях глубинного шлифования заготовок из труднообрабатываемых материалов. Недостатками шлифования с непрерывной правкой круга алмазным роликом является повышенный расход абразивного инструмента (АИ) и повышенный уровень вибраций [2].

Известен прием, когда для очистки засаленного ШК на его рабочую поверхность направляют струю порошка или абразивную суспензию под давлением [6]. В этих случаях неизбежен большой расход абразивного порошка и повышенный износ средств технологического оснащения.

Интенсивность засаливания ШК можно уменьшить путем подачи в зону шлифования смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), содержащей микропорошок окиси алюминия [7].

Для удаления с АЗ налипов металла заготовки используют механическую очистку рабочей поверхности ШК, которую осуществляют периодически несколько раз между правками. Накоплен определенный опыт механической очистки кругов из сверхтвердых материалов брусками из пемзы, песчаника, известняка и других неметаллических материалов [8]. Для очистки ШК из традиционных абразивных материалов используют эластомер и абразивные бруски [9, 10]. Однако эластомером невозможно удалить налипы металла, удерживаемые на АЗ силами адгезионного взаимодействия. Недостатками механической очистки абразивными брусками являются трудность удаления отходов шлифования из пространства между АЗ и неодинаковые условия очистки зерен, находящихся на различных уровнях от условной наружной поверхности круга.

Известны попытки использования магнитного и электрического полей для очистки [11]. Однако силы, с которыми эти поля воздействуют на отходы шлифования, находящиеся на рабочей поверхности ШК, не позволяют удалять с поверхности круга частицы, имеющие прочные связи с АЗ.

Использовали и химическое воздействие на рабочую поверхность засаленного круга с целью растворения налипших частиц. Так, в работе [12] при алмазной обработке рекомендуют применять слабый раствор азотной кислоты, в котором выдерживают круги в течение времени, достаточного для удаления отходов шлифования. После химического воздействия круги подвергают нейтрализации с целью предотвращения дальнейшей коррозии металлической связки. Как видим, химическое воздействие связано со значительными затратами времени на его осуществление.

Твердые и пластичные смазочные материалы (ТСМ и ПСМ), используемые на операциях шлифования, транспортируются в зону обработки шлифовальным кругом или заготовкой и вступают в активное химическое взаимодействие с ювенильными поверхностями, образующимися в этой зоне [13]. При этом обеспечивается хорошее смазочное, демпфирующее и диспергирующее действие этих смазочно-охлаждающих технологических средств. Однако охлаждающее и моющее действия ТСМ и ПСМ весьма ограничены.

Реальным средством повышения качества и производительности обработки покрытий шлифованием является применение СОЖ. Рекомендации по выбору состава СОЖ для операций шлифования заготовок из различных однородных (монокристаллических) материалов, в том числе труднообрабатываемых, содержатся в работах [14–16]. Однако систематизированные рекомендации по выбору СОЖ для шлифования конкретных покрытий, по существу, отсутствуют. Имеются лишь самые общие сведения о применении СОЖ для шлифования покрытий без ранжирования их по технологической эффективности [17, 18].

Цель настоящего исследования заключается в определении эффективного вида СОЖ для предварительного круглого наружного шлифования покрытий. Для этого в Рубцовском индустриальном институте совместно с ООО «Научные исследования и химические продукты (НИИХП)» (г. Новосибирск) были проведены сравнительные эксперименты с использованием различных составов смазочно-охлаждающих жидкостей.

## Методика экспериментального исследования

На первом этапе исследований испытывались серийные СОЖ с различным охлаждающим и смазывающим действием: углеводородная – масло индустриальное И-20А (ГОСТ20799-88) ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» и две марки СОЖ производства ООО «НИИХП» [19]: синтетическая – водный раствор концентрата ПОА-2м ТУ0258-006-11850138-02 и эмульсионная – водный раствор эмульсола ЭПМ-1ш ТУ0258-004-11850138-01.

Масляные СОЖ обладают высоким экранирующим действием, уменьшают интенсивность схватывания материала с рабочей поверхностью режущих и давящих зерен, в результате чего снижаются силы трения [12].

Продукты ПОА-2м и ЭПМ-1ш – это новые марки, рекомендуемые для замены отечественных СОЖ различной природы (автокатов, велсов, эколов и др.) и импортных, таких как Ratak, Mobilent, Blasocut, Cimcool и др. Концентрат ПОА-2м состоит из водорастворимого полимера (полиэтиленоксида) и различных добавок (антикоррозионной, антибактериальной и специальной), а также из компонентов, повышающих его смазывающие свойства [20]. Водорастворимый полимер полиэтиленоксид обладает уникальным свойством – при повышении температуры он выпадает из раствора (теряет растворимость в воде). Известно, что в процессе шлифования происходит локальное повышение температуры в контакте круг-деталь, способствующее выпадению полимера из раствора в зоне обработки и образованию молекулярного защитного слоя между поверхностью круга и детали. А это, в свою очередь, уменьшает износ инструмента, причем с ростом температуры плотность молекулярного слоя увеличивается [20].

Эмульсол «ЭПМ-1ш» содержит: сольвент рафината минерального масла, щелочные мыла натуральных жирных кислот, амиды жирных кислот, алкилполигликольэфир, нефтяные сульфонаты натрия, метилен-бис-тетрагидрооксазин, бутилдигликол.

Так как износ зерен и характер взаимодействия абразива с обрабатываемым материалом зависит от СОЖ, то вначале проводилась серия экспериментов по шлифованию покрытий всу-

хую (без СОЖ), затем в среде, обладающей в основном охлаждающими свойствами (в водопроводной воде), а также в химически активной среде с добавлением в воду фосфата калия ( $K_3PO_4$ ), который известен как основной компонент специальной «титановой» СОЖ [21].

В итоге для исследований влияния среды на обрабатываемость плазменных покрытий были подготовлены следующие составы:

**состав № 1** – шлифование всухую (без СОЖ);

**состав № 2** – водопроводная вода;

**состав № 3** – 4 %-й водный раствор фосфата калия;

**состав № 4** – масло индустриальное И-20;

**состав № 5** – 3 %-й водный раствор концентрата «ПОА-2м»;

**состав № 6** – 3 %-й водный раствор эмульсола «ЭПМ-1ш».

Концентрацию серийных СОЖ выбирали в соответствии с рекомендациями разработчика. Испытания проводились на экспериментальной установке на базе круглошлифовального полуавтомата мод. 3М152МВФ2 с ЧПУ по схеме круглого наружного продольного шлифования с выхаживанием по методике [22]. Шлифовали образцы-втулки из стали 45 диаметром  $60 \pm 0,1$  мм и высотой 70 мм с плазменно-напыленными покрытиями.

Обработке подвергали широко распространенные плазменные покрытия на никелевой (покрытие ПВ) и железной (покрытие ПЖ) основе [22]. Обрабатывали покрытия серийными кругами с характеристиками 24AF46N6V и 64CF46N6V формы 1  $600 \times 25 \times 305$  ГОСТ P52781–2007. Режимы шлифования: скорость резания  $v_r = 35$  м/с, скорость продольной подачи  $s_{\text{прод}} = 425$  мм/мин, скорость вращения детали  $v_d = 19$  м/мин и глубина резания  $t = 0,01$  мм/дв. ход.

Для оценки технологической эффективности СОЖ использовали следующие критерии: состояние рабочей поверхности круга и отдельных зерен; период стойкости  $T$ , мин абразивного круга, определяемый по появлению следов дробления или прижогов на шлифованной поверхности покрытий; коэффициент шлифования по объему  $K_{\text{ш}}$ , мм<sup>3</sup>/мм<sup>3</sup>; коэффициент режущей способности абразивного круга  $K_p$ , мм<sup>3</sup>/мин·Н; удельную мощность шлифования  $K_{\text{уд}}$ , Вт·мин/мм<sup>3</sup>; комплексный критерий  $K_m$ , мм<sup>3</sup>/мин·Вт·мкм; параметр шероховатости шлифованных образ-

цов  $Ra$ , мкм. Кроме того, при шлифовании покрытия ПЖ контролировали интенсивность засаливания  $C_3$ , мг/см<sup>2</sup>·мин, абразивных кругов.

## Результаты экспериментальных исследований и обсуждение

Результаты испытаний представленных СОЖ при круглом наружном продольном шлифовании покрытий на первом этапе исследований показаны в табл. 1. Из данных этой таблицы видно, что при шлифовании всухую (состав №1) покрытий ПВ и ПЖ кругами из 24А и 64С были получены минимальные значения периода стойкости АИ. Низкая технологическая эффективность состава № 1 объясняется существующей картиной протекания износа этих кругов, полученной по результатам наблюдений за их рабочей поверхностью и отдельными зернами, а также анализа микрофотографий.

При обработке всухую покрытия ПВ кругом из 24А в начальный период шлифования на зернах образуется достаточно ровная площадка износа без заметных разрушений, покрытая налипшим металлом. С течением времени на этой площадке появляются микротрещины, что в дальнейшем приводит к сколам и вырывам отдельных микрообъемов зерна. Шлифование в таких условиях осуществляется с наибольшими энергозатратами и максимальной силовой напряженностью (см. табл. 1).

При шлифовании всухую покрытия ПВ кругом из 64С происходят интенсивное налипание металла на вершины зерен и достаточно большой объемный износ этого инструмента, о чем свидетельствуют минимальные значения стойкости  $T = 0,67$  мин и коэффициента шлифования  $K_{ш} = 0,53$  мм<sup>3</sup>/мм<sup>3</sup>. Образование больших налипов на зернах карбида кремния приводит к тому, что практически происходит трение налипших частиц покрытия по покрытию. Увеличение при этом силы трения [23] приводит к интенсивному микровыкрашиванию АЗ, о чем свидетельствует большое количество зерен и даже целых их блоков, обнаруженных в отходах шлифования.

Микровыкрашивание и разрушение АЗ, вырывание их из связки приводят к постоянному обновлению режущей поверхности ШК с образованием нового ряда работоспособных ре-

жущих кромок. Поэтому шлифование всухую покрытия ПВ кругом из 64С сопровождается наименьшими энергозатратами и минимальной силовой напряженностью (см. табл. 1).

При шлифовании всухую покрытия ПЖ кругами из 24А и 64С наблюдается наибольшая интенсивность их засаливания (табл. 1). Однако при этом значение  $C_3$  для круга из 64С почти в 10 раз меньше по сравнению с кругом из 24А, что объясняется более высокой адгезионно-химической активностью последнего по отношению к покрытию ПЖ. Высокая интенсивность засаливания кругов из 24А и 64С при шлифовании всухую покрытия ПЖ вызывает наибольшие энергозатраты и минимальные значения показателя  $K_m$  и коэффициентов  $K_{ш}$  и  $K_p$ .

Применение состава №1 позволяет получить малые значения параметра  $Ra$  шероховатости шлифованных поверхностей при обработке кругами из 24А и 64С как покрытия ПВ, так и покрытия ПЖ. Низкую шероховатость обработанных покрытий при их шлифовании всухую можно объяснить интенсивными адгезионными процессами. С увеличением степени засаливания режущих кромок АЗ в контакте круг-покрытие начинают усиливаться процессы деформирования металла. Абразивные зерна с налипшим металлом на режущих кромках начинают выступать в роли «микророликов», деформируя и выглаживая обработанную поверхность, что, в свою очередь, вызывает возрастание времени выхаживания. Чем выше интенсивность засаливания ШК, тем продолжительнее время выхаживания и ниже шероховатость обработанной поверхности.

При охлаждении водой (состав № 2) интенсивность налипания металла на вершины зерен по сравнению со шлифованием всухую заметно уменьшилась. Так, например, при шлифовании покрытия ПЖ кругами из 24А и 64С с использованием состава № 2 интенсивность засаливания этих инструментов снизилась соответственно на 18 и 15 % (см. табл. 1). В частности, на зернах карбида кремния шапкообразные налипы, характерные при шлифовании всухую покрытия ПВ, не обнаружены. Очевидно, действие воды заключается в механическом удалении образовавшегося налипа. Анализ отходов шлифования показал, что по сравнению со шлифованием всухую при охлаждении водой значительно умень-

шились количество и размеры налипших частиц в шлеме, что свидетельствует о том, что вода в некоторой степени препятствует адгезии частиц покрытия к абразивному зерну.

На электрокорундовых зернах при охлаждении водой налип выглядит иначе: он стал настолько тонким, что сквозь пленку металла хорошо просматривается рельеф площадки износа, покрытой микросколами и частицами покрытия. Шлифование кругом из 24А с использованием в качестве СОЖ водопроводной воды повышает период стойкости АИ и коэффициент шлифования в 1,6 и 1,2 раза соответственно при обработке покрытия ПВ и в 1,2 и 1,1 раза при обработке покрытия ПЖ. Применение состава № 2 характеризуется меньшей силовой напряженностью и энергозатратами на шлифование по сравнению с обработкой всухую (см. табл. 1).

Уменьшение интенсивности засаливания кругов, повышение периода их стойкости и коэффициента шлифования свидетельствуют об улучшении процесса шлифования при охлаждении водой по сравнению со шлифованием всухую.

Добавление в водопроводную воду присадки  $K_3PO_4$  (состав №3) существенно не изменяет охлаждающих свойств среды, но значительно увеличивает ее противoadгезионную способность. Присадка, вступая во взаимодействие с ювенильными поверхностями покрытий, образует в зоне резания изолирующую пленку, уменьшая возможность непосредственного контакта абразивного материала с обрабатываемым покрытием, вследствие чего повышается период стойкости кругов и уменьшается их износ, что подтверждается ростом коэффициента шлифования. Так, например, при шлифовании кругом из 24А покрытий ПВ и ПЖ с использованием состава № 3 достигался коэффициент шлифования  $K_{ш} = 2,4$  и  $5,5 \text{ мм}^3/\text{мм}^3$  соответственно против  $K_{ш} = 2,2$  и  $5,3 \text{ мм}^3/\text{мм}^3$ , полученный при шлифовании с использованием водопроводной воды. Применение состава № 3 обеспечивает также снижение энергозатрат на шлифование и рост коэффициента  $K_p$  (см. табл. 1) при обработке обоих типов рассматриваемых покрытий кругами из 24А и 64С.

Наиболее ошутимое действие присадка оказывает на зерна электрокорунда при шлифовании покрытия ПВ, почти полностью предотвращая налипание на них металла, и в меньшей степе-

ни на зерна карбида кремния при шлифовании этого же покрытия, что можно объяснить различной адгезионной и химической активностью указанных абразивных материалов к покрытию ПВ. Электрокорунд является более инертным абразивом по отношению к покрытию ПВ, поэтому действие химической присадки оказывается достаточным для нейтрализации взаимодействия материала покрытия с этим абразивом. Карбид кремния в этом отношении значительно уступает электрокорунду, поэтому используемая среда не в состоянии в должной степени воспрепятствовать процессам, протекающим в зоне контакта карбид кремния – покрытие.

При использовании масляной СОЖ (состав № 4) шлифование кругами из 24А и 64С осуществляется с наименьшими энергозатратами и силовой напряженностью как при обработке покрытия ПВ, так и покрытия ПЖ. Однако следует отметить, что этот результат получен при существенно меньших значениях периода стойкости, что, по нашему мнению, объясняется недостаточным вымыванием стружки и выкрошившихся абразивных частиц с поверхности заготовки и инструмента, вследствие чего происходит засаливание зерен инструмента и соответственно потеря их режущей способности. При подаче в зону шлифования масляной СОЖ была зафиксирована низкая интенсивность изнашивания абразивных кругов, о чем свидетельствуют высокие значения  $K_{ш}$  для всех сочетаний абразивный круг – покрытие. Применение состава №4 характеризуется высоким значением параметра  $Ra$  и малой величиной коэффициента режущей способности  $K_p$  (см. табл. 1).

При использовании масляной СОЖ проявились и ее серьезные недостатки: в процессе шлифования вокруг рабочей зоны создавался масляный туман, который вреден для дыхательных путей и пожароопасен; наблюдалось также дымление масляной СОЖ.

Наилучшие результаты по технологической эффективности имеют составы № 5 и 6, позволяющие получить максимальные периоды стойкости кругов:  $T = 7,6$  и  $6,9$  мин соответственно в случае шлифования покрытия ПВ кругом из 24А и  $T = 4,4$  и  $3,7$  мин при обработке этого же покрытия кругом из 64С (см. табл.1). При шлифовании покрытия ПЖ с подачей в зону резания продуктов ПОА-2м и ЭПМ-1ш периоды

Таблица 1

**Усредненные показатели продольного шлифования плазменных покрытий с использованием различных СОЖ на первом этапе исследований**

Составы СОЖ	Т, мин	Составляющие силы шлифования, Н		Ra, мкм	$K_{ш}^3$ , мм <sup>3</sup> /мм <sup>3</sup>	$K_{Np}$ , Вт · мин / мм <sup>3</sup>	$K_{Pz}$ , мм <sup>3</sup> / мин · Н	$\frac{K_{M^3}}{\text{мин} \cdot \text{Вт} \cdot \text{мкм}}$	$C^3$ , мг/см <sup>2</sup>
		$P_y$	$P_z$						
<i>Результаты, полученные при шлифовании покрытий на никелевой (числитель) и железной (знаменатель) основе кругом 24AF46N6V</i>									
№ 1	3,3/9,3	161/132	85/62	0,17/0,24	1,8/5,1	81,2/57,6	2,2/2,8	0,075/0,074	- / 6,7 · 10 <sup>-3</sup>
№ 2	5,3/11	134/117	76/54	0,21/0,25	2,2/5,3	80,4/49,6	2,4/3,2	0,060/0,080	- / 5,7 · 10 <sup>-3</sup>
№ 3	5,8/11,9	131/118	74/54	0,16/0,25	2,4/5,5	78,3/42,8	2,6/3,4	0,081/0,079	- / 5,3 · 10 <sup>-3</sup>
№ 4	4,1/7,4	112/115	30/28	0,31/0,31	4,0/5,8	37,7/31,8	2,5/2,6	0,085/0,102	- / 5,1 · 10 <sup>-3</sup>
№ 5	7,6/16	126/111	68/55	0,17/0,24	3,7/6,9	65,7/51,5	2,8/3,2	0,088/0,083	- / 4,3 · 10 <sup>-3</sup>
№ 6	6,9/14	108/112	61/49	0,15/0,21	4,2/7,2	59,1/45,5	3,3/3,3	0,117/0,103	- / 4,9 · 10 <sup>-3</sup>
<i>Результаты, полученные при шлифовании покрытий на никелевой (числитель) и железной (знаменатель) основе кругом 64CF46N6V</i>									
№ 1	0,67/36	142/116	51/56	0,10/0,24	0,53/30,4	48,3/52,6	2,5/3,1	0,146/0,080	- / 0,61 · 10 <sup>-3</sup>
№ 2	3,0/47	153/112	111/51	0,16/0,30	1,8/37,4	133,0/46,8	1,9/3,3	0,048/0,070	- / 0,53 · 10 <sup>-3</sup>
№ 3	3,1/48	155/109	113/51	0,17/0,35	2,0/41,4	126,3/49,9	2,0/3,2	0,046/0,057	- / 0,51 · 10 <sup>-3</sup>
№ 4	2,1/50	153/112	61/30	0,22/0,39	2,3/62,0	69,5/28,9	2,0/3,2	0,065/0,088	- / 0,49 · 10 <sup>-3</sup>
№ 5	4,4/59	157/111	95/49	0,16/0,31	2,2/32,4	104,5/47,1	2,0/3,2	0,058/0,068	- / 0,47 · 10 <sup>-3</sup>
№ 6	3,7/56	148/103	96/40	0,13/0,31	2,5/35,6	108,2/33,5	2,1/4,0	0,071/0,096	- / 0,46 · 10 <sup>-3</sup>

стойкости АИ возрастали более чем в два раза при шлифовании кругом из 24А и более чем в 13 раз при обработке кругом из 64С.

Как видно из приведенных данных, состав № 5 по достигаемой величине периода стойкости имеет некоторое преимущество по сравнению с составом № 6. Эффект повышения стойкости круга при использовании продукта ПОА-2м можно объяснить локальным выпадением полимера из раствора в зоне обработки и образованием молекулярного защитного слоя между поверхностью круга и детали [20].

Однако подача в зону шлифования состава № 6 обеспечивает меньшую интенсивность изнашивания рабочей поверхности абразивных кругов, о чем свидетельствуют большие значения коэффициента шлифования (см. табл. 1). При оценке технологической эффективности по коэффициентам  $K_p$  и  $K_m$  также выявляются преимущества состава № 6. По параметру  $Ra$  и интенсивности засаливания кругов  $C_3$  составы № 5 и 6 обеспечивали близкие значения.

Очевидно, для практических целей оценка СОЖ по одному критерию неприемлема, а по нескольким критериям одновременно затруднен выбор рационального состава жидкости. Затруднения можно избежать, если использовать рей-

тинговый метод оценки результатов испытаний [24]. В табл. 2 представлены результаты оценки испытаний при ранжировании составов СОЖ по важнейшим критериям: периоду  $T$  стойкости круга, коэффициентам шлифования по объему  $K_{ш}$  и комплексному критерию  $K_m$ , характеризующим силовую напряженность процесса, производительность и шероховатость шлифованных поверхностей. Число баллов, характеризующее каждый критерий, равно единице для состава, имеющего по данному критерию наименьшую технологическую эффективность и максимальное значение для СОЖ, показавшей лучшие результаты.

Из табл. 2 видно, что при шлифовании покрытия ПВ кругом из 24А к лучшей СОЖ относится эмульсол ЭПМ-1ш (17 баллов), а при обработке этим же кругом покрытия ПЖ наибольшую технологическую эффективность показали составы № 5 и 6 (16 баллов).

При шлифовании покрытия ПВ кругом из 64С (см. табл. 2) максимальное число баллов имеет состав № 6 (16 баллов), а шлифование покрытия ПЖ этим же инструментом наиболее эффективно при использовании состава № 4 (15 баллов).

Таблица 2

**Рейтинговая оценка различных СОЖ при шлифовании плазменных покрытий**

Составы СОЖ	Число баллов, характеризующих критерии			Суммарное число баллов
	Период стойкости $K_T$	Износ круга $K_{кш}$	Силовая напряженность и качество $K_{км}$	
<i>Результаты, полученные для покрытий на никелевой (числитель) и железной (знаменатель) основе при шлифовании кругом 24AF46N6V</i>				
№ 1	1/2	1/2	2/1	4/5
№ 2	3/3	2/4	1/3	6/10
№ 3	4/4	3/2	3/2	10/8
№ 4	2/1	5/2	4/5	11/8
№ 5	6/6	4/6	5/4	15/16
№ 6	5/5	6/5	6/6	17/16
<i>Результаты, полученные для покрытий на никелевой (числитель) и железной (знаменатель) основе при шлифовании кругом 64CF46N6V</i>				
№ 1	1/1	1/1	6/4	8/6
№ 2	3/2	2/4	2/3	7/9
№ 3	4/3	3/5	1/1	8/9
№ 4	2/4	5/6	4/5	11/15
№ 5	6/6	4/2	3/2	13/10
№ 6	5/5	6/3	5/6	16/14

Ранговый критерий оценки можно использовать также и для выбора универсальных СОЖ, предназначенных для шлифования плазменных покрытий различных типов кругами из электрокорундов и карбидов кремния (табл. 3).

Видно, что для шлифования плазменных покрытий на никелевой основе кругами из 24А и

64С наиболее эффективным оказался состав № 6 (33 балла), затем состав № 5 (28) и состав № 4 (22). При шлифовании плазменных покрытий на железной основе лучшие результаты также у состава №6 (30 баллов), далее состав № 5 (26) и состав № 4 (23).

Таблица 3

Ранговый критерий оценки для выбора универсальной СОЖ

Составы СОЖ	Суммарное число баллов при обработке плазменных покрытий		
	На никелевой основе	На железной основе	Из обоих испытанных покрытий кругами из 24А и 64С
№1	12	11	23
№2	13	19	32
№3	18	17	35
№4	22	23	45
№5	28	26	54
№6	33	30	63

### Выводы

1. Комплексная оценка результатов испытаний по рейтинговому методу показала, что обработка всухую с использованием водопроводной воды, 4 %-го водного раствора фосфата калия, а также масла индустриального не обеспечивает достаточной технологической эффективности при круглом наружном шлифовании с продольной подачей микропористых покрытий на никелевой и железной основе.

2. Наиболее эффективной СОЖ для шлифования микропористых покрытий на никелевой и железной основе кругами из электрокорундов и карбидов кремния в рассмотренных условиях обработки является 3 %-й водный раствор эмульсола «ЭПМ-1ш». Хорошие результаты получены также при использовании 3 %-го водного раствора концентрата ПОА-2м.

### Список литературы

1. Черноиванов В.И., Лялякин В.П. Организация и технология восстановления деталей машин. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: ГосНИТИ, 2003. – 488 с.
2. Киселев Е.С. Теплофизика правки шлифовальных кругов с применением СОЖ. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2001. – 184 с.
3. Худобин Л.В. Пути совершенствования технологии шлифования. – Саратов: Приволжское книжное издательство, 1969. – 213 с.

4. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С.С. Силин, В.А. Хрульков, А.В. Лобанов, Н.С. Рыкунов. – М.: Машиностроение, 1984. – 64 с.

5. Friemuth Th., Lierse T. Electro-contact discharge dressing (ECDD) of diamond wheels // IDR. Industrial diamond review. – 1998. – Vol. 58, N 577. – P. 57–61.

6. Hukuzo J., Hiroshi K. Method for dressing a grinding wheel // Numazu kogyo koto senmon gakko kenkyu hokoku = Numazu College of Technology Research Annual. – 1994. – N 39. – P. 81–92.

7. Yamaguchi K., Horaguchi I., Sato J. Grinding with directionally aligned SiC whisker wheel-loading-free grinding // Precision Engineering. – 1998. – Vol. 22, iss. 2. – P. 59–65. – doi: 10.1016/S0141-6359(97)00087-1.

8. Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с. – (Библиотека технолога).

9. Кащеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 214 с.

10. Kozo A., Yasunaga N. In-process dressing of resin bonded diamond wheel // Kikai to Kody = Tool Engineering. – 1991. – Vol. 35, N 12. – P. 49–54.

11. Худобин Л.В., Унянин А.Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / под ред. Л.В. Худобина. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2007. – 298 с.

12. Кащук В.А., Верещагин А.Б. Справочник шлифовщика. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.

13. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием:

справочник / под общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.

14. *Носенко В.А.* Шлифование адгезионно-активных металлов. – М.: Машиностроение, 2000. – 262 с.

15. *Правиков Ю.М.* Повышение эффективности операций шлифования путем снижения засаливания рабочей поверхности шлифовального круга (на примере шлифования заготовок из алюминиевых сплавов): дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Ульяновский политехнический институт. – Ульяновск, 1982. – 244 с.

16. *Худобин Л.В., Белов М.А.* Шлифование заготовок из коррозионно-стойких сталей с применением СОЖ. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1989. – 148 с.

17. *Казаков С.Н.* Выбор СОЖ и метода правки абразивного круга для врезного предварительного шлифования валов с плазменными покрытиями // Машиностроение: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Белорусский национальный технический университет. – Минск: Технопринт, 1980. – № 14. – С. 58–62.

18. Совершенствование процесса шлифования износостойких покрытий / П.И. Ящерицын, С.Н. Казаков, С.И. Миткевич, А.И. Белицкая // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента: межвузовский сборник научных трудов / Пензенский политехнический институт. – Пенза: Изд-во ППИ, 1986. – Вып. 14. – С. 3–8.

19. Выбор смазочно-охлаждающей жидкости для шлифования плазменных покрытий на железной основе / Р.Ф. Мустафаев, Н.С. Алексеев, В.А. Капорин,

А.В. Рязанов, С.В. Иванов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 4. – С. 28–30.

20. *Смагин Г.И., Яковлев Н.Д., Мустафаев Р.Ф.* Эффективность новой смазывающе-охлаждающей жидкости на основе водорастворимого полимера // Оборудование и технология машиностроительного производства: межвузовский сборник научных трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1996. – Вып. 2. – С. 55–60.

21. *Носенко В.А., Саютин Г.А.* Роль охлаждающих свойств среды в изнашивании абразива // Абразивы: научно-технический реферативный сборник. – М.: НИИМАШ, 1979. – № 3. – С. 6–7.

22. *Алексеев Н.С., Иванов С.В., Капорин В.А.* Шлифование плазменных покрытий на никелевой и железной основе // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: в 2 ч.: ч. 1: материалы 16 международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 181–187.

23. Износ инструмента из эльбора в различных средах при шлифовании титановых сплавов / Г.И. Саютин, В.А. Носенко, Г.А. Мельников, Н.И. Богомолов // Абразивы: научно-технический реферативный сборник. – М.: НИИМАШ, 1975. – № 6. – С. 46–49.

24. Современные смазочно-охлаждающие жидкости / Е.С. Киселев, А.Н. Унянин, З.С. Курзанова, М.А. Кузнецова // Вестник машиностроения. – 1996. – № 7. – С. 30–34.

## OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(67), April – June 2015, Pages 6–16

### Efficiency of microporous coatings grinding using coolant

**Alexeev N. S.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: tm@rubinst.ru

**Kaporin V. A.**, Engineer, e-mail: kaporinvl@mail.ru

**Ivanov S. V.**, Engineer, e-mail: vitsal\_72@mail.ru

Rubtsovsk Industrial Institute, Branch of I.I. Polzunov Altai State Technical University, 2/6 Traktornaya st., Rubtsovsk, 658207, Russian Federation

#### Abstract

Wear-resistant microporous coatings on nickel and iron base falls into the category of hard materials, which abrasive treatment is associated with considerable difficulties. The main causes of intractability of these coatings by grinding lie in the rapid loss of cutting properties of the abrasive wheel, due to wear, bluntness and active adhesion of the coating on the working surface of the tool. The results of investigations of the cutting ability of wheels made of aluminum oxide and silicon carbide in microporous coatings grinding without coolant (without coolant), using tap water and oil are presented in the article. The wear of the abrasive grains and the nature of their interaction with the material being processed depending on the composition of the coolant are studied. Ways to improve the efficiency



of the grinding process of microporous coatings by applying a chemically active media that can reduce interaction between coatings and abrasive materials are suggested. New coolants with chemically active substances, passivating the surface of microporous coatings on the round outer grinding operations are tested.

A proposal about feasibility of replacing the oil compositions of cutting fluids on aqueous compositions that allow to increase the processing capacity and durability of wheels made of aluminum oxide and silicon carbide, while reducing the height of the microscopic inequalities in comparison with the oil compositions is put. Comprehensive assessment of test results by the rating method showed that the most effective in the round external grinding of microporous coatings on nickel and iron-based is the aqueous solution of emulsol "EPM - 1sh."

### Keywords:

plasma coatings, abrasive treatment, coolants and lubricants, grinding wheels, cutting forces, tool degradation, surface roughness.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-6-16

### References

1. Chernoiivanov V.I., Lyalyakin V.P. *Organizatsiya i tekhnologiya vosstanovleniya detalei mashin* [Organization and recovery technology of machines details]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, GosNITI Publ., 2003. 488 p.
2. Kiselev E.S. *Teplofizika pravki shlifoval'nykh krugov s primeneniem SOZh* [Thermal physics grinding wheel dressing with coolant]. Ul'yanovsk, UIGTU Publ., 2001. 184 p.
3. Khudobin L.V. *Puti sovershenstvovaniya tekhnologii shlifovaniya* [Ways to improve grinding technology]. Saratov, Privolzhskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1969. 213 p.
4. Silin S.S., Khrul'kov V.A., Lobanov A.V., Rykunov N.S. *Glubinnoe shlifovanie detalei iz trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Deep grinding parts from hard materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 64 p.
5. Friemuth Th., Lierse T. Electro-contact discharge dressing (ECDD) of diamond wheels. *IDR. Industrial diamond review*, 1998, vol. 58, no. 577, pp. 57–61.
6. Hukuzo J., Hiroshi K. Method for dressing a grinding wheel. *Numazu College of Technology Research Annual*, 1994, no. 39, pp. 81–92.
7. Yamaguchi K., Horaguchi I., Sato Y. Grinding with directionally aligned sic whisker wheel-loading-free grinding. *Precision Engineering*, 1998, vol. 22, iss. 2, pp. 59–65. doi: 10.1016/S0141-6359(97)00087-1
8. Popov S.A., Malevskii N.P., Tereshchenko L.M. *Almazno-abrazivnaya obrabotka metallov i tverdykh splavov* [Diamond-abrasive treatment of metals and hard alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 263 p.
9. Kashcheev V.N. *Protsessy v zone friktsionnogo kontakta metallov* [Processes in the area of frictional contact metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 214 p.
10. Kozo A., Yasunaga N. In-process dressing of resin bonded diamond wheel. *Tool Engineering*, 1991, vol. 35, no. 12, pp. 49–54.
11. Khudobin L.V., Unyanin A.N. *Minimizatsiya zasalivaniya shlifoval'nykh krugov* [Minimization of clogging grinding wheels]. Ul'yanovsk, UIGTU Publ., 2007. 298 p.
12. Kashchuk V.A., Vereshchagin A.B. *Spravochnik shlifovshchika* [Directory grinder]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 480 p.
13. Khudobin L.V. *Smazochno-okhlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva i ikh primeneniye pri obrabotke rezaniem* [Lubricating and cooling technology tools and their use in machining]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 544 p. ISBN 5-217-03328-2
14. Nosenko V.A. *Shlifovanie adgezionno-aktivnykh metallov* [Grinding of the Adhesive and Active Metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 262 p.
15. Pravikov Yu.M. *Povysheniye effektivnosti operatsii shlifovaniya putem snizheniya zasalivaniya rabochei poverkhnosti shlifoval'nogo kruga (na primere shlifovaniya zagotovok iz alyuminiyevykh splavov)*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of grinding operations by reducing clogging of the working surface of the grinding wheel (for example, grinding workpieces of aluminum alloys). PhD eng. sci. diss.]. Ul'yanovsk, 1982. 244 p.
16. Khudobin L.V., Belov M.A. *Shlifovanie zagotovok iz korrozionnostoikikh staley s primeneniem SOZh* [Grinding workpieces of corrosion resistant steels with coolant]. Saratov, SGU Publ., 1989. 148 p.
17. Kazakov S.N. [Selection of coolant and abrasive wheel dressing method for pre-plunge grinding rollers with plasma coatings]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "Mashinostroenie"* [Republican interdepartmental collection of scientific works of

the Belarusian National Technical University “Mechanical Engineering”]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 1980, no. 14, pp. 58–62.

18. Yashcheritsyn P.I., Kazakov S.N., Mitkevich S.I., Belitskaya A.I. [Improving the process of grinding wear-resistant coatings]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov “Almaznaya i abrazivnaya obrabotka detalei mashin i instrumenta”* [Interuniversity proceedings “Diamond and abrasion of machine parts and tools”], Penza, PPI Publ., 1986, iss. 14, pp. 3–8. (In Russian)

19. Mustafaev R.F., Alekseev N.S., Kaporin V.A., Ryazanov A.V., Ivanov S.V. Vybor smazochno-okhlazhdayushchei zhidkosti dlya shlifovaniya plazmennyykh pokrytii na zheleznoi osnove [The selection of lubricant – coolants for grinding iron-based plasma coatings]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2012, no. 4 (57), pp. 28–30.

20. Smagin G.I., Yakovlev N.D., Mustafaev R.F. [The effectiveness of the new cooling lubricants based on water-soluble polymer]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov “Oborudovanie i tekhnologiya mashinostroitel’nogo proizvodstva”* [Interuniversity proceedings “Equipment and technology of machine-building production”], Novosibirsk, NSTU Publ., 1996, iss. 2, pp. 55–60. (In Russian)

21. Nosenko V.A., Sayutin G.A. [The role of the cooling properties of the medium in abrasive wear]. *Nauchno-tekhnicheskii referativnyi sbornik «Abrazivy»* [Scientific and technical abstract collection “Abrasives”], Moscow, NIIMASH Publ., 1979, no. 3, pp. 6–7. (In Russian)

22. Alekseev N.S., Ivanov S.V., Kaporin V.A. [Grinding plasma coatings on nickel and iron base]. *Materialy 16 Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Tekhnologii uprochneniya, nanoseniya pokrytii i remonta: teoriya i praktika”*. V 2 ch. Ch. 1 [Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Conference “Hardening, coating and repair technologies: Theory and Practice”, Saint Petersburg, 15–18 April 2014: in 2 pt.]. Saint Petersburg, SPbPU Publ., 2014, pt. 1, pp. 181–187. (In Russian)

23. Sayutin G.I., Nosenko V.A., Mel’nikov G.A., Bogomolov N.I. [Tool wear of CBN in various media for grinding titanium alloys]. *Nauchno-tekhnicheskii referativnyi sbornik «Abrazivy»* [Scientific and technical abstract collection “Abrasives”], Moscow, NIIMASH Publ., 1975, no. 6, pp. 46–49. (In Russian)

24. Kiselev E.S., Unyanin A.N., Kurzanova Z.S., Kuznetsova M.A. Sovremennye smazochno-okhlazhdayushchie zhidkosti [Modern coolants]. *Vestnik mashinostroeniya – Russian Engineering Research*, 1996, no. 7, pp. 30–34.

Received 11 March 2015

Revised 11 April 2015

Accepted 4 May 2015

# УПРОЧНЕНИЕ ФРИКЦИОННОГО КЛИНА ВАГОННОЙ ТЕЛЕЖКИ

*В.Г. ЩУКИН, канд. физ.-мат. наук*  
*В.В. МАРУСИН, доктор физ.-мат. наук, профессор*  
*(ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск)*

Поступила 11 марта 2015

Рецензирование 11 апреля 2015

Принята к печати 4 мая 2015

**Марусин В.В.** – 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1,  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
e-mail: marusin@itam.nsc.ru

Разработан технологический процесс упрочнения клина вагонной тележки, изготовленного из серого чугуна марки СЧ18, с помощью высокоэнергетической индукционной обработки. Источником энергии служит высокочастотный генератор ВЧГ 5-60/0,066 мощностью 60 кВт. Процесс упрочнения включает в себя индукционный нагрев вертикальной поверхности клина и последующую закалку при полной водяной завесе зоны нагрева. Толщина упрочненного слоя с твердостью выше 57 HRC достигает 3,5 мм. По разработанной технологии произведена опытная партия изделий, которая успешно прошла ходовые ресурсные испытания на испытательном полигоне железнодорожного транспорта в г. Щербинка. В ходе испытаний при нормативном пробеге не менее 500 тыс. км фактический пробег составил более 1 млн км. При этом допускаемые величины износа фрикционных клиньев не превышены, а коэффициент относительного трения фрикционных гасителей колебаний соответствует нормативу.

**Ключевые слова:** высокоэнергетический индукционный нагрев, клин вагонной тележки, упрочнение.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-17-23

## Введение

Фрикционный клин узла гашения колебаний тележки грузового вагона является важнейшим элементом конструкции, от работоспособности которого зависит длительность безремонтной эксплуатации подвижного состава [1]. Исследования, направленные на совершенствование тележек грузовых вагонов и их компонентов, являются актуальными и вытекают из первоочередных задач, стоящих перед железнодорожным транспортом. Базовая конструкция этих узлов практически остается неизменной в течение последних десятилетий [2, 3]. Задача повышения износостойкости рабочей поверхности фрикционного носителя колебаний (клина) тележек вагонов является актуальной и обеспечивает резкое повышение ресурса работы вагона в целом.

Основное внимание исследователей направлено на разработку новых материалов путем оптимизации химического состава, улучшение фи-

зико-механических и трибологических свойств, совершенствование конструкции, а также прогнозирование работы фрикционного клина узла гашения колебаний в различных условиях эксплуатации [4].

Неудовлетворительная эксплуатационная стойкость рабочих поверхностей фрикционных клиньев, изготовленных из серых чугунов (марок СЧ18, СЧ25, СЧ35), связана в первую очередь с их недостаточной твердостью. В связи с этим внимание специалистов направлено на несколько путей решения задачи повышения эксплуатационной стойкости.

1. Изготовление всего клина из материалов с повышенной твердостью.

2. Упрочнение рабочих поверхностей клина.

3. Комбинированные методы, объединяющие способы п. 1 и 2.

Так, рядом авторов предлагается замена основного материала клина на высокопрочные чугуны с шаровидным графитом (ВЧ60, ВЧ70 и

др. [5, 6]) либо на легированный никелем и молибденом чугун марки ЧМН-35М [7–9]. Наиболее широко известны технологии изготовления клиньев из высокопрочных чугунов с шаровидным графитом (ВЧ60, ВЧ70 и др.). Технология их производства включает в себя стадии изотермической закалки в соляном растворе и последующее охлаждение в щелочных растворах, что приводит к удорожанию клиньев в 5–7 раз. К тому же процесс закалки в расплаве селитры небезопасен и вреден для здоровья.

В последнее время разработана технология объемно-поверхностной закалки рабочих поверхностей фрикционного клина, изготовленных как из серых чугунов СЧ25, СЧ35, так и легированной стали 20ГЛ [9, 10]. Технология состоит из нагрева клина в объемных печах с последующим охлаждением стенок клина потоком воды и обеспечивает за один цикл нагрева и охлаждения упрочнение вертикальной и наклонной фрикционных поверхностей. Отсутствие газовых атмосфер и масла делает процесс упрочнения экологически чистым в отличие от традиционных технологий, включая и изотермическую закалку. Недостатками данных технологий являются многостадийность процессов, высокая себестоимость высокопрочных чугунов и энергоемкость процессов как изотермической, так и объемно-поверхностной закалки.

Поэтому перспективным выглядит переход к упрочнению только поверхностного слоя рабочих поверхностей клина, изготовленного из традиционных материалов [11, 12]. Так, в [12] отмечается значительное повышение износа клиньев, изготовленных из СЧ25 и ВЧ60 после их плазменной закалки. Недостатки как плазменной, так и лазерной закалки связаны с ограничениями на глубину прогрева материала и неравномерностью прогрева по глубине. Этих недостатков лишены методы индукционного упрочнения, при которых энерговыделение происходит в объеме скин-слоя металла (сплава).

Цель данной работы – отработка технологического процесса упрочнения вертикальной поверхности клина методом одностадийной высокоэнергетической индукционной закалки (ВИЗ) на твердость не менее 55 HRC и на глубину не менее 3 мм. Специфика и особенности ВИЗ рассмотрены в [13]. Клин изготовлен из серого чугуна марки СЧ18 ГОСТ 1412–85, размеры

упрочняемой поверхности – 190×178 мм. Чертеж клина представлен на рис. 1.

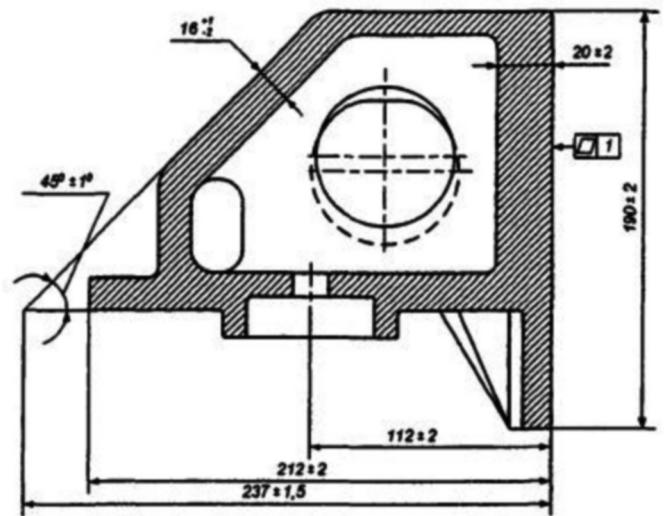


Рис. 1. Схема фрикционного клина (чертеж М1698.00.002)

## 1. Методика экспериментального исследования

Для реализации процесса использовалось следующее оборудование.

1. Высокочастотный генератор ВЧГ 5-60/0,066, имеющий мощность до 60 кВт и рабочую частоту 66 кГц.

2. Индуктор для закалки, изготовленный в виде петли из медной трубки наружным диаметром 10 мм, толщина стенки 1 мм (рис. 2). На верхней трубке индуктора по образующей припаян медный брусок сечением 5×5 мм и длиной 90 мм (длина рабочей зоны индуктора), здесь же закреплен плотный ряд ферритовых концентраторов энергии электромагнитного поля. Последние изготавливаются из ферритовых колец толщиной 5 мм с внутренним диаметром каждого кольца 10 мм и наружным диаметром 20 мм, тип ферритов – М3000 НМ-А128. На нижней трубке индуктора расположен ряд отверстий для создания водяной плоской струи и охлаждения закаленной зоны клина. Рабочее положение трубок индуктора – в вертикальной плоскости, упрочняемая поверхность клина перемещается относительно рабочей зоны индуктора (зоны нагрева) снизу вверх. Индуктор охлаждается проточной водой, жестко закреплен на выходных клеммах высокочастотного (ВЧ) генератора под болт для исключения вибраций, ведущих к появлению разбросов значений твердости закаленного слоя.

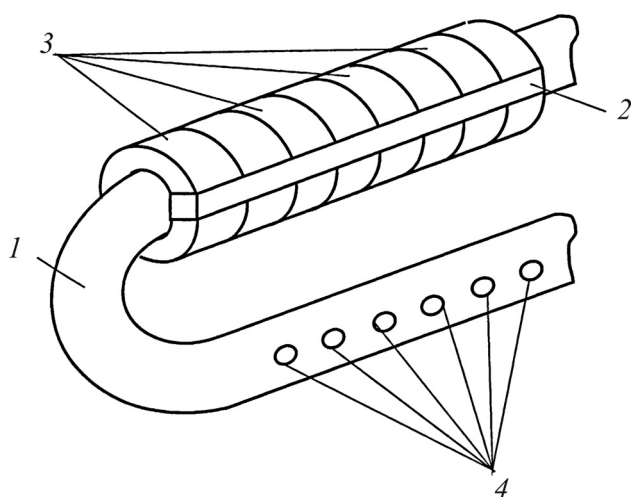


Рис. 2. Схема индуктора:

1 – медная трубка; 2 – медный брусок; 3 – набор ферритовых колец; 4 – отверстия для подачи струй водоохлаждающего агента

3. Манипулятор для вертикального закрепления клина и его перемещения с заданной скоростью, имеющий основные блоки: узел закрепления клина на специальном столе, привод для вертикального перемещения стола, устройство для сбора отработанной воды и ее слива в оборотный водяной контур цеха.

## 2. Результаты и обсуждение

При отработке технологического процесса упрочнения был разработан и испытан ряд различных конструкций индукторов, отличающихся длиной рабочей зоны и сечением медного бруска. опыты показали, что при использовании индуктора с удвоенной длиной рабочей зоны 180 мм закалка рабочей поверхности клина за один проход неосуществима из-за недостаточной удельной мощности даже при максимальной мощности ВЧ-генератора 60 кВт.

Вследствие этого был разработан двухпроходный процесс ВИЗ рабочей поверхности клина. При его отработке был оптимизирован ряд базовых параметров процесса – удельная мощность процесса ВИЗ, скорость протяжки клина, зазор «индуктор – поверхность клина». Отработка процесса проводилась следующим образом: клин фиксировался на манипуляторе, производился нагрев и закалка рабочей поверхности клина при заданном режиме обработки.

Фотография манипулятора вместе с закрепленным на столе клином и индуктором пред-

ставлена на рис. 3. Ясно видно яркое свечение в зазоре «индуктор – упрочняемая поверхность клина» по всей длине рабочей зоны индуктора. Затем проводилась резка клина с гидроабразивом, изготовление нормальных шлифов, их шлифовка и алмазная доводка, травление и измерение глубины упрочненного слоя и его твердости. Приборы для измерения твердости – калиброванные микротвердомер ПМТ-3 и твердомер «Супер-Роквелл».



Рис. 3. Фотография процесса закалки клина

При отработке технологического процесса были выявлены две основные проблемы.

1. Образование на упрочняемой поверхности обезуглероженного слоя глубиной до 1 мм.

2. Опасность подплава поверхности клина при нагреве вследствие существенного сдвига критических температур при очень высоких скоростях нагрева.

Первая проблема была решена путем оптимизации времени нагрева каждого участка упрочняемой поверхности таким образом, чтобы при этом прошло диффузионное выравнивание углерода в закаленном слое. Вторая проблема была решена путем оптимизации удельной мощности и выбора режима закалки при полной водяной завесе зоны нагрева.

Оптимальные режимы закалки и соответствующие характеристики закаленного слоя приведены в таблице.

По отработанной технологии [14] была произведена опытная партия изделий, которая успешно прошла ходовые ресурсные испытания на полигоне в г. Щербинка. В ходе испытаний

**Режимы закалки и характеристики закаленного слоя**

Оптимальные режимы закалки		Характеристики закаленного слоя	
Выходная мощность, кВт	55	Твердость закаленного слоя (по 10 измерениям)	57...60 HRC
Удельная мощность, кВт/см <sup>2</sup>	8...10	Толщина закаленного слоя, мм	3...3,5
Скорость перемещения рабочей поверхности клина, мм/с	5...6	Структура закаленного слоя	Мартенсит закалки («белый слой»)
Зазор между индуктором и поверхностью клина, мм	1...1,5		
Рабочая длина зоны закалки, мм	90		

при нормативном пробеге не менее 500 тыс. км фактический пробег составил более 1 млн км. При этом допускаемые величины износа фрикционных клиньев не превышены, а коэффициент относительного трения фрикционных гасителей колебаний соответствует нормативу.

В России и в мире выпускаются промышленные ВЧ-генераторы для технологических целей со следующими разрешенными рабочими частотами: 0,066; 0,440; 1,76; 5,28; 13,5; 27 и 40 МГц [15] и мощностью 30, 60, 100, 160 и 250 кВт. Для создания промышленной установки оптимален ВЧ-генератор типа ВЧГ-Х-160/0,066 с запасом по мощности (где Х = 5...9 – выпускаемые пригодные модификации этого типа ВЧ-генераторов). Следует особо подчеркнуть, что для оптимального согласования сопротивлений выходного контура генератора и индуктора в каждом случае необходима доработка генератора.

Расход охлаждающей воды при работе ВЧ-генератора достаточно велик – от 2 до 3 м<sup>3</sup>/ч, поэтому целесообразен собственный контур оборотной воды. Принципиальная схема такого контура приводится в технической документации к каждому ВЧ-генератору. Манипулятор для промышленной установки должен быть автоматизирован для высокой надежности и воспроизводимости процесса обработки. Длительность процесса собственно упрочнения рабочей поверхности клина при мощности ВЧ-генератора 160 кВт в один проход лежит в интервале от 30 до 35 с, что много меньше межоперационного времени, расходуемого на съём клина с манипулятора и последующую установку на манипулятор и юстировку следующего клина. Требуется механизация этих межоперационных операций. Она позволит затрачивать на обработку одного клина не более одной минуты (полное опера-

ционное время), вследствие чего производительность процесса закалки может составить 60 деталей/ч. Необходимая рабочая площадь для одной промышленной установки с учетом подсобных стеллажей для доставки партий исходных деталей и промежуточного складирования упрочненных клиньев, а также требований техники безопасности – не более 30 м<sup>2</sup>. Стоимость оборудования для промышленной установки определяется в основном ценой высокочастотного генератора.

### Выводы

Разработан одностадийный технологический процесс упрочнения рабочей поверхности фрикционного гасителя колебаний (клина) вагонной тележки, обеспечивающий глубину упрочненного слоя не менее 3 мм при твердости более 57 HRC. Клин изготовлен из обычного серого чугуна марки СЧ18. Испытания партии клиньев в производственных условиях показали соответствие качества изделий нормативам.

### Список литературы

1. *Габец А.В.* Исследование прочности различных модификаций фрикционных клиньев тележки грузового вагона // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4–2. – С. 44–49.
2. *Brenner H., Bartalini L., Antunes A.* Numerical investigation on the friction wedge damper dynamics – a comparative study [Electronic resource] // Proceedings of 20th International Congress Mechanical Engineering (COBEM 2009), November 15–20, 2009. – Gramado, Rio Grande do Sul, Brasil, 2009. – URL: <http://www.abcm.org.br/anais/cobem/2009/pdf/COB09-2008.pdf> (accessed: 11.03.2015).
3. *Hawthorne V.T.* Recent improvements to three-piece trucks // Proceedings of the 1996 ASME/IEEE

Joint Railroad Conference, Oakbrook, Illinois, 30 April–2 May 1996. – Piscataway, New Jersey: IEEE, 1996. – P. 151–161. – doi: 10.1109/RRCON.1996.507974.

4. *Габец А.В.* Разработка состава и технологии получения специального модифицированного чугуна повышенной эксплуатационной стойкости для фрикционных узлов подвижного состава железнодорожного транспорта: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2014. – 27 с.

5. *Великанов А.В., Борщ Б.В.* Фрикционные клинья из высокопрочного чугуна // Вестник ВНИИЖТ. – 2007. – № 2. – С. 18–22.

6. Технология производства, качество и работоспособность закаленных фрикционных клиньев из высокопрочного чугуна / А.В. Великанов, Б.В. Борщ, В.М. Федин, А.И. Борщ, Б.И. Юрьева // Вестник ВНИИЖТ. – 2007. – № 5. – С. 19–24.

7. Совершенствование материала для фрикционного клина узла гашения колебаний тележки грузового вагона / А.В. Габец, А.В. Сухов, М.В. Сапетов, Г.А. Филиппов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2014. – № 1. – С. 91–97.

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

9. *Федин В.М., Борщ А.И., Мухамадшоев Ф.* Обоснование применения в качестве конструкционного материала чугуна или стали для фрикционных клиньев тележки грузового вагона // Вектор транспорта: научно-практический альманах. – М.: НП ОЖДПС, 2014. – № 2. – С. 62–65.

10. Упрочнение фрикционного клина из серого чугуна объемно-поверхностной закалкой / А.Ф. Бондаренко, А.А. Гореньков, В.М. Федин, А.И. Борщ // Вестник ВНИИЖТ. – 2010. – № 3. – С. 40–42.

11. *Спирidonов Н.В., Кобяков О.С., Курьянов И.Л.* Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / под ред. В.Н. Чанина. – Минск: Вышэйша школа, 1988. – 155 с.

12. *Коротков В.А.* Поверхностная плазменная закалка / Уральский федеральный университет, Нижнетагильский технологический институт (филиал). – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2012. – 64 с. – ISBN 978-5-9544-0060-1.

13. Высокоэнергетические процессы обработки материалов / О.П. Солоненко, А.П. Алхимов, В.В. Марусин, Х.М. Рахмьянов, А.М. Оришич, Р.А. Салимов, В.Г. Щукин, В.Ф. Косарев. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. – 425 с. – (Низкотемпературная плазма; т. 18). – ISBN 5-02-031528-1.

14. Патент Российская Федерация 2428487. Способ поверхностной закалки чугуна и индуктор для его осуществления, МПК<sup>8</sup> С 21 D 1/10, С 21 D 1/42, Н 05 В 6/36, С 21 D 5/00 / В.В. Марусин, П.П. Степус, А.В. Краев, С.И. Пашарин. – № 2010103091/02; заявл. 29.01.2010; опубл. 10.09.2011, Бюл. № 25. – 6 с.

15. *Головин Г.Ф., Замятнин М.М.* Высокочастотная термическая обработка: вопросы металловедения и технологии. – 3-е изд., перераб и доп. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1990. – 239 с.

## OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(67), April – June 2015, Pages 17–23

### The hardening of friction wedge of freight car bogie

**Shchukin V.G.**, Ph.D. (Physics and Mathematics), Principal Engineer, e-mail: schukin\_vg@ngs.ru

**Marusin V.V.**, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Principal Engineer, e-mail: marusin@itam.nsc.ru

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

#### Abstract

The technological process of hardening of the wedge of freight car bogie made of gray cast iron SCH18, using high-induction treatment is developed. Source of energy is presented by a high-frequency generator HFG 5-60/0.066 60 kW. Hardening process included heating of the vertical surface of the wedge and the subsequent quenching at full water screen of the heating zone. The thickness of the hardened layer with a hardness of 57 HRC is above 3.5 mm. According to the developed technology a pilot batch of products, which was successfully running endurance tests on the proof ground of rail transport in Scherbinka city, is produced. During the test a distance run was more than

1 million km while the standard run is not less than 500 thousand km. In this case, the allowable amount of wear of the friction wedges is not increased, and the coefficient of relative friction of the friction oscillation damper answered to the specifications.

### Keywords:

High-energy induction heating, friction wedge of freight car bogie, hardening

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-17-23

### References

1. Gabets A.V. Issledovanie prochnosti razlichnykh modifikatsii friktsionnykh klin'ev telezhki gruzovogo vagona [Study of strength various modifications friction wedges freight car bogie]. *Polzunovskii vestnik – Polzunov Bulletin*, 2013, no. 4–2, pp. 44–49.
2. Brenner H., Bartalini L., Antunes A. Numerical investigation on the friction wedge damper dynamics – a comparative study. Proceedings of 20th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2009). Gramado, Rio Grande do Sul, Brasil, November 15–20, 2009. Available at: <http://www.abcm.org.br/anais/cobem/2009/pdf/COB09-2008.pdf> (accessed 11.03.2015)
3. Hawthorne V.T. Recent Improvements to three-piece trucks. Proceedings of the 1996 ASME/IEEE Joint Railroad Conference, Oakbrook, Illinois, 30 April – 2 May 1996. Piscataway, New Jersey, IEEE, 1996, pp. 151–161. doi: 10.1109/RRCON.1996.507974
4. Gabets A.V. *Razrabotka sostava i tekhnologii polucheniya spetsial'nogo modifitsirovannogo chuguna povyshennoi ekspluatatsionnoi stoikosti dlya friktsionnykh uzlov podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development of composition and technology of special modified iron for increased operational stability of the friction units of railway vehicles. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2014. 27 p.
5. Velikanov A.V., Borshch B.V. Friktsionnye klin'ya iz vysokoprochnogo chuguna [Friction wedges of high-strength cast iron]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Vestnik of the All-Russia Railway Research Institute*, 2007, no. 2, pp. 18–22.
6. Velikanov A.V., Borshch B.V., Fedin V.M., Borts A.I., Yur'eva B.I. Tekhnologiya proizvodstva, kachestvo i rabotosposobnost' zakalennykh friktsionnykh klin'ev iz vysokoprochnogo chuguna [Production technology, quality and serviceability of hardened friction wedges of high-strength cast iron]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Vestnik of the All-Russia Railway Research Institute*, 2007, no. 5, pp. 19–24.
7. Gabets A.V., Sukhov A.V., Sapetov M.V., Filippov G.A. Sovershenstvovanie materiala dlya friktsionnogo klina uzla gasheniya kolebanii telezhki gruzovogo vagona [Improvement of material for the friction wedge of damping assembly of freight-car trucks]. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya – Problems of ferrous metallurgy and materials science*, 2014, no. 1, pp. 91–97.
8. Borshch B.V., Gabets A.V., Sukhov A.V., Filippov G.A. Povyshenie iznosostoikosti friktsionnykh detalei iz serogo chuguna [Increasing the wear resistance of friction grey cast iron components]. *Stal' – Steel in Translation*, 2014, no. 1, pp. 66–68. (In Russian)
9. Fedin V.M., Borts A.I., Mukhamadshoev F. [Rationale for use as a structural material of iron or steel for friction wedges freight car bogie]. *Nauchno-prakticheskii al'manakh «Vektor transporta»* [Scientific and practical almanac “Vector of transport”]. Moscow, NP OZhdPS Publ., 2014, no. 2, pp. 62–65.
10. Bondarenko A.F., Goren'kov A.A., Fedin V.M., Borts A.I. Uprochnenie friktsionnogo klina iz serogo chuguna ob'emno-poverkhnostnoi zakalkoi [Strengthening gray iron friction wedge with bulk-surface hardening]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Vestnik of the Railway Research Institute*, 2010, no. 3, pp. 40–42.
11. Spiridonov V.V., Kobyakov O.S., Kupriyanov I.L. *Plazmennye i lazernye metody uprochneniya detalei mashin* [Plasma and laser methods of hardening of machine parts]. Minsk, Vysheisha shkola Publ., 1988. 155 p.
12. Korotkov V.A. *Poverkhnostnaya plazmennaya zakalka* [The surface plasma hardening]. Nizhnii Tagil, NTI UrFU Publ., 2012. 64 p. ISBN 978-5-9544-0060-1
13. Solonenko O.P., Alkhimov A.P., Marusin V.V., Rakhimyanov Kh.M., Orishich A.M., Salimov R.A., Shchukin V.G., Kosarev V.F. *Vysokoenergeticheskie protsessy obrabotki materialov. Nizkotemperaturnaya plazma*. T. 18 [High



energy processes in machining of materials. Low-temperature plasma. Vol. 18]. Novosibirsk, Siberian Publishing House Russian Academy of Sciences "Nauka", 2000. 425 p. ISBN 5-02-031528-1

14. Marusin V.V., Stepus P.P., Kraev A.V., Pasharin S.I. *Sposob poverkhnostnoi zakalki chuguna i induktor dlya ego osushchestvleniya* [Procedure for iron surface quenching and inductor for its implementation]. Patent RF, no. 2428487, 2011.

15. Golovin G.F., Zamyatnin M.M. *Vysokochastotnaya termicheskaya obrabotka. Voprosy metallovedeniya i tekhnologii* [High-frequency heat treatment. Problems of Metallurgy and Technology]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1990. 239 p.

Received 11 March 2015

Revised 11 April 2015

Accepted 4 May 2015

# ПРОВЕРКА НА АДЕКВАТНОСТЬ МОДЕЛИ РАСТЕКАНИЯ ЧАСТИЦЫ НА ПОДЛОЖКЕ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

*Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО<sup>1</sup>, доктор техн. наук,  
чл.-корр. НАН Беларуси  
Г.Ф. ГРОМЫКО<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук,  
вед. науч. сотрудник.  
В.В. ОКОВИТЫЙ<sup>1</sup>, аспирант  
(<sup>1</sup>БНТУ, г. Минск,  
<sup>2</sup>ИМ НАН Беларуси, г. Минск)*

Поступила 6 апреля 2015  
Рецензирование 6 мая 2015  
Принята к печати 15 мая 2015

**Пантелеенко Ф.И.** – 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65,  
Белорусский национальный технический университет,  
e-mail: panteleyenkofi@mail.ru

Представлено математическое описание процесса растекания и одновременного затвердевания жидкой частицы при соударении ее с твердой поверхностью подложки и построены приближенные численные методы для расчета. Эти алгоритмы являются продолжением численных исследований по разработке приближенных методов расчета, в которых исследовались упрощенные модели для отдельных величин, таких как температура в частице, подложке, в области контакта, нахождение поля скоростей для определения формы растекшейся частицы.

Разработанная модель позволяет проводить численные эксперименты по исследованию процесса соударения отдельной капли с пространственной поверхностью и ее растекание, а также формирование структуры плазменных покрытий. Результаты исследований показывают, что численные методы являются достаточно эффективными при изучении нелинейных задач. На базе проведенных экспериментальных исследований процессов взаимодействия с подложкой и растекания на ней частиц показана адекватность разработанных теоретических зависимостей.

**Ключевые слова:** частица, моделирование, алгоритм, поля скоростей, процессы растекания и затвердевания, плазменное напыление, теплозащитные покрытия.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-24-31

## Введение

Первые работы по моделированию динамики течения жидкости с помощью основных законов сохранения принадлежат представителям Лос-Аламосской лаборатории (Harlow, Shannon) и появились впервые в 1955 г. [1]. Ими были проведены исследования только динамики растекания частицы, процессы передачи тепла в их работах не обсуждались. В дальнейшем рядом авторов были рассмотрены модели, базирующиеся на основных законах сохранения

при различных упрощениях [2–5]. В работе [6] представлено математическое описание процесса растекания и одновременного затвердевания жидкой частицы при соударении ее с твердой поверхностью подложки и построены приближенные численные методы для расчета. Эти алгоритмы являются продолжением численных исследований по разработке приближенных методов расчета [7, 9–11], в которых исследовались упрощенные модели для отдельных величин, таких как температура в частице, подложке, в области контакта, нахождение поля скоростей для

определения формы растекшейся частицы и др. Однако для описания адекватного технологического процесса по созданию покрытий этих моделей было недостаточно. При формировании покрытий появилась необходимость в качественном исследовании структуры покрытия, в частности, определение механизма образования поры и прогнозирование их появления. Поэтому возникла необходимость более детально рассмотреть растекание одиночной частицы, описать изменения ее формы от условий процесса. Такие процессы описываются нестационарными нелинейными уравнениями в частных производных гиперболического и параболического типа. Эти задачи достаточно сложны, и практически единственными методами их решения являются приближенные методы [12]. Хорошо зарекомендованных численных методов для задач со свободной поверхностью, к которым относятся рассматриваемые процессы, пока не существует. Поэтому разработка новых методов решения задач динамики жидкости со свободными границами, изменяющейся со временем и с учетом затвердевания, является актуальной [10–15].

Цель нашего исследования – разработка численного метода и алгоритма решения с учетом свободной поверхности, в котором более точно предлагается учитывать свободную поверхность расплава.

### Теория. Растекание частиц (численный эксперимент)

На основе математической модели растекания расплавленной частицы при плазменном напылении, подробно описанной в источнике [8], получены результаты моделирования процесса напыления порошка, состоящего из сферических частиц оксида циркония диаметром 20 мкм, начальной температуры 300 К, первоначальной скорости соударения 200 м/с и подложке из стали температуры 298 К. На рис. 1 приведены графики формы растекшейся частицы в различные моменты времени. На рис. 2 иллюстрируется изменение формы частицы при решении по схемам с использованием функции объема для нахождения свободной поверхности. Как видно из последних графиков, изображенных на рис. 2,

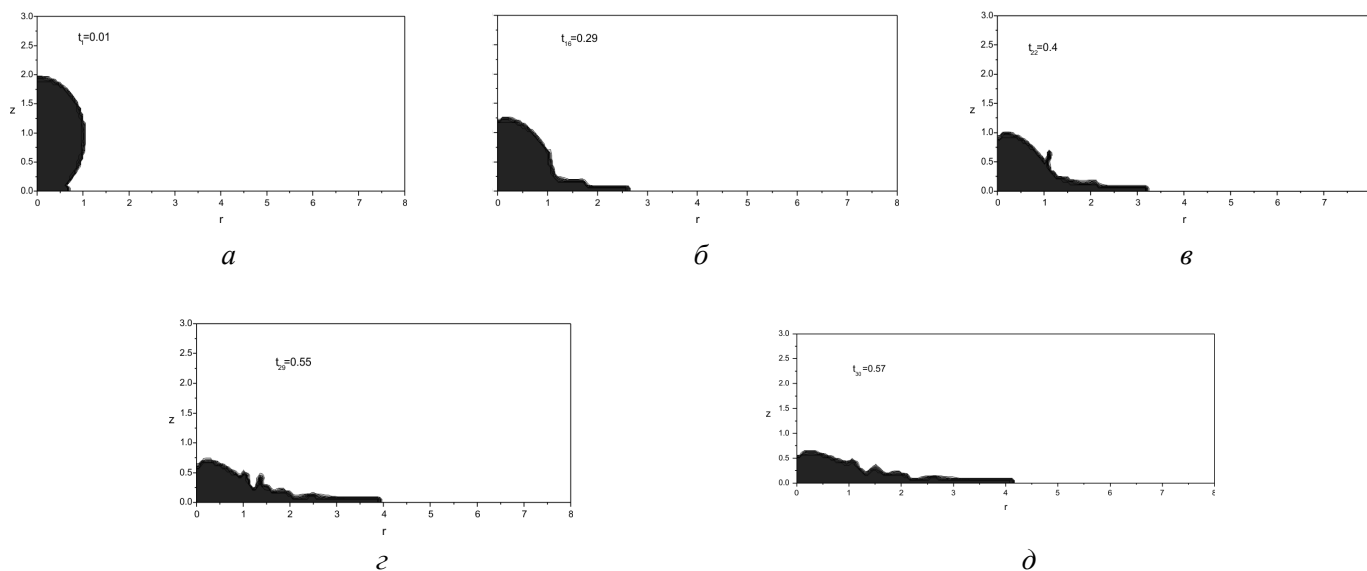


Рис. 1. Форма растекшейся частицы в различные моменты времени с использованием функции объема:

*a* – 0,01; *б* – 0,29; *в* – 0,4; *г* – 0,5; *д* – 0,57

появляется вычислительная неустойчивость, которая связана с недостаточно корректной обработкой точек свободной поверхности. На рис. 3 изображены графики формы свободной поверхности, которые основываются на более точном определении поведения жидкости в свободных ячейках с помощью введения двух маркеров в

каждой ячейке свободной поверхности, которые отслеживают ее границу. Кроме того, для каждой ячейки свободной поверхности знание координат двух маркеров в ней позволяет более точно находить нормали в точках свободной поверхности и главные кривизны, которые используются в условии Лапласа, определяю-

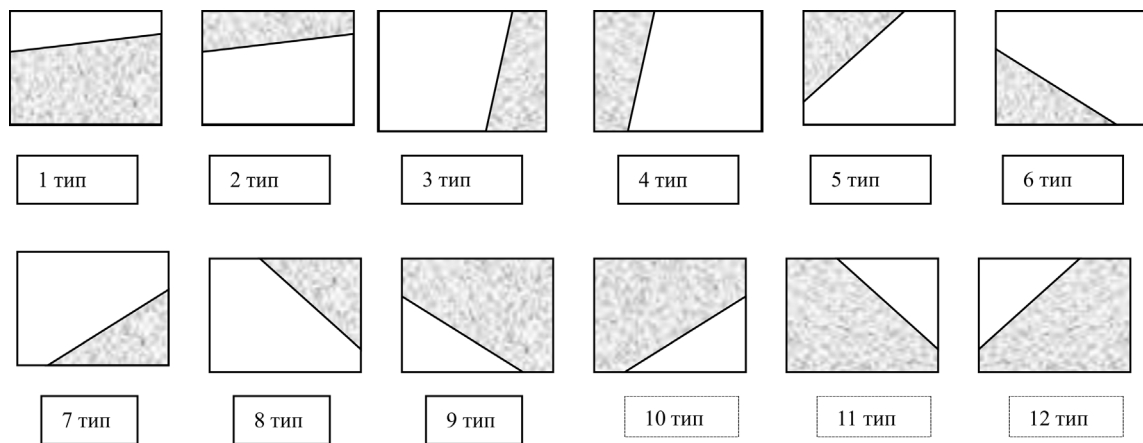


Рис. 2. Типы ячеек свободной поверхности

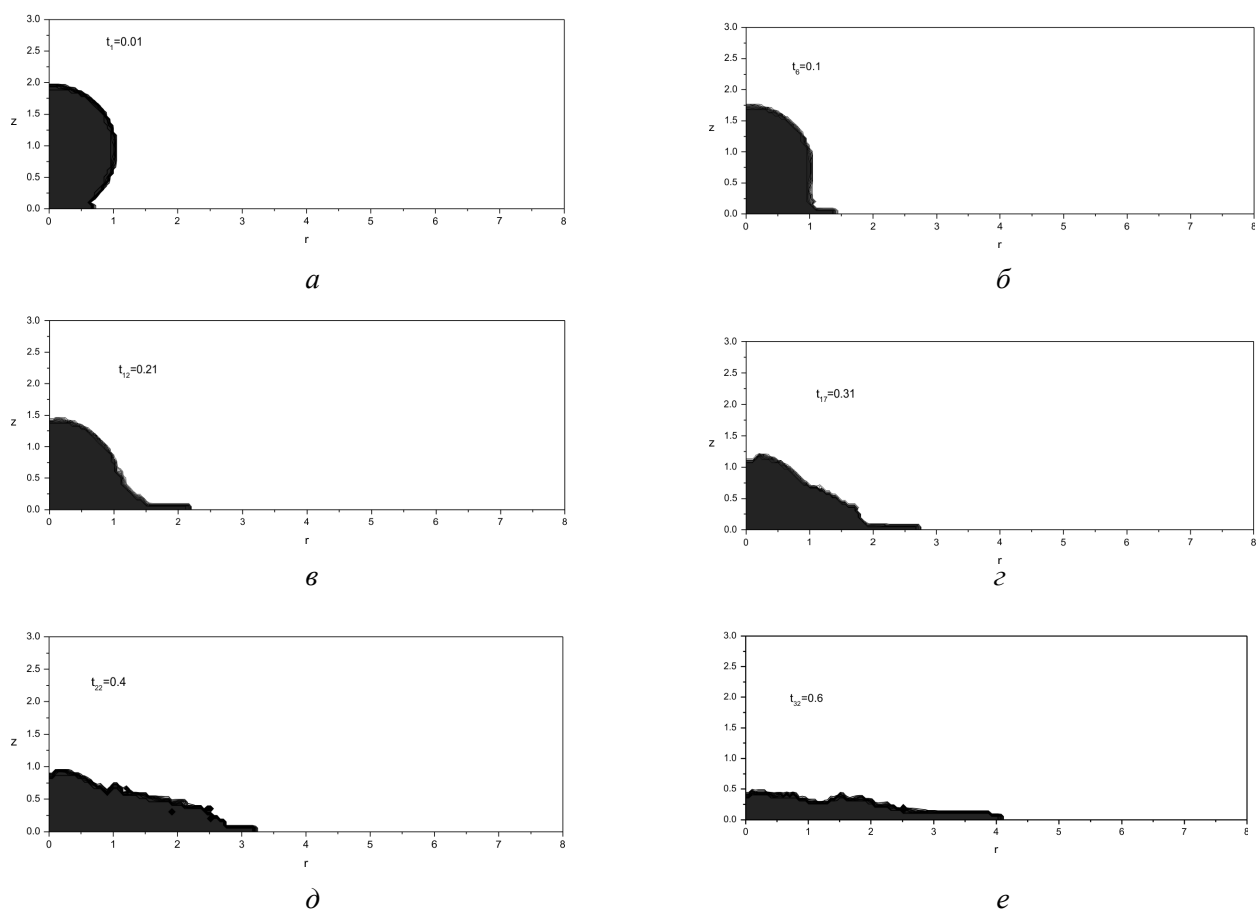


Рис. 3. Форма растекшейся частицы в различные моменты времени с использованием маркеров:

$a - 0,01$ ;  $b - 0,1$ ;  $в - 0,21$ ;  $г - 0,31$ ;  $д - 0,4$ ;  $e - 0,6$

шего границу жидкость – газ. Расчетный алгоритм рассматривает 12 типов дробных ячеек, отличающихся друг от друга видом пересечения ячейки свободной поверхностью частиц, вид которых представлен на рисунке (темные области представляют собой вещество частицы). Рассматриваемые дробные (неполные) ячейки являются отдельными ячейками сетки, обра-

зованные пересечением движущейся (лагранжевой) границы с фиксированной (эйлеровой) сеткой. Предполагая линейный характер движения вещества в ячейке, очевидно, что достаточно двух маркеров (точек), «поставленных» в точках пересечения вещества с координатными линиями сетки для описания поведения границы вещества в ячейке. Такого количества маркеров



было достаточно и для определения нормалей и радиусов кривизны в точках свободной поверхности. Нумерация (в порядке возрастания) маркеров-точек  $M_k, k = 1, 2$ , в дробных ячейках производится таким образом, чтобы область, занятая веществом в ячейке, находилась слева. Общая нумерация маркеров (в порядке возрастания)  $M_l^*, l = 1, \overline{M_N}$ , производится в порядке движения против часовой стрелки, что соответствует случаю движения, когда область, занятая веществом, находилась слева. При таком определении ясно, что  $M_l^*$  для одной дробной ячейки будет  $M_2$ , для другой  $M_1$  в зависимости от места пересечения вещества с координатной сеткой. Поэтому расчетный алгоритм рассматривает 12 типов дробных ячеек, отличающихся друг от друга видом пересечения свободной поверхности частиц ячейки сеточной области.

Для определения типа ячейки дополнительно введен признак  $m_k$  для маркера  $M_k$  (см. рис. 3, слева), по которому можно судить о нахождении маркера в ячейке:  $m_k = 1...4$  – маркер  $M_k$  находится на соответствующей стороне ячейки,  $m_k = 5$  – внутри ячейки,  $m_k = 6...9$  – в вершинах ячейки.

Численный алгоритм включает в себя следующие этапы:

1) нахождение давления путем решения эллиптического уравнения итерационным методом установления на известной области;

2) решение итерационной системы относительно неизвестных компонент вектора скорости с учетом найденного давления, нахождение совокупности значений  $u = u_{ij}; v = v_{ij}$ , представляющих собой значения вектора скорости в узлах выбранной сетки;

3) нахождение с помощью вычисленных скоростей координат маркеров, определяющих новую границу области. Определение поверхности частицы при помощи новых значений граничных точек;

4) перераспределение ячеек по заданной постоянной эйлеровой сетке с учетом нового положения границы области, формирование исходя из новых координат точек, ввод новых маркеров для определения свободной границы и т. д.

### Результаты и их обсуждение.

#### Проверка на адекватность предложенной модели растекания частицы по подложке при плазменном напылении

Для проверки на адекватность предложенной модели был рассмотрен также процесс плазменного напыления порошка оксида циркония.

На рис. 4 и 5 показана последовательность сплющивания расплавленных частиц оксида циркония на полированной поверхности подложки. После удара жидкая частица быстро плющится на границе частица-подложка.

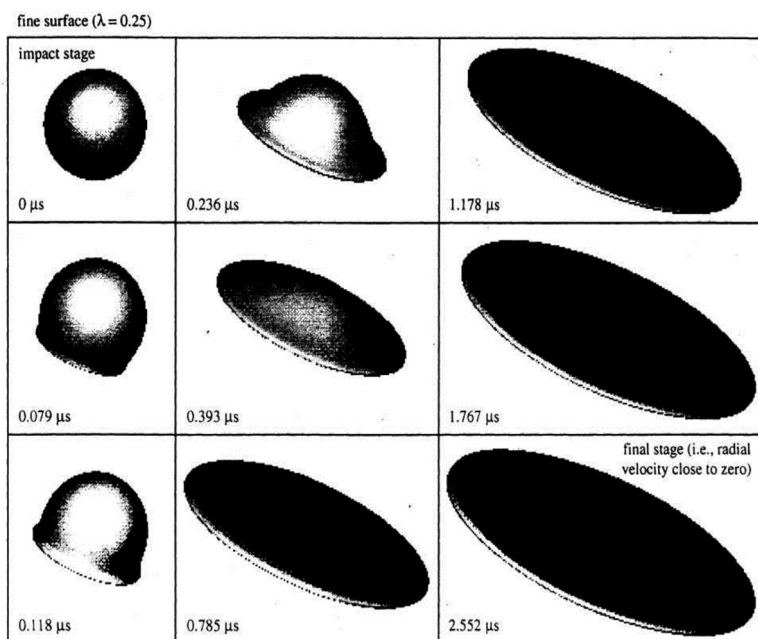


Рис. 4. Напыление расплавленной частицы оксида циркония на полированную поверхность (расчетные данные)

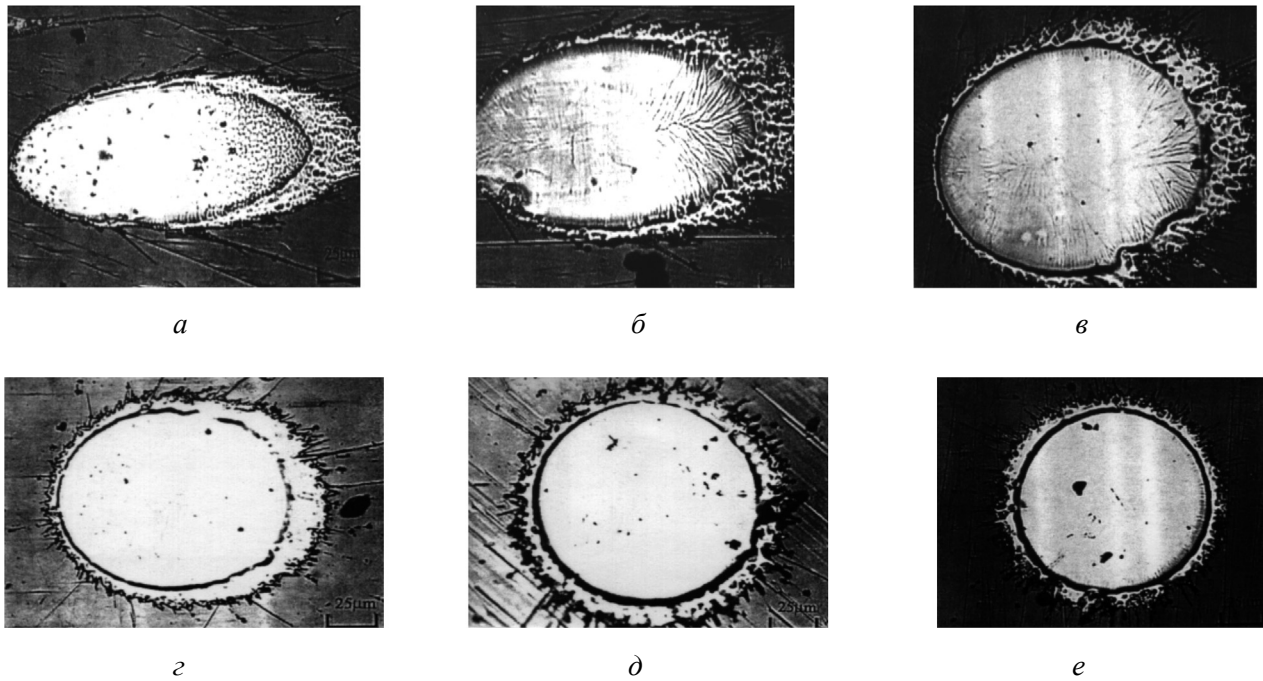


Рис. 5. Напыление расплавленной частицы оксида циркония на полированную поверхность при различных временах нахождения частицы в плазменной струе:  
 а – 0,3  $\mu\text{s}$ ; б – 0,4  $\mu\text{s}$ ; в – 0,8  $\mu\text{s}$ ; г – 1,2  $\mu\text{s}$ ; д – 1,8  $\mu\text{s}$ ; е – 2,5  $\mu\text{s}$

С увеличением времени нахождения частицы в плазменной струе высота расплющенной частицы уменьшается, а диаметр ее увеличивается. На рис. 5 показаны реальные расплющенные частицы оксида циркония при различных временах нахождения частицы в плазменной струе.

### Выводы

По предложенным в работе схемам и алгоритмам реализации модели растекания частицы по подложке при плазменном напылении можно определить форму растекания одиночной частицы в различные моменты времени. При учете контакта с холодной подложкой в зависимости от температур частицы и подложки можно получить форму затвердевшей частицы. Путем вычислительного эксперимента может быть проведен анализ факторов, влияющих на растекание и затвердевание расплавленной частицы.

Таким образом, разработанная модель позволяет проводить численные эксперименты по исследованию процесса соударения отдельной капли с пространственной поверхностью и ее растекание, а также формирование структуры плазменных покрытий.

Результаты исследований показывают, что численные методы являются достаточно эффективными при изучении нелинейных задач.

На базе проведенных экспериментальных исследований процессов взаимодействия с подложкой и растекания на ней частиц показана адекватность разработанных теоретических зависимостей. Из расчетов по построенным алгоритмам представляется возможность исследовать механизм формирования покрытия при послойной укладке частиц, что позволяет анализировать допустимые пути формирования плазменных теплозащитных покрытий.

### Список литературы

1. Nichols B.D., Hirt C.W., Hotchkiss R.C. SOLA-VOF: a solution algorithm for transient fluid flow with multiple free boundaries: report LA-8355 (US-32 and US-34). – Los Alamos: Los Alamos National Scientific Laboratory Publ., 1980. – 58 p.
2. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белашенко, О.П. Солоненко, В.А. Сафиуллин. – М.: Наука, 1990. – 408 с. – ISBN 5-02-006040-2.
3. Солоненко О.П., Смирнов А.В. Соударение капли расплава с поверхностью: теория и модельный эксперимент // Доклады Академии наук. – 1998. – Т. 363, № 1. – С. 46–49.
4. Fukunuma H. A porosity formation and flattening model of an impinging molten particle in thermal spray coatings // Journal of Thermal Spray Technology. – 1994. – Vol. 3, iss. 1. – P. 33–34. – doi: 10.1007/BF02648997.

5. Исследование структуры плазменных износостойких покрытий на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый, Т.Л. Талако, О.Г. Девойно, А.Ф. Пантелеенко, В.В. Оковитый // Наука и техника. – Минск, 2013. – № 5. – С. 15–21.

6. Девойно О.Г., Оковитый В.В. Композиционный порошок на основе диоксида циркония, частично стабилизированный оксидом церия // Наука и техника. – Минск, 2013. – № 6. – С. 3–8.

7. Моделирование растекания и затвердевания частицы при плазменном напылении / Г.Ф. Громыко, Г.М. Заяц, А.Ф. Ильющенко, С.П. Кундас // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск, 1999. – Вып. 22. – С. 101–107.

8. Моделирование процессов газотермического напыления покрытий / А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, А.И. Шевцов, Г.Ф. Громыко. – Минск: Беспринт, 2008. – 264 с.

9. Моделирование процессов формирования теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидами редкоземельных металлов / Г.Ф. Громыко, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.В. Оковитый // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Белорусская наука, 2013. – Вып. 36. – С. 36–40.

10. Simulation and experimental studies of particles interaction with plasma jet in vacuum plasma spraying processes / S. Kundas, V. Gurevich, A. Ilyuchenko, V. Okovity // Journal of Advanced Materials. – 2000. – Vol. 32, iss. 3. – P. 3–11.

11. Кундас С.П., Ильющенко А.Ф., Оковитый В.А. Релаксация напряжений в плазменных покрытиях за

счет образования трещин // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Тонпик, 2002. – Вып. 25. – С. 79–84.

12. Оковитый В.А. Модель напряженного состояния системы «покрытие-подложка» при плазменном напылении // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Геопринт, 2003. – Вып. 26. – С. 113–116.

13. Моделирование режимов напыления плотной керамики на основе диоксида циркония / В.А. Оковитый, Г.Ф. Громыко, А.Ф. Ильющенко, Н.П. Мацука, Ф.И. Пантелеенко, А.И. Шевцов, В.В. Оковитый // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Белорусская наука, 2010. – Вып. 33. – С. 9–20.

14. Моделирование процесса формирования керамических покрытий на основе диоксида циркония / Г.Ф. Громыко, В.А. Оковитый, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.В. Оковитый // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Белорусская наука, 2012. – Вып. 35. – С. 170–176.

15. Разработка системы уравнений по определению температуры и напряжений при формировании теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидами редкоземельных металлов / Г.Ф. Громыко, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.В. Оковитый // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Белорусская наука, 2014. – Вып. 37. – С. 198–207.

## OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(67), April – June 2015, Pages 24–31

### Test for adequacy of model of particle spreading over the substrate during plasma spraying of thermal barrier coatings

**Panteleenko F.I.**<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), Professor, Corresponding Member, National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: panteleyenkofi@mail.ru

**Gromyko G.F.**<sup>2</sup>, Ph.D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, e-mail: grom@im.bas-net.by

**Okovity V.V.**<sup>1</sup>, Ph.D. student, e-mail: okovvas@gmail.com

<sup>1</sup> Belarussian National Technical University, 65 Nezavisimosty avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus

<sup>2</sup> Institute of Mathematics, National Academy of Sciences of Belarus, 11 Surganova str., Minsk, 220013, Republic of Belarus

### Abstract

A mathematical description of the process of spreading and simultaneous solidification of the liquid particles, when it collides with the solid surface of the substrate is presented and approximate numerical methods for the calculation are constructed in the article. These algorithms are a continuation of numerical studies on the development of approximate methods of calculation, which examined simplified models for individual variables, such as temperature in the particle, in the substrate, in the contact area, for finding the velocity field for determining the shape of the spreaded particle.

The developed model allows carrying out numerical experiments to study the collision process of an individual drop with the spatial surface and its' spreading, as well as the formation of the structure of plasma coatings. The results show that the numerical methods are quite effective in the study of nonlinear problems. On the basis of experimental studies of processes of interaction of the particles with the substrate and spreading on it the adequacy of the developed theoretical dependencies is shown.

### Keywords:

particle, simulation, algorithm, velocity fields, flow and solidification processes, plasma spraying, thermal barrier coatings.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-24-31

### References

1. Nichols B.D., Hirt C.W., Hotchkiss R.C. SOLA-VOF: A solution algorithm for transient fluid flow with multiple free boundaries. Report LA-8355 (US-32 and US-34). Los Alamos, Los Alamos National Scientific Laboratory Publ., 1980. 58 p.
2. Kudinov V.V., Pekshev P.Yu., Belashchenko V.E., Solonenko O.P., Safiullin V.A. *Nanesenie pokrytij plazmoj* [Plasma Coating]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 408 p. ISBN 5-02-006040-2
3. Solonenko O.P., Smirnov A.B. Soudarenie kapli rasplava s poverkhnost'yu: teoriya i model'nyi eksperiment [Collision of a melt drop with a surface: theory and a model experiment]. *Doklady Akademii nauk – Doklady Earth Sciences*, 1998, vol. 363, no. 1, pp. 46–49. (In Russian)
4. Fukanuma H. A porosity formation and flattening model of an impinging molten particle in thermal spray coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1994, vol. 3, iss.1, pp. 33–44. doi: 10.1007/BF02648997
5. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Talako T.L., Devoino O.G., Panteleenko A.F., Okovity V.V. Issledovanie struktury plazmennyykh iznosostoikikh pokrytii na osnove oksidnoi keramiki s vklyucheniymi tverdoi smazki [Investigation of plasma wear resistance coating structure on basis of oxide ceramics with inclusions of solid lubrication]. *Nauka i tekhnika – Science and Technique*, 2013, no. 5, pp. 15–21. (In Russian)
6. Devoino O.G., Okovity V.V. Kompozitsionnyi poroshok na osnove dioksida tsirkoniya, chastichno stabilizirovannyi oksidom tseriya [Composite powder based on zirconium dioxide and partially stabilized by cerium oxide]. *Nauka i tekhnika – Science and Technique*, 2013, no. 6, pp. 3–8. (In Russian)
7. Gromyko G.F., Zayats G.M., Il'yushchenko A.F., Kundas S.P. [Simulation of spreading and solidification of particle during plasma spraying]. *Respublikanskii mezhhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi "Poroshkovaya metallurgiya"* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB "Powder Metallurgy"], 1999, iss. 22, pp. 101–107. (In Russian)
8. Il'yushchenko A.F., Okovity V.A., Shevtsov A.I., Gromyko G.F. *Modelirovanie protsessov gazotermicheskogo napyleniya pokrytii* [Modelling of processes of thermal spraying coatings]. Minsk, Besprint Publ., 2008. 264 p.
9. Gromyko G.F., Il'yushchenko A.F., Shevtsov A.I., Okovity V.V. [Simulation of processes of generation of heat-protection coatings on the basis of double oxide zirconium stabilized with oxides of rare-earth metals]. *Respublikanskii mezhhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi "Poroshkovaya metallurgiya"* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB "Powder Metallurgy"], 2013, iss. 36, pp. 36–40. (In Russian)
10. Kundas S., Gurevich V., Ilyushchenko A., Okovity V. Simulation and experimental studies of particles interaction with plasma jet in vacuum plasma spraying processes. *Journal of Advanced Materials*, 2000, vol. 32, iss. 3, pp. 3–11.
11. Kundas S.P., Il'yushchenko A.F., Okovity V.A. [Stress relaxation in plasma coating due to the formation of cracks]. *Respublikanskii mezhhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi "Poroshkovaya metallurgiya"* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB "Powder Metallurgy"], 2002, iss. 25, pp. 79–84. (In Russian)



12. Okovity V.A. [Model the stress state of the system “covered-ment-support” during plasma spraying]. *Respublikanskiy mezhdedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi “Poroshkovaya metallurgiya”* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB “Powder Metallurgy”], 2003, iss. 26, pp. 113–116. (In Russian)

13. Okovity V.A., Gromyko G.F., Il'yushchenko A.F., Matsuka N.P., Panteleenko F.I., Shevtsov A.I., Okovity V.V. [Simulation mode spraying dense ceramics based on zirconium dioxide]. *Respublikanskiy mezhdedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi “Poroshkovaya metallurgiya”* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB “Powder Metallurgy”], 2010, iss. 33, pp. 9–20. (In Russian)

14. Gromyko G.F., Okovity V.A., Il'yushchenko A.F., Shevtsov A.I., Okovity V.V. [Simulation of the process of formation of ceramic-ray coatings based on zirconium dioxide]. *Respublikanskiy mezhdedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi “Poroshkovaya metallurgiya”* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB “Powder Metallurgy”], 2012, iss. 35, pp. 170–176. (In Russian)

15. Gromyko G.F., Il'yushchenko A.F., Shevtsov A.I., Okovity V.V. [Development of a system of equations to determine the temperature and stress in the formation of thermal barrier coatings based on stabilized zirconia oxides of rare earth metals]. *Respublikanskiy mezhdedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi “Poroshkovaya metallurgiya”* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB “Powder Metallurgy”], 2014, iss. 37, pp. 198–207. (In Russian)

Received 6 April 2015

Revised 6 May 2015

Accepted 15 May 2015

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СООРУЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*В.Г. АТАПИН, доктор техн. наук, профессор  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 6 апреля 2015  
Рецензирование 6 мая 2015  
Принята к печати 15 мая 2015

**Атапин В.Г.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: teormech@ngs.ru

**Цель.** Для устройства перекрытий сооружений промышленного назначения широко применяются фермы. Преимущество ферм проявляется при необходимости перекрытия больших пролетов. В связи с этим ставится задача исследовать напряженное и деформированное состояния несущих конструкций конкретного сооружения промышленного назначения (цех для металлообработки, склад) и на этой основе спроектировать рациональную компоновку конструкций. Несущие конструкции представляют собой пространственные фермы. **Методы.** Для расчета напряженного и деформированного состояний применяется метод конечных элементов. **Результаты.** В результате расчетов характерного фрагмента сооружения (угол стыка двух взаимно перпендикулярных участков) получено, что максимальное напряжение в стержне конструкции равно 139,6 МПа, максимальное вертикальное перемещение – 10,51 мм, а масса характерного объема – 51112,72 кг. Для практической реализации рассмотренной конструкции рекомендовано использовать трубы стальные квадратные 70×70×5 (мм) ГОСТ 8639–82, трубы стальные прямоугольные 150×100×8 (мм), 100×70×5 (мм) ГОСТ 8645–82, трубы стальные электросварные прямошовные 273×9 (мм), 219×8 (мм) ГОСТ 10704–91. **Обсуждение.** Разработанная математическая модель несущих конструкций сооружения адекватно отражает их напряженно-деформированное состояние. Так, рабочие напряжения, равные 139,6 МПа, меньше допускаемых напряжений 142,4 МПа и, следовательно, прочность конструкции обеспечена. Максимальное вертикальное перемещение в конструкции равно 10,51 мм, что меньше предельного вертикального прогиба 64 мм, определенного нормами проектирования. Следовательно, необходимая жесткость конструкции обеспечена. Расчеты стержней, испытывающих сжатие на устойчивость, показали, что условие устойчивости выполняется для всех стержней. В частности, для наиболее нагруженного элемента – колонна диаметром 219 мм, толщиной стенки 8 мм, длиной 1900 мм, рабочие напряжения 40,9 МПа меньше допускаемых напряжений на устойчивость 205,2 МПа. Разработанная конструкция удовлетворяет условиям прочностной надежности (условиям прочности, жесткости и устойчивости). По результатам расчетов характерного фрагмента сооружения разработан эскизный проект с необходимой конструкторской документацией (в статье не рассматривается).

**Ключевые слова:** проектирование, ферма, напряженное состояние, деформированное состояние, метод конечных элементов.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-32-38

## Введение

В зависимости от конструктивных решений сооружений промышленного назначения целесообразно при их проектировании выделять систему элементов, которая в основном воспринимает действующую нагрузку. Для устрой-

ства перекрытий таких объектов широкое распространение получили, в частности, фермы. Преимущество ферм проявляется при необходимости перекрытия больших пролетов [1, 2]. В последнее время при возведении промышленных зданий стали использоваться конструкции из гнутых профилей, изготовленных холодной

прокаткой из рулонной оцинкованной стали толщиной до 3 мм [3, 4]. Однако применение этих конструкций сдерживается, в частности, из-за недостаточной экспериментально-теоретической базы данных о работе новых конструкций из гнутых профилей при статических и динамических нагрузках.

В настоящей работе рассматривается расчет силовых несущих конструкций сооружения промышленного назначения (цех для металлообработки, склад, крытая стоянка для автомобилей и т. п.). Вследствие больших габаритов и пролетов сооружения решение поставленной задачи возможно с применением ферменных конструкций [5–7].

### 1. Постановка задачи

Сооружение промышленного назначения предназначено для эксплуатации в климатических условиях Западной Сибири. В связи с этим при расчете несущих конструкций учитывается снеговая и ветровая нагрузка, а также собственный вес конструкций. Расчет напряженного и деформированного состояния несущих конструкций проводится методом конечных элементов [8–10] в среде программного комплекса APM WinMachine (версия 7.0, лицензия № 18201 от 16.01.2001 г.).

В соответствии с компоновочной схемой сооружения (рис. 1) принимаем к расчету следующие исходные данные:

- 1) длина (два участка, расположенных под прямым углом друг к другу) – 76,2 и 87,7 м;
- 2) ширина (по участкам) – 26,4 и 25 м;
- 3) рабочая высота – 2,6 м;
- 4) расстояние между опорами по ширине – 16 м;
- 5) расстояние между опорами по длине за исключением углового участка – 7 м;
- 6) в месте стыка двух взаимно перпендикулярных участков (угол) расстояние между опорами назначается в соответствии с компоновочной схемой фундамента сооружения.

По условиям эксплуатации дополнительно принимаем следующие данные для расчетов:

- 1) конструкция предназначена для эксплуатации в условиях Западной Сибири;
- 2) принимаем снеговой район – IV; нормативное значение веса снегового покрова для

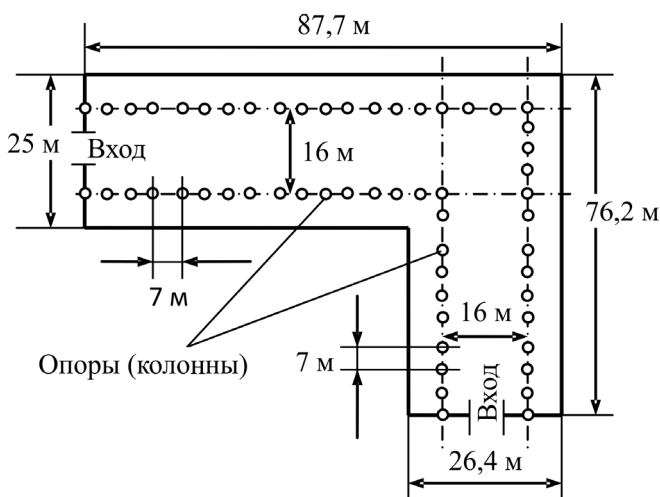


Рис. 1. Фундамент и схема расположения участков и опор

IV снегового района составляет 2,4 кПа [12, табл. 4, 13];

3) принимаем ветровой район – III; нормативное значение ветрового давления для III ветрового района составляет 0,38 кПа ([12, табл. 5, 13];

4) давление настила крыши составляет 0,488 кПа.

Таким образом, при исследовании напряженного и деформированного состояния несущих элементов сооружения расчетная суммарная нагрузка (давление) составляет:

$$q = 2,4 + 0,38 + 0,488 = 3,268 \text{ кПа.}$$

При рассмотрении компоновки несущих конструкций принимаем, что основным элементом является стержневая система, состоящая из жестко соединенных между собой стержней (рис. 2). В связи с этим для моделирования применяется стержневой пространственный конечный элемент с шестью степенями свободы. Узлы

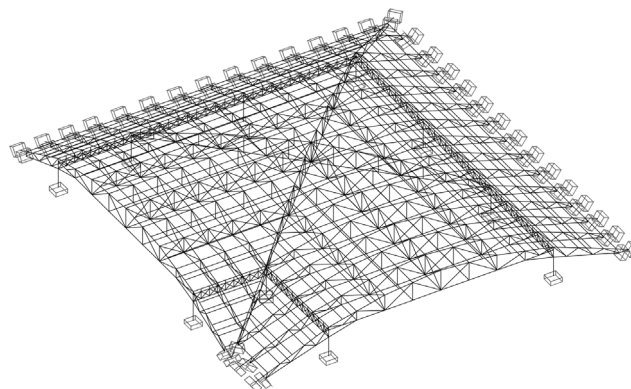


Рис. 2. Фрагмент соединения двух взаимно перпендикулярных участков (угол)

конечно-элементной сетки располагаются в местах естественного пересечения стержней. Расчетные условия:

- 1) условия опирания конструкции – жесткая заделка (на рис. 2 опоры показаны в форме параллелепипедов);
- 2) внешняя равномерно распределенная нагрузка интенсивностью 3,268 кПа, учитывающая нормативные значения веса снегового покрова и ветрового давления, а также расчетное давление настила крыши (рис. 3);

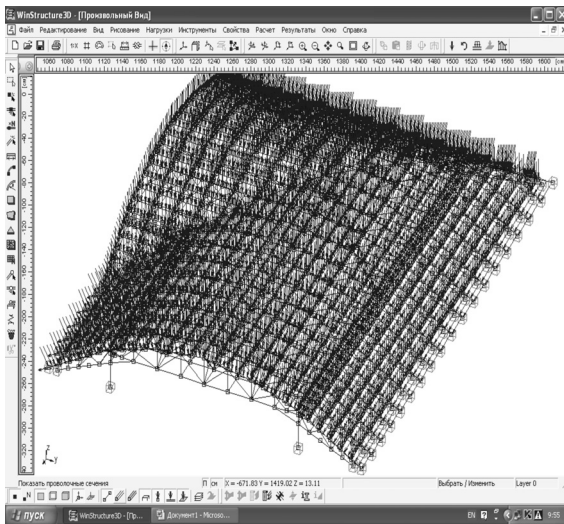


Рис. 3. Внешняя нагрузка

- 3) размеры поперечного сечения элементов конструкции принимаются по результатам расчетов согласно следующим стандартам:

- ГОСТ 8639–82. Трубы стальные квадратные;
- ГОСТ 8645–82. Трубы стальные прямоугольные;
- ГОСТ 10704–91. Трубы стальные электросварные прямошовные (трубы диаметром от 10 до 530 мм);
- 4) материал элементов конструкции – сталь с механическими свойствами основного металла не ниже, чем для стали Ст3 (ГОСТ 380–94).

## 2. Результаты расчетов и обсуждение

### 2.1. Оценка точности конечно-элементной сетки

Необходимая точность расчетов по методу конечных элементов достигается, как известно [8, 9], путем разбиения исходного стержня на

конечные элементы, т. е. за счет сгущения расчетной сетки. Исходные данные для расчетной схемы стержня (рис. 4):

- 1) длина наибольшего пролета (длина стержня) – 2 м;
- 2) равномерно распределенная нагрузка – 2,0 кН/м;
- 3) поперечное сечение стержня – размеры 70 × 70 × 5 (мм), труба стальная квадратная ГОСТ 8639–82;

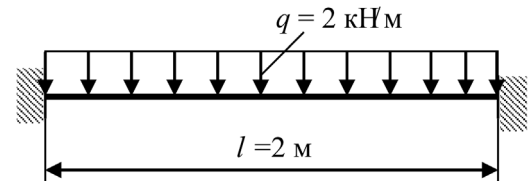


Рис. 4. Расчетная схема стержня

Результаты расчета приведены в таблице. Они показывают, что практически необходимая точность расчета обеспечивается уже при одном конечном элементе. Следовательно, при расчете несущих конструкций нет необходимости разбивать отдельные стержневые элементы, из которых составлена конструкция на два и более конечных элемента. Достаточно иметь естественную разбивку по местам пересечений отдельных стержней.

### Результаты расчета

Число конечных элементов	1	2	4
Напряжения, МПа	24,724	25,998	25,999
Перемещения, мм	0,443	0,462	0,462

### 2.2. Основные результаты расчетов

Общее количество конечных стержневых элементов – 4037. На рис. 5 показано деформированное состояние выделенного углового фрагмента. Основные результаты расчета характерного фрагмента (угол стыка двух взаимно перпендикулярных участков) сводятся к следующему.

1. Максимальное напряжение –  $\sigma_{\max} = 139,6$  МПа.

2. Максимальное вертикальное перемещение –  $\delta_{\max} = 10,51$  мм.

3. Общая масса конструкции (характерного объема) – 5112,72 кг.

*Расчет на прочность.* Условие прочности имеет вид [11]

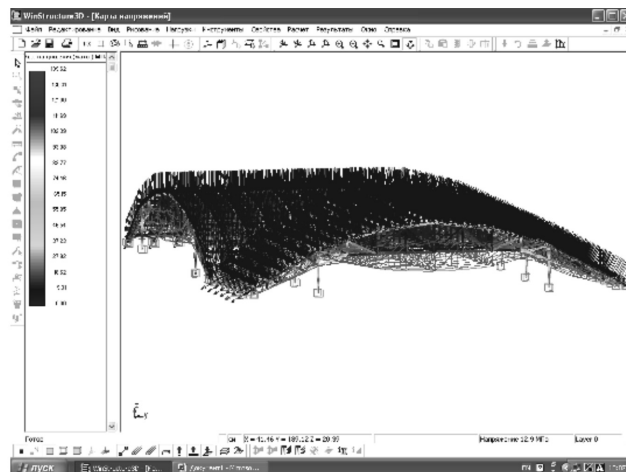
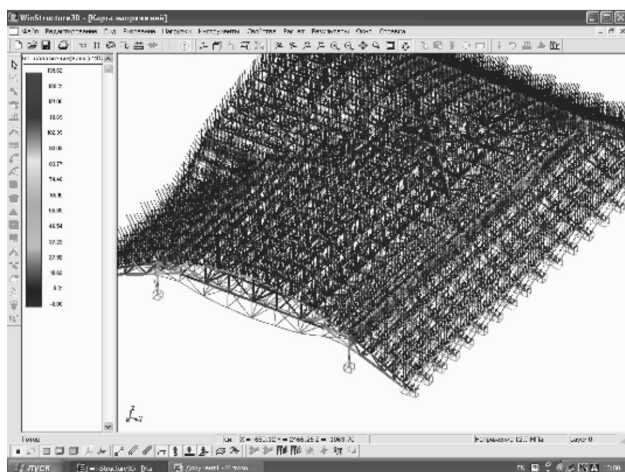


Рис. 5. Деформированное состояние

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma],$$

где  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение, вычисляемое по формуле [12]

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T \gamma_c}{\gamma_n \gamma_M}.$$

При использовании в качестве материала элементов конструкции стали Ст3 имеем предел текучести  $\sigma_T = 216$  МПа (ГОСТ 380–94). Коэффициент надежности по материалу  $\gamma_M = 1,05$  [12, табл. 2]. Коэффициент условий работы сжатых элементов пространственной решетки  $\gamma_c = 0,9$  [12, табл. 6]. Коэффициент надежности  $\gamma_n = 1,3$  [12, раздел 4]. Тогда допускаемое напряжение

$$[\sigma] = \frac{216 \cdot 0,9}{1,3 \cdot 1,050} = 142,4 \text{ МПа}.$$

Рабочие напряжения  $\sigma_{\max} = 139,6$  МПа  $< [\sigma] = 142,4$  МПа и, следовательно, прочность конструкции обеспечена.

*Расчет на жесткость.* Согласно нормам [12] вертикальные предельные прогибы для покрытий и перекрытий, открытых для обзора при пролете  $l = 24$  (12) м, вычисляются по формуле  $l/250$ . В нашем случае при пролете 16 м между колоннами предельный вертикальный прогиб составляет:

$$\delta_{\text{пред}} = 16 / 250 = 0,064 \text{ м} = 64 \text{ мм}.$$

Максимальное вертикальное перемещение в конструкции  $\delta_{\max} = 10,51$  мм меньше предельного вертикального прогиба  $\delta_{\text{пред}} = 64$  мм, следовательно, необходимая жесткость конструкции также обеспечена.

*Расчет на устойчивость.* Расчет на устойчивость элементов, подверженных сжатию центрально приложенной силой  $N$ , выполняется по формуле [12]

$$\frac{N}{\phi A} \leq R_y \gamma_c = 216 \cdot 0,95 = 205,2 \text{ МПа},$$

где  $R_y = \sigma_T = 216$  МПа (сталь Ст3); коэффициент условий работы сжатых элементов конструкции  $\gamma_c = 0,95$  ([12, табл. 6]). Значения  $\phi$  принимаются в зависимости от гибкости  $\lambda$  элемента согласно [12, табл. 72].

Так, для колонны диаметром  $D = 219$  мм, толщиной стенки 8 мм и длиной  $l = 1900$  мм с наибольшим усилием сжатия  $N = 210,4$  кН (рис. 6), которая имеет площадь поперечного сечения  $A = 53$  см<sup>2</sup>, осевой момент инерции  $I = 2956$  см<sup>4</sup>, коэффициент приведения длины  $\mu$  [12, табл. 71, а], гибкость

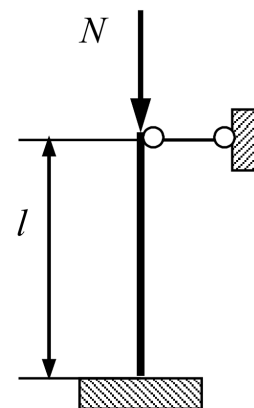


Рис. 6. Расчетная схема колонны

$$\lambda = \frac{\mu l}{\sqrt{I/A}} = \frac{0,7 \cdot 1900}{\sqrt{2956/53}} = 17,8.$$

По табл. 72 [9] для  $\lambda = 17,8$  и  $\sigma_T = 216$  МПа имеем  $\phi = 0,97$ . Тогда напряжение при сжатии колонны

$$\sigma = \frac{210,4 \cdot 10^{-3}}{0,97 \cdot 53 \cdot 10^{-4}} = 40,9 \text{ МПа} < 205,2 \text{ МПа},$$

т. е. условие устойчивости элемента выполняется. Проверка на устойчивость других элементов показала, что условие устойчивости везде выполняется.

### Выводы

Расчеты на прочностную надежность несущих конструкций сооружения показали, что они удовлетворяют условиям прочности, жесткости и устойчивости. Для практической реализации предложено использовать трубы стальные квадратные  $70 \times 70 \times 5$  (мм) [14], трубы стальные прямоугольные  $150 \times 100 \times 8$  (мм),  $100 \times 70 \times 5$  (мм) [15], для вертикальных стоек трубы стальные электросварные прямошовные  $273 \times 9$  (мм),  $219 \times 8$  (мм) [16]. По результатам расчетов характерного фрагмента сооружения разработан эскизный проект с необходимой конструкторской документацией (здесь не рассматривается).

### Список литературы

1. *Спицына Д.Н.* Строительная механика стержневых машиностроительных конструкций / под ред. С.Д. Пономарева. – М.: Высшая школа, 1977. – 248 с.
2. Строительная механика. Стержневые системы / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лашеников, Н.Н. Шапошников; под ред. А.Ф. Смирнова. – М.: Стройиздат, 1981. – 512 с.
3. *Айрумян Э.Л., Беляев В.Ф.* Эффективные холодногнутое профили из оцинкованной стали – в массовое строительство // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2005. – № 11. – С. 10–17.
4. *Атапин В.Г., Скиба В.Ю.* Численное моделирование бескаркасных арочных покрытий // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 4 (57). – С. 23–27.
5. *Кузин Н.Я.* Проектирование и расчет стальных ферм покрытий промышленных зданий: учебное пособие. – М.: АСВ, 1998. – 184 с.
6. *Металлические конструкции: в 3 т.: т. 1: Элементы стальных конструкций: учебное пособие для строительных вузов / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов, Г.И. Белый, Л.В. Енджиевский, И.И. Крылов, Я.И. Ольков, В.Ф. Сабуров; под ред. В.В. Горева.* – Изд. 3-е, стер. – М.: Высшая школа, 2004. – 551 с. – ISBN 5-06-003695-2 (т. 1).
7. *Металлические конструкции: в 3 т.: т. 2: Конструкции зданий: учебное пособие для строительных вузов / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов, Г.И. Белый, В.Н. Валь, Л.В. Енджиевский, И.И. Крылов, Я.И. Ольков, В.Ф. Сабуров; под ред. В.В. Горева.* – Изд. 2-е, испр. – М.: Высшая школа, 2002. – 528 с. – ISBN 5-06-003696-0 (vol. 2)
8. *Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: справочник / под общ. ред. В.И. Мяченкова.* – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с. – ISBN 5-217-00401-0.
9. *Метод конечных элементов / П.М. Варвак, И.М. Бузун, А.С. Городецкий, В.Г. Пискунов, Ю.Н. Толокнов; под ред. П.М. Варвака.* – Киев: Вища школа, 1981. – 176 с.
10. *Gallagher R.H.* Finite element analysis: fundamentals. – New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1974. – 420 p.
11. *Атапин В.Г., Пель А.Н., Темников А.И.* Сопротивление материалов. Базовый курс. Дополнительные главы: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 508 с. – (Серия «Учебники НГТУ»). – ISBN 978-5-7782-1750-8.
12. СНИП II–23–81. Стальные конструкции. – Актуализированная редакция. – М.: ЦПП, 2011. – 173 с.
13. СНИП 2.01.07–85. Нагрузки и воздействия. – Актуализированная редакция. – М.: ЦПП, 2011. – 85 с.
14. ГОСТ 8639–82. Трубы стальные квадратные. Сортамент. – Взамен ГОСТ 8639–68; введен 01.01.1983. – Переиздание с изменениями № 1, 2, 3, утвержденными в июне 1987 г., ноябре 1989 г., сентябре 1992 г. (ИУС 10-87, 2-90, 12-92). – М.: Стандартинформ, 2006. – 6 с.
15. ГОСТ 8645–68. Трубы стальные прямоугольные. Сортамент. – Введен 01.01.1969; взамен ГОСТ 8645-57. – Переиздание с изменениями 1–4. – М.: Издательство стандартов, [2010]. – 10 с. – Изменение № 4 введено 01.06.2010.
16. ГОСТ 10704–91. Трубы стальные электросварные прямошовные. – Взамен ГОСТ 10704–76; введен 01.01.1993. – Переиздание. – М.: Издательство стандартов, 1996. – 7 с.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(67), April – June 2015, Pages 32–38

### Investigation of the strength of carrier constructions of industrial building

Atapin V.G., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: teormechn@ngs.ru

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

#### Abstract

**Purpose:** Frameworks are widely used for the roof of industrial buildings. The advantage of frameworks appears when it is needed to cover long spans. In this context, the following problem is formulated: investigation of the concrete industrial buildings carrier constructions' (shop for metalworking, warehouse) state of stress and state of strain and design of the rational constructions. Carrier constructions correspond to the spatial frameworks. **Methods:** The finite elements method is used for the calculation of the state of stress and state of strain. **Results:** The calculation of the characteristic fragment of the building (the angle of intersection of two mutually perpendicular sections) found that the maximum stress in the rod is 139.6 MPa, the maximum vertical displacement is 10.51 mm, and weight is 51112.72 kg. For practical realization of the considered structures is recommended to use the steel square pipe 70×70×5 (mm) GOST 8639-82, rectangular steel pipes 150×100×8 (mm), 100×70×5 (mm) GOST 8645-82, welded steel pipes 273×9 (mm), 219×8 (mm) GOST 10704-91. **Discussion:** The numerical model of carrier constructions of building adequately reflects their stress-strain state. Thus, final stresses are equal to 139.6 MPa that is less than working stress (142.4 MPa) and, consequently, the structural strength is ensured. The maximum vertical displacement is 10.51 mm that is less than the maximum permissible vertical bend (64 mm), specified by design standards, therefore, rigidity is ensured. Stability calculations of rods under compression showed that the condition of stability is performed for all rods. In particular, for the most loaded element (a column with 219 mm in diameter of, wall thickness of 8 mm, 1900 mm in length) real pressure of 40.9 MPa is less than the rigidity working stress of 205.2 MPa. Thus, the developed design satisfies the strength reliability conditions (norms of strength, stiffness and stability).

#### Keywords:

design, framework, state of stress, state of strain, finite elements method

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-32-38

#### References

1. Spitsyna D.N. *Stroitel'naya mekhanika sterzhnevyykh mashinostroitel'nykh konstruksii* [Structural mechanics core engineering designs]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977. 248 p.
2. Smirnov A.F., Aleksandrov A.V., Lashchenikov B.Ya., Shaposhnikov N.N. *Stroitel'naya mekhanika. Sterzhnevyye sistemy* [Building mechanics. Bar Systems]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1981. 512 p.
3. Airumyan E.L., Belyaev V.F. Effektivnye kholodnognutyie profili iz otsinkovannoi stali – v massovoe stroitel'stvo [Effective coldly bent structures from galvanized steel – in mass construction]. *Montazhnye i spetsial'nye raboty v stroitel'stve – Erecting and special works in construction*, 2005, no. 11, pp. 10–17.
4. Atapin V.G., Skeebe V.Yu. Chislennoe modelirovanie beskarkasnykh arochnykh pokrytii [Numerical simulation of frameless arched covers]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2012, no. 4 (57), pp. 23–27.
5. Kuzin N.Ya. *Proektirovanie i raschet stal'nykh ferm pokrytii promyshlennykh zdaniy* [Design and calculation of steel roof trusses industrial buildings]. Moscow, ASV Publ., 1998. 184 p.
6. Gorev V.V., Uvarov B.Yu., Filippov V.V., Belyi G.I., Endzhievskii L.V., Krylov I.I., Ol'kov Ya.I., Saburov V.F. *Metallicheskie konstruksii*. V 3 t. T. 1: *Elementy stal'nykh konstruksii* [Metal structures. In 3 vol. Vol. 1: Elements of steel structures]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004. 551 p. ISBN 5-06-003695-2 (vol. 1)
7. Gorev V.V., Uvarov B.Yu., Filippov V.V., Belyi G.I., Val' V.N., Endzhievskii L.V., Krylov I.I., Ol'kov Ya.I., Saburov V.F. *Metallicheskie konstruksii*. V 3 t. T. 2. *Konstruksii zdaniy* [Metal structures. In 3 vol. Vol. 2: Construction of Buildings]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 528 p. ISBN 5-06-003696-0 (vol. 2)

8. Myachenkov V.I., ed. *Raschety mashinostroitel'nykh konstruksii metodom konechnykh elementov. Spravochnik* [Calculations of machine-building structures by the method of finite elements. Reference]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 520 p. ISBN 5-217-00401-0
9. Varvak P.M., Buzun I.M., Gorodetskii A.S., Piskunov V.G., Toloknov Yu.N. *Metod konechnykh elementov* [The finite element method]. Kiev, Vyshha shkola Publ., 1981. 176 p.
10. Gallagher R.H. *Finite element analysis: fundamentals*. New Jersey, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1975. 416 p.
11. Atapin V.G., Pel' A.N., Temnikov A.I. *Soprotivlenie materialov. Bazovyi kurs. Dopolnitel'nye glavy* [Strength of materials. Basic course. Additional chapters]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011. 508 p. ISBN 978-5-7782-1750-8
12. *SNiP II-23-81. Stal'nye konstruksii* [Building regulations II-23-81. Steel structures]. Moscow, TsPP Publ., 2011. 173 p.
13. *SNiP 2.01.07-85. Nagruzki i vozdeistviya* [Building regulations 2.01.07-85. Loads and impacts]. Moscow, TsPP Publ., 2011. 85 p.
14. *GOST 8639-82. Truby stal'nye kvadratnye. Sortament* [State Standard 8639-82. Square steel tubes. Range]. Moscow, Standartinform Publ., 1997. 6 p.
15. *GOST 8645-68. Truby stal'nye pryamougol'nye. Sortament* [State Standard 8645-68. Rectangular steel tubes. Range]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 10 p.
16. *GOST 10704-91. Truby stal'nye elektrosvarnye pryamoshovnye* [State Standard 10704-91. Electrically welded steel line-weld tubes. Range]. Moscow, Standartinform Publ., 1997. 15 p.

Received 6 April 2015

Revised 6 May 2015

Accepted 15 May 2015



# ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

*В.А. ОКОВИТЫЙ, канд. техн. наук*  
*Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, доктор техн. наук,*  
*чл.-корр. НАН Беларуси*  
*Т.Л. ТАЛАКО, канд. техн. наук*  
*А.Ф. ПАНТЕЛЕЕНКО, науч. сотруд.,*  
*(БНТУ, г. Минск)*

Поступила 6 апреля 2015  
Рецензирование 6 мая 2015  
Принята к печати 15 мая 2015

**Пантелеенко Ф.И.** – 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65,  
Белорусский национальный технический университет,  
e-mail: panteleyenkofi@mail.ru

Описан синтез композиционных СВС-порошков с компонентами твердой смазки. Проведены исследования порошков следующего состава:  $Al_2O_3+30\%TiO_2+12,5\%MoS_2$ ;  $Al_2O_3+30\%TiO_2+12,5\%CaF_2$ . Синтез композиций осуществлялся в реакторе в режиме самораспространения без подвода энергии от внешнего источника, в азотно-кислородной среде при содержании кислорода от 10 до 25 мас.% и давлении 0,1...0,9 МПа, которая необходима для проведения реакции окисления порошка титана. Для сфероидизации частицы полученного композиционного порошка вводили в плазменную струю и производили их распыление в стальной цилиндр длиной 1 м, заполненный аргоном. Степень сфероидизации определяли по форм-фактору частиц методом оптической металлографии. Мощность плазменной струи изменяли от 30 до 40 кВт. Полученные порошки характеризуются сложной геометрической формой и развитым поверхностным рельефом частиц.

**Ключевые слова:** композиционные порошки, твердая смазка, синтез, сфероидизация частиц, плазменная струя, исследования порошков.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-39-45

## Введение

Разработка и создание композиционных керамических материалов обусловлено необходимостью улучшения свойств износостойких плазменных покрытий, так как в отличие от механических смесей порошков только в композиционных порошках могут одновременно находиться в заданном состоянии разнородные по физическому и химическому составу вещества, элементы, соединения, что дает возможность достигать новых эффектов при использовании таких материалов для нанесения покрытий. Необходимо также отметить, что применяемая технология изготовления композиционного порошка должна также обеспечивать придание

частицам свойств, способствующих формированию заданной структуры покрытий [1–5]. Применение СВС-порошков для нанесения на изнашиваемые поверхности деталей путем плазменного напыления и последующей обработки высококонцентрированными потоками энергии должно обеспечить регулирование структурообразования и получение износостойких поверхностных слоев покрытий в сочетании с повышенной когезионной и адгезионной прочностью напыленного материала. Для этого при разработке научных основ и технологических принципов нанесения таких покрытий должны учитываться процессы и механизм синтеза исходных композиционных порошков, процессы и механизм формирования покрытий при плаз-

менном напылении композиций и последующем воздействии на них высококонцентрированными потоками энергии [6–8]. Успешные предварительные эксперименты по синтезу композиционных порошков показывают, что имеется принципиальная возможность получения таких порошков при соответствующей обработке технологии СВС [9–11]. Наиболее широкое применение для нанесения керамических покрытий, в том числе из материалов на основе оксида алюминия-оксида титана, получил метод плазменного напыления. Покрытия на основе оксида алюминия-оксида титана с добавками твердых смазок отличаются от покрытий из чистых оксидов лучшей пластичностью и повышенной стойкостью по отношению к ударным нагрузкам, а также обладают меньшими значениями пористости, равномерностью структуры и изотропностью свойств [12–15]. Снижение пористости покрытий системы объясняется тем, что при введении в высокотемпературную газовую струю композиционного материала в первую очередь плавится твердая смазка и обволакивает зерна оксида. Так как температура плавления твердых смазок меньше температуры плавления оксидов, то такое распределение компонентов в частице способствует лучшему «заплавлению» пор между частицами оксидов в покрытии, вследствие чего пористость покрытий уменьшается. Физико-механические свойства оксидных двух- и более компонентных покрытий существенно зависят от распределения компонентов в исходном порошке и формы частиц порошка.

Цель исследований – оптимизация процесса получения материала на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки для газотермического напыления методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием и методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

### Методика получения композиционного материала

Для проверки возможности получения СВС-порошков с компонентами твердой смазки осуществлен синтез композиций, содержащих  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ . Проведены исследования порошков следующего состава:  $\text{Al}_2\text{O}_3+30\%\text{TiO}_2+12,5\%\text{MoS}_2$ ;

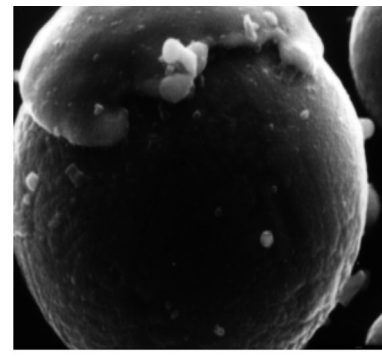
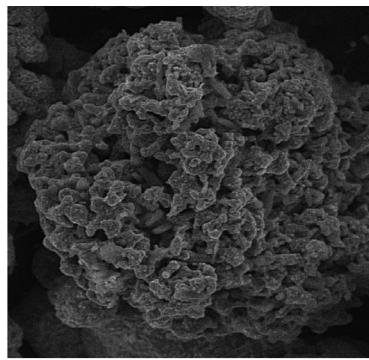
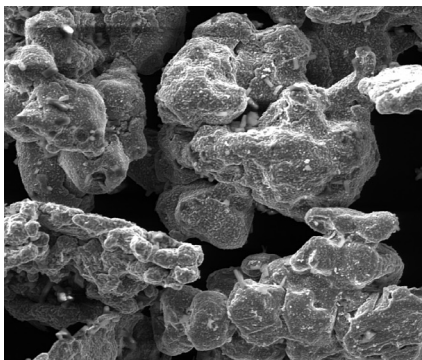
$\text{Al}_2\text{O}_3+30\%\text{TiO}_2+12,5\%\text{CaF}_2$ . Для получения указанных композиций использовались следующие дисперсные материалы: титан марки ПТМ, оксид алюминия марки ЭБМ-40, дисульфид молибдена  $\text{MoS}_2$  или фтористый кальций  $\text{CaF}_2$ , взятые в соотношении 57,5 : 30 : 12,5. Смешивание исходных компонентов выполнялось в шаровой мельнице при соотношении шаров и шихты 25 : 1 и времени мехактивации в течение 2–4 часов. Синтез композиций осуществлялся в реакторе в режиме самораспространения без подвода энергии от внешнего источника, в азотно-кислородной среде при содержании кислорода от 10 до 25 мас.% и давлении 0,1...0,9 МПа, которая необходима для проведения реакции окисления порошка титана. Реактор оснащен токоподводами с вольфрамовой спиралью для инициирования процесса. Использование при синтезе азотно-кислородной среды при содержании кислорода от 10 до 25 мас.% необходимо для проведения реакции окисления порошка титана. При содержании кислорода менее 10 мас.% и давлении менее 0,1 МПа не происходит полное окисление порошка и достаточное проникновение газа – реагента в слой шихты. При содержании кислорода более 25 мас.% и давлении более 0,9 МПа температура горения поднимается настолько, что происходит плавление частиц с образованием барьерного слоя, препятствующего проникновению газа реагента в слой шихты. Измельчение продуктов синтеза производили в щековой дробилке до получения фракции 0,050...0,063 мм, обеспечивающей напыление покрытий из оксидной керамики с максимальным коэффициентом использования материала. Операцию термохимической обработки в воздушной среде при температуре 500...800 °С в течение 4–6 часов проводят с целью доокисления частиц композиционного порошка. При температуре термохимической обработки менее 500 °С и времени менее четырех часов полного доокисления частиц не происходит, а проведение операции при температуре более 800 °С и времени более пяти часов приводит к увеличению энергозатрат и частичному спеканию частиц между собой [9, 10]. Для сфероидизации частицы полученного композиционного порошка вводили в плазменную струю и производили их распыление в стальной цилиндр, длиной 1 м, заполненный аргоном. Степень сфероидиза-

ции определяли по форм-фактору частиц (степень несферичности, значение 1 – соответствует сфере) методом оптической металлографии. Мощность плазменной струи изменяли от 30 до 40 кВт. При мощности плазменной струи менее 30 кВт более 50 % частиц имели форм-фактор менее 0,7, при мощности плазменной струи 40 кВт более 90 % частиц имеют форм фактор 0,9...1. При повышении мощности плазменной струи свыше 40 кВт повышение значения форм-фактора частиц незначительно. Нанесение тонкопленочной оболочки из металла на частицы порошков  $Al_2O_3+30\%TiO_2+12,5\%MoS_2$ ;  $Al_2O_3+30\%TiO_2+12,5\%CaF_2$  осуществляли химическим никелированием. При выполнении основной операции использовался раствор следующего состава: никель хлористый – 28 г/л; гипофосфит натрия – 30 г/л; натрий лимоннокислый – 10 г/л; кислота уксусная – 10 мл/л. Температура раствора поддерживалась в пределах 363...368 К, pH составляла 9,0...9,5. Для получения равномерного покрытия частиц раствор с порошком в ванне подвергался принудительному перемешиванию, оптимальная продолжительность никелирования составляет 10–12 ч. За это время на частицах формируется тонкопленочная оболочка из Ni толщиной 6–7 мкм, которая является необходимой и достаточной по принятому критерию оптимизации плакирования порошков для плазменного напыления покрытий.

### Результаты и обсуждение

Анализ размеров частиц, формы и рельефа поверхности синтезированных композиционных порошков осуществляли с применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Изучение структуры частиц композиционных порошков производили путем металлофизического анализа шлифов их поперечного сечения на микроскопах «Unimet» (Япония) и MeF-3 (Австрия). Результаты металлографического анализа также учитывали при изучении размеров и формы частиц. Согласно данным металлографического анализа основными составляющими композиционных частиц являются оксидные фазы и включения твердой смазки в виде дисульфида молибдена или фтористого кальция (см. рисунок, а). Наличие упомянутых составляющих частиц порошков создает предпосылки получения из них износостойких покрытий, которые эффективны при молекулярно-механическом и абразивном изнашивании в неблагоприятных условиях трения (граничная смазка или отсутствие смазочного материала, повышенные температурные воздействия) [12, 13]. Рассматриваемые порошки характеризуются сложной геометрической формой и развитым поверхностным рельефом частиц. Склонность к образованию комков снижает «текучесть» порошковых материалов и их технологичность при плазменном напылении покрытий. Поэтому для улучшения технологических параметров порошков была осуществлена их сфероидизация [10] посредством введения частиц порошка в плазменную струю мощностью 30...40 кВт и распылением в среде аргона (см. рисунок, б) последующим плакированием (см. рисунок, в). Согласно рисунку, в на поверхностях частиц при плакировании порошков формируется сплошное покрытие (отдельные его микроучастки выкрошились при подготовке шлифов). Массовое содержание Ni-P в виде плакирующей оболочки составляет 30–40 %.



Микроструктура композиционного порошка  $Al_2O_3+30\%TiO_2+12,5\%MoS_2$ , полученных методом СВС:

а – после дробления ( $\times 200$ ); б – после сфероидизации ( $\times 400$ ); в – после плакирования ( $\times 400$ )

Покрyтия наносили на установке плазменно-го напыления на воздухе APS фирмы «Плазма-Техник АГ» на режимах, приведенных в табл. 1. Испытания на трение и износ проводились на машине трения СМЦ-2 по схеме: колодки с покрытием – чугунный ролик (СЧ24-44), колодки с покрытием – азотированная сталь (38ХЮА).

Триботехнические испытания проводились в условиях трения со смазкой и в отсутствие смазочного материала при нагрузке в паре трения 5 МПа в течение 10 часов. Данные параметров трения и износа покрытий из стандартных порошков и полученных по разработанному способу приведены в табл. 2.

Таблица 1

**Режимы плазменного напыления**

Распыляемый материал	Режимы напыления				
	Ток дуги плазмотрона, А	Напряжение дуга, В	Дистанция напыления, мм	Расход плазмообразующего газа (водород), л/мин	Расход распыляемого порошка, кг/ч
Ni80Cr20+12,5%MoS <sub>2</sub> +55%TiC	400	75	120	10	3,0
Ni80Cr20+12,5%CaF <sub>2</sub> +55%TiC	400	75	120	10	3,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +30%TiO <sub>2</sub> +12,5%MoS <sub>2</sub>	450	80	110	12	3,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +30%TiO <sub>2</sub> +12,5%CaF <sub>2</sub>	450	80	110	12	3,5

Расход плазмообразующего газа (аргон) 50 л/мин.

Таблица 2

**Трение и износ покрытий по чугуну и стали**

Способ получения материала	Трение по чугуну				Трение по 38ХЮА Ст45			
	Трение со смазкой		Сухое трение		Трение со смазкой		Сухое трение	
	Износ покрытия, мкм	Коэффициент трения	Износ покрытия, мкм	Нагрузка задира, кг	Износ покрытия, мкм	Коэффициент трения	Износ покрытия, мкм	Нагрузка задира, кг
Ni80Cr20+12,5% MoS <sub>2</sub> +55%TiC	1,2	0,011	10,2	5,8	1,9	0,03	6,1	6,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +30%TiO <sub>2</sub> +12,5%MoS <sub>2</sub>	0,9	0,008	7,9	6,9	1,6	0,02	4,9	8,1

**Выводы**

Применение СВС-порошков для нанесения на изнашиваемые поверхности деталей путем плазменного напыления обеспечивает регулирование структурообразования и получение износостойких поверхностных слоев покрытий в сочетании с повышенной когезионной и адгезионной прочностью напыленного материала. Разработана технология получения композиционного материала на основе многофунк-

циональной оксидной керамики с включениями твердой смазки, который обладает хорошими технологическими характеристиками, устойчив к поддержанию химического состава в процессе плазменного напыления и способен формировать покрытия с высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения. Плазменные покрытия, полученные из порошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-30%TiO<sub>2</sub>-12,5%MoS<sub>2</sub>, изготовленного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, имеют в 1,2 раза больше износостой-

кость при трении со смазкой и в 1,3 раза – при сухом трении по чугуно и стали, чем покрытие, полученное из порошка Ni80Cr20-12,5%MoS<sub>2</sub>-55%Ti. Таким образом, предложенный способ изготовления композиционного порошка на основе многофункциональной оксидной керамики позволяет повысить износостойкость покрытий.

### Список литературы

1. Амелин Д.В., Рыморев Е.В. Новые способы восстановления и упрочнения деталей машин. – М.: Агропромиздат, 1987. – 151 с.
2. Цеев Н.А., Козелкин В.В., Гуров А.А. Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме: справочник. – М.: Машиностроение, 1991. – 188 с.
3. Брейтуэйт Е.Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия / пер. с англ. С.Д. Ключнев; под ред. В.В. Сеницына. – М.: Химия, 1967. – 320 с.
4. Crankshaft repaired at 30 % saving // *Welding Journal*. – 1999. – Vol. 58, № 2. – P. 710–715.
5. Горик П.Н., Норев В.А., Рогов Н.А. Плазменное напыление износостойких и антифрикционных покрытий // Автоматизация проектирования и производства изделий в машиностроении: тезисы докладов V международной научно-практической конференции, 14–17 мая 1996 г. – Луганск: Изд-во ВУГУ, 1996. – С. 196–206.
6. Ильющенко А.Ф., Оковитый В.А., Шевцов А.И. Формирование износостойких плазменных покрытий на основе композиционных самосмазывающихся материалов. – Минск: Беспринт, 2005. – 253 с.
7. Оковитый В.А. Плазменные износостойкие покрытия с включением твердой смазки // Сварочное производство. – 2002. – № 6. – С. 41–43.
8. Okovityi V.A. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant // *Welding International*. – 2002. – Vol. 16, iss. 11. – P. 918–920. – doi 10.1080/09507110209549638.
9. Получение композиционного керамического материала для нанесения износостойких покрытий / В.А. Оковитый, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, Ф.И. Пантелеенко, В.В. Оковитый // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Белорусская наука, 2008. – Вып. 31. – С. 156–162.
10. Керамический материал системы «оксид титана – оксид алюминия – твердая смазка» / В.А. Оковитый, О.Г. Девойно, А.Ф. Пантелеенко, В.В. Оковитый // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2011. – № 1. – С. 16–20.
11. Роль адгезии смазочного масла при граничной смазке / А.И. Шевцов, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко, В.М. Изойтко, К.В. Буйкус // Трение и износ. – 1998. – Т. 19, № 3. – С. 350–354.
12. Исследование процессов трения и изнашивания газотермических композиционных покрытий, обработанных импульсами плазменной струи / А.И. Шевцов, А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, Ю.С. Фень, А.С. Козорез // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Тонпик, 2006. – Вып. 29. – С. 243–248.
13. Исследование параметров обработки импульсным лазером плазменных износостойких покрытий из плакированных композиционных порошков / А.И. Шевцов, А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, О.Г. Девойно, А.Н. Чумаков, Н.А. Босак // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Белорусская наука, 2009. – Вып. 32. – С. 194–199.
14. Aspects of friction surfaces failure and prospects of strengthening of tribocouplings by gas-thermal spraying of composite self-lubricating coatings / A. Ilyushchenko, A. Shevtsov, I. Smurov, M. Ignatiev, E. Kovaliov // Proceedings of the 10th International Baltic Conference “Materials Engineering & Balttrib’2001”, 27–28 September 2001, Jūrmala, Latvia. – Riga, 2001. – P. 142–147.
15. К вопросу оптимизации технологических параметров газотермического напыления защитных покрытий / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый, Г.Ф. Громыко // Сборник докладов 8 международного симпозиума «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка», Минск, 10–12 апреля 2013 г.: в 2 ч. – Минск: Беларуская навука, 2013. – Ч. 2. – С. 239–245.

**OBRABOTKA METALLOV**

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(67), April – June 2015, Pages 39–45

The technology of producing a composite material based on a multifunctional oxide ceramics

**Okovity V.A.**, Ph.D. (Engineering), Leading Researcher, e-mail: vasil\_ok@inbox.ru

**Panteleenko F.I.**, D.Sc. (Engineering), Professor, Corresponding Member, National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: panteleyenkofi@mail.ru

**Talako T.L.**, Ph.D. (Engineering), Leading Researcher, e-mail: talako@tut.by

**Panteleenko A.F.**, Scientific Associate, e-mail: alex\_1895@mail.ru

Belarussian National Technical University, 65 Nezavisimosty avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus

**Abstract**

The synthesis of composite SHS powders with components of solid lubricant is described. The powders of the following composition:  $\text{Al}_2\text{O}_3+30\%\text{TiO}_2+12.5\%\text{MoS}_2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3+30\%\text{TiO}_2+12.5\%\text{CaF}_2$  were investigated. The synthesis of compositions was carried out in a reactor using self-propagation mode without supply of energy from an external source in a nitrogen-oxygen atmosphere with an oxygen content of 10...25 wt.% and a pressure of 0.1...0.9 MPa. Such atmosphere is needed for the oxidation reaction of titanium powder. For spheroidization particles of the composite powder were added into the plasma jet and sprayed into a steel cylinder with a length of 1 m filled with argon. The degree of spheroidization was determined using the form factor of the particles by optical metallography. The power of the plasma jet was varied from 30 to 40 kW. The resulting powders are characterized by a complex geometric shape and the development of surface relief of the particles. Application of SHS powders, in contrast to the agglomerates, allows forming high-density coating of eutectic composition promoting improvement physical and mechanical properties. Parameters of friction and wear coatings consisting of carbide ceramic powders and ceramic oxide powders obtained by self-propagating high-temperature synthesis are investigated. The coatings obtained of powder  $\text{Al}_2\text{O}_3-30\% \text{TiO}_2-12.5\% \text{MoS}_2$ ; produced by self-propagating high-temperature synthesis, are 1.2 times more wear-resistant with the lubricant and 1.3 times - under dry friction for cast iron and steel than the coating obtained from the powder  $\text{Ni80Cr20-12.5\% MoS}_2-55\% \text{TiC}$ .

**Keywords:**

composite powders, solid lubricant, synthesis, spheroidization of particles, plasma jet, powders investigation.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-39-45

**References**

1. Amelin D.V., Rymorov E.V. *Novye sposoby vosstanovleniya i uprochneniya detalei mashin* [The new methods of reducing and hardening of machine components]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1987. 151 p.
2. Tseev N.A., Kozelkin V.V., Gurov A.A. *Materialy dlya uzlov sukhogo treniya, rabotayushchikh v vakuume. Spravochnik* [The materials for dry friction units that operated in vacuum. Reference book]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 188 p.
3. Braithwaite E.R. *Solid Lubricants and Surfaces*. 1<sup>st</sup> ed. Oxford, Pergamon Press, 1964. 296 p. ISBN-10: 1483124398, ISBN-13: 978-1483124391 (Russ. ed. Breitung E.R. *Tverдые смазочные материалы и антифрикционные покрытия*. Translated from English S.D. Klyushnev. Ed. by V.V. Sinitsyna. Moscow, Khimiya Publ., 1967. 320 p.).
4. Crankshaft repaired at 30 % saving. *Welding Journal*, 1999, vol. 58, no. 2, pp. 710–715.
5. Gorik P.N., Norov V.A., Rogov N.A. [The plasma spraying of wear-resistant and antifriction coatings]. *Tezisy dokladov 5 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Avtomatizatsiya proektirovaniya i proizvodstva izdelii v mashinostroenii"* [Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference "The automation of design and producing of product in mechanical engineering"]. Lugansk, VUGU Publ., 1996, pp. 196–206. (In Russian)
6. Ilyuschenko A.F., Okovity V.A., Shevtsov A.I. *Formirovanie iznosostoikikh plazmennyykh pokrytii na osnove kompozitsionnykh samosmazyvayushchikhsya materialov* [The creation of wear-resistant plasma coatings on the base of composite self-lubricating materials]. Minsk, Besprint Publ., 2005. 253 p.

7. Okovity V.A. Plazmennye iznosostoikie pokrytiya s vklyucheniem tverdoi smazki [Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant]. *Svarochnoe Proizvodstvo – Welding International*, 2002, vol. 49, iss. 6, pp. 41–43. (In Russian)

8. Okovityi V.A. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant. *Welding International*, 2002, vol. 16, iss. 11, pp. 918–920. doi: 10.1080/09507110209549638

9. Okovity V.A., Il'yushchenko A.F., Shevtsov A.I., Panteleenko F.I., Okovity V.A. [The production of composite ceramic material for wear-resistant coatings deposition]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi "Poroshkovaya metallurgiya"* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB "Powder Metallurgy"], Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2008, iss. 31, pp. 156–162. (In Russian)

10. Okovity V.A., Devoino O.G., Panteleenko A.F., Okovity V.V. Keramicheskii material sistemy «oksid titana – oksid alyuminiya – tverdaya smazka» [The ceramic material system "titanium oxide – aluminum oxide – solid lubricant"]. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Belarusian National Technical University*, 2011, no. 1, pp. 16–20.

11. Shevtsov A.I., Ivashko V.S., Ilyuschenko A.Ph., Izoitko V.M., Buykus K.V. Rol' adgezii smazochnogo masla pri granichnoi smazke [Role of adhesion of lubricating oil during friction at boundary lubrication]. *Trenie i iznos – Journal of Friction and Wear*, 1998, vol. 19, no. 3, pp. 350–354. (In Russian)

12. Shevtsov A.I., Ilyuschenko A.F., Okovity V.A., Fen' Yu.S., Kozorez A.S. [The study of friction and wear of gas-thermal composite coatings treated with pulses of plasma jet]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi "Poroshkovaya metallurgiya"* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB "Powder Metallurgy"], 2006, iss. 29, pp. 243–248. (In Russian)

13. Shevtsov A.I., Ilyuschenko A.F., Devoino O.G., Okovity V.A., Chumakov A.N., Bosak N.A. [Investigation of pulsed laser parameters when processing plasma wear-resistant coatings made of the clad composite powders]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi "Poroshkovaya metallurgiya"* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB "Powder Metallurgy"], 2009, iss. 32, pp. 194–199. (In Russian)

14. Ilyuschenko A., Shevtsov A., Smurov I., Ignatiev M., Kovaliov E. Aspects of friction surfaces failure and prospects of strengthening of tribocouplings by gas-thermal spraying of composite self-lubricating coatings. *Proceedings of the 10th International Baltic Conference "Materials Engineering & Baltrib'2001"*, 27–28 September 2001, Jūrmala, Latvia. Riga, 2001, pp. 142–147.

15. Ilyuschenko A.F., Shevtsov A.I., Okovity V.A., Gromyko G.F. [On the question of optimization of process parameters of thermal spraying coatings]. *Sbornik dokladov 8-go mezhdunarodnogo simpoziuma "Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverkhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy. Svarka"*. V 2 ch. [Proceedings of 8th International Symposium "Powder metallurgy: surface engineering, new powder composite materials. Welding", Minsk, April 10–12, 2013]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2013, pt. 2, pp. 239–245. (In Russian)

Received 6 April 2015

Revised 6 May 2015

Accepted 15 May 2015

# ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

*В.А. ОКОВИТЫЙ, канд. техн. наук,  
А.Ф. ПАНТЕЛЕЕНКО, науч. сотрудник  
(БНТУ, г. Минск)*

Поступила 6 апреля 2015  
Рецензирование 6 мая 2015  
Принята к печати 15 мая 2015

**Пантелеенко А.Ф.** – 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65,  
Белорусский национальный технический университет,  
e-mail: alex\_1895@mail.ru

Проведена оптимизация параметров APS процесса для материалов  $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$ ,  $Al_2O_3-TiO_2-12\%(CaF_2-Ni)$ , полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием и методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Напыление износостойких покрытий из порошков оксид алюминия – оксид титана – твердая смазка, полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием и методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза проводилось на установке плазменного напыления на воздухе. Такие покрытия характеризуются повышенной пластичностью, коррозионной стойкостью и стойкостью по отношению к ударным нагрузкам, а также обладают меньшими значениями пористости, равномерностью стальной структуры и изотропностью свойств. Оптимизация параметров напыления проводилась на основании получения максимального коэффициента использования материала и минимальной пористости покрытия.

**Ключевые слова:** износостойкие покрытия, оксидная керамика, твердая смазка, плазменное напыление, оптимизация параметров, коэффициент использования материала, пористость покрытия.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-46-54

## Введение

Очевидно, что повышение надежности и долговечности деталей машин – это важнейшие факторы, обеспечивающие устойчивую работу машин и механизмов. Однако изготавливать детали полностью из материалов, обладающих высокой износостойкостью, прочностью, сложно и трудоемко, а в ряде случаев экономически или технологически нецелесообразно. В связи с этим за последнее время в технике значительное развитие получили методы нанесения покрытий, позволяющие создавать на поверхности детали покрытия (слои) с заданным комплексом физико-механических свойств, защищающих поверх-

ность детали от внешних факторов [1–4]. Разработка и создание композиционных керамических материалов обусловлены необходимостью улучшения свойств износостойких плазменных покрытий, так как в отличие от механических смесей порошков только в композиционных порошках могут одновременно находиться в заданном состоянии разнородные по физическому и химическому составу вещества, элементы, соединения, что дает возможность достигать новых эффектов при использовании таких материалов для нанесения покрытий. Необходимо также отметить, что применяемая технология изготовления композиционного порошка должна также обеспечивать придание частицам свойств, спо-



собствующих формированию заданной структуры покрытий. Наиболее широкое применение для нанесения керамических покрытий, в том числе из материалов на основе оксида алюминия-оксида титана, получил метод плазменного напыления [3–6].

Покрытия на основе оксида алюминия-оксида титана с добавками твердой смазки отличаются от покрытий из чистых оксидов лучшей пластичностью и повышенной стойкостью по отношению к ударным нагрузкам, а также обладают меньшими значениями пористости, равномерностью структуры и изотропностью свойств [7–11]. Снижение пористости покрытий системы объясняется тем, что при введении в высокотемпературную газовую струю композиционного материала в первую очередь плавится твердая смазка и обволакивает зерна оксида. Так как температура плавления твердых смазок меньше температуры плавления оксидов, то такое распределение компонентов в частице способствует лучшему «заплавлению» пор между частицами оксидов в покрытии, вследствие чего пористость покрытий уменьшается [12]. Работоспособность нанесенных материалов определяется их структурой. Последняя в значительной степени зависит от оптимизации технологических параметров напыления и последующей обработки покрытий [13–15].

Цель нашего исследования – проведение оптимизации параметров плазменного напыления на воздухе износостойких покрытий на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки, полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием и методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза на основании получения максимального коэффициента использования материала и минимальной пористости покрытия.

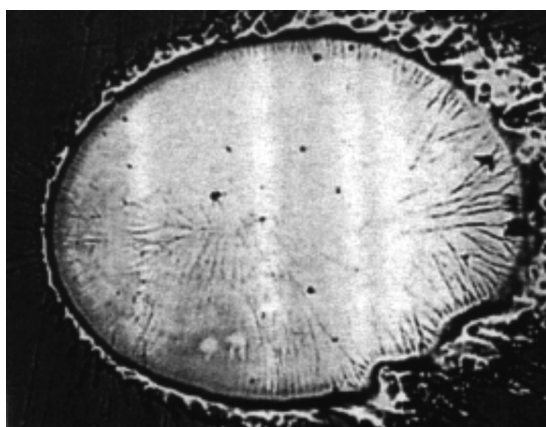
## Результаты и обсуждение

Для повышения антифрикционных характеристик керамических износостойких плазменных покрытий в условиях высокотемпературной коррозии необходимо использование оксидной керамики, в частности композиционного керамического материала на основе оксид алюминия – оксид титана – плакированная никелем твердая

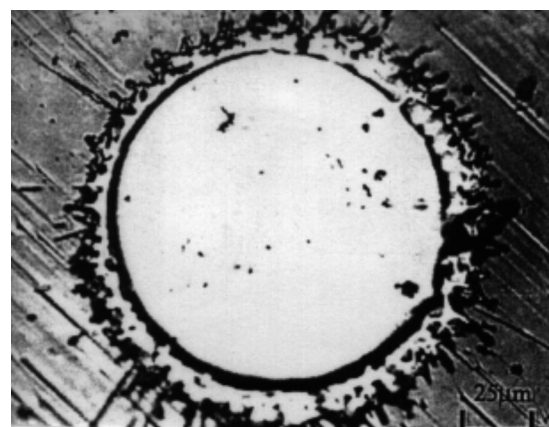
смазка [6–8]. Такие покрытия характеризуются повышенной пластичностью, коррозионной стойкостью и стойкостью по отношению к ударным нагрузкам, а также обладают меньшими значениями пористости, равномерностью структуры и изотропностью свойств. Необходимо также отметить, что применяемая технология изготовления композиционного порошка должна также обеспечивать придание частицам свойств, способствующих формированию заданной структуры покрытий. Содержание аморфной фазы в плазменных керамических покрытиях можно существенно изменить параметрами напыления или последующей термической обработкой. Повышенная прочность достигается усилением когезионных и адгезионных связей покрытия. Проводили плазменное напыление на основу из углеродистой стали, подвергнутую струйно-абразивной обработке, износостойких покрытий из порошков оксидной керамики с введением плакированной твердой смазки следующих составов: композиция  $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$ ; композиция  $Al_2O_3-TiO_2-12\%(CaF_2-Ni)$ . Для плазменного напыления использовали порошки фракции  $-100...+50$  мкм. Напыление износостойких покрытий из порошков оксид алюминия – оксид титана – твердая смазка, полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием и методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) проводилось на установке плазменного напыления УПУ-3Д. Поверхность, подлежащая напылению, предварительно обрабатывалась электрокорундом циркониевым с размером зерен  $0,1...0,2$  мм. Толщина слоя  $0,5...0,6$  мм, расход порошка  $3,5$  кг/ч. Исследовалось влияние величины тока ( $I$ ), дистанции напыления и дисперсности порошков на свойства напыленных покрытий и коэффициент использования материала (КИМ). Оптимизация параметров APS процесса проводилась для материалов  $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$ , полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием и методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. На первом этапе оптимизация проводилась плазменным напылением покрытий на полированные пластины металла с большой скоростью передвижения плазмотрона («сплэт-тест»),

в результате на подложке оказываются одиночные частицы материала (рис. 1). При рассмотрении в микроскоп можно заметить расплавленные, нерасплавленные или перегретые частицы. Затем на основании результатов были выбраны предварительные режимы напыления. Оптимизация параметров напыления проводилась на основании получения максимального коэффициента использования материала и минимальной пористости покрытия. КИМ и пористость определялись при различных значениях тока (400, 450, 500, 550 А), на постоянной дистанции напыления ( $L = 100$  мм)

(рис. 2 и 3). Затем при постоянных значениях силы тока ( $I = 400$  А) и значении расхода плазмообразующего газа азота для СВС-порошков 55 л/мин, для агломерированных порошков 50 л/мин, изменялось значение дистанции напыления  $L$  ( $L = 80, 90, 100, 110, 120$  мм) (рис. 4). Для выявления влияния гранулометрического состава на свойства износостойких покрытий (твердость, прочность сцепления, коэффициент использования материала, пористость) были напылены серии образцов композиционными порошками фракциями  $<50, 50...100, 100...200, >200$  (рис. 6–9).



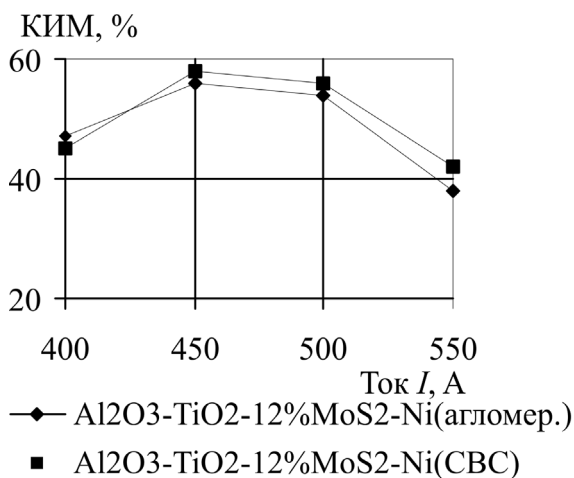
а



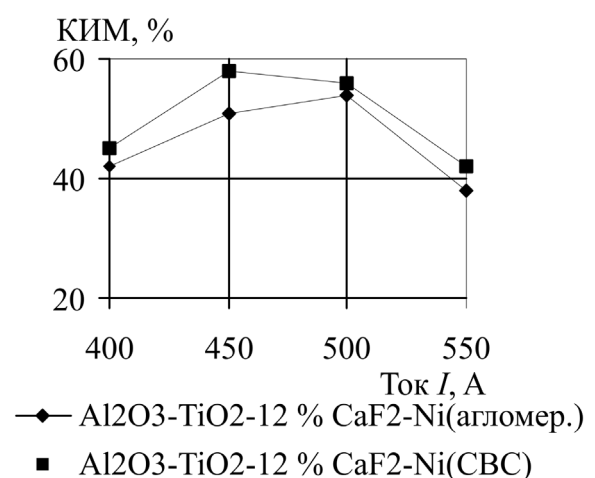
б

Рис. 1. «Сплэт-тест» порошков:

а –  $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$ , полученный методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием; б –  $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$ , полученный методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза



а



б

Рис. 2. Влияние тока  $I$  на величину КИМ при дистанции напыления  $L = 100$  мм:

а –  $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$ ; б –  $Al_2O_3-TiO_2-12\%(CaF_2-Ni)$

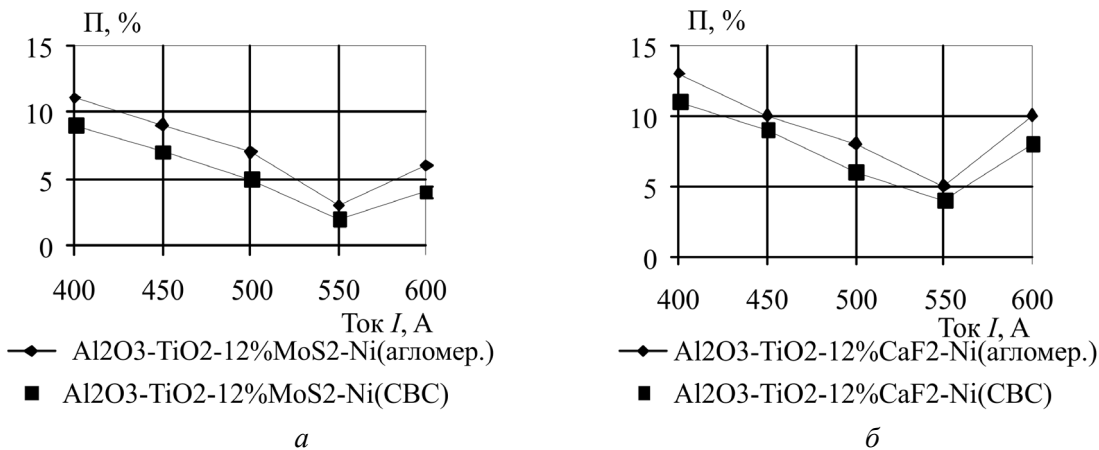


Рис. 3. Влияние тока I на пористость покрытия при дистанции напыления L = 100 мм:

а – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-12%(MoS<sub>2</sub>-Ni); б – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-12%(CaF<sub>2</sub>-Ni)

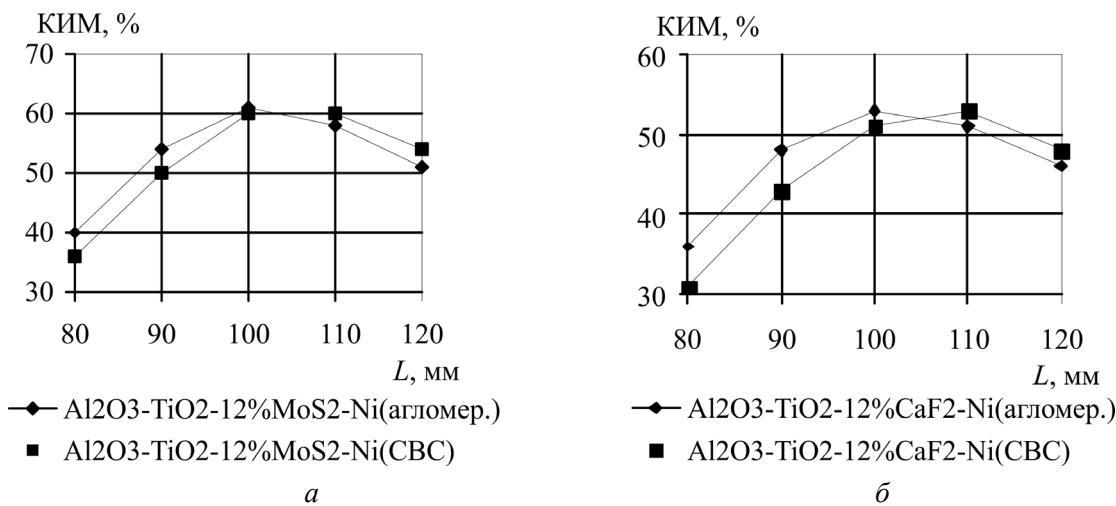


Рис. 4. Влияние дистанции напыления на величину КИМ (I = 500 А, расход плазмообразующего газа азота для CBC-порошков 55 л/мин, для агломерированных порошков 50 л/мин):

а – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-12%(MoS<sub>2</sub>-Ni); б – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-12%(CaF<sub>2</sub>-Ni)

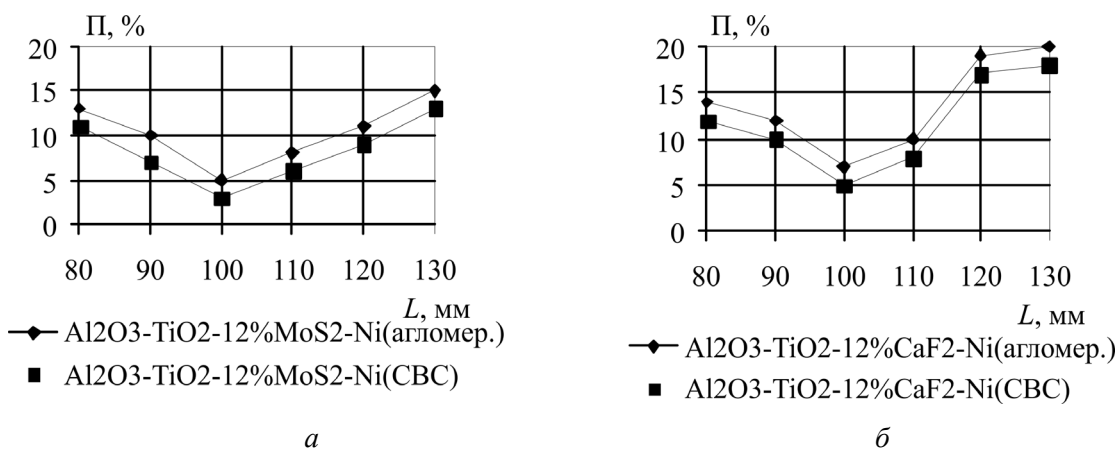


Рис. 5. Влияние дистанции напыления на величину пористости (I = 500 А, расход плазмообразующего газа азота для CBC-порошков 55 л/мин, для агломерированных порошков 50 л/мин):

а – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-12%(MoS<sub>2</sub>-Ni); б – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-12%(CaF<sub>2</sub>-Ni)

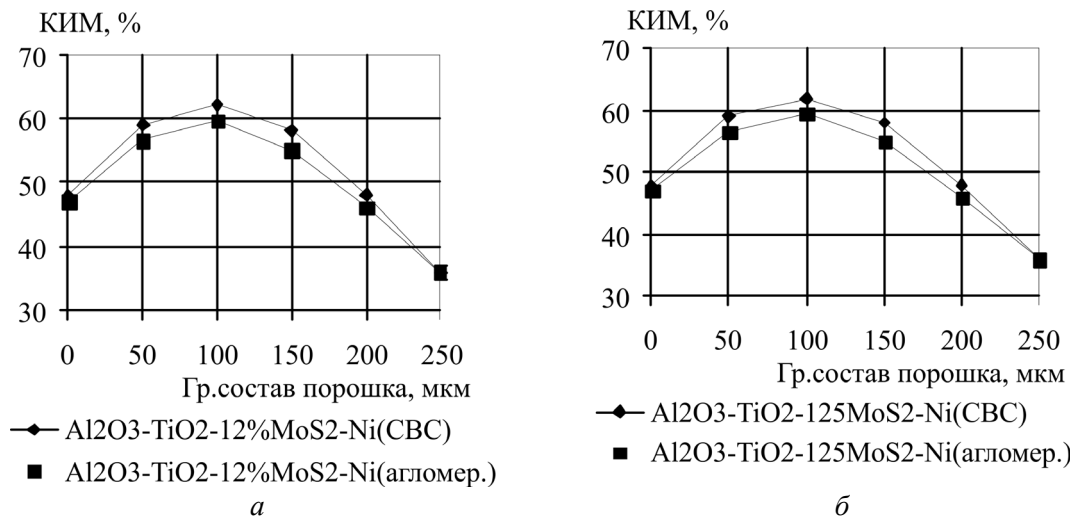


Рис. 6. Влияние гранулометрического состава порошка на коэффициент использования материала:

*a* – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-12%(MoS<sub>2</sub>-Ni); *б* – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-12%(CaF<sub>2</sub>-Ni)

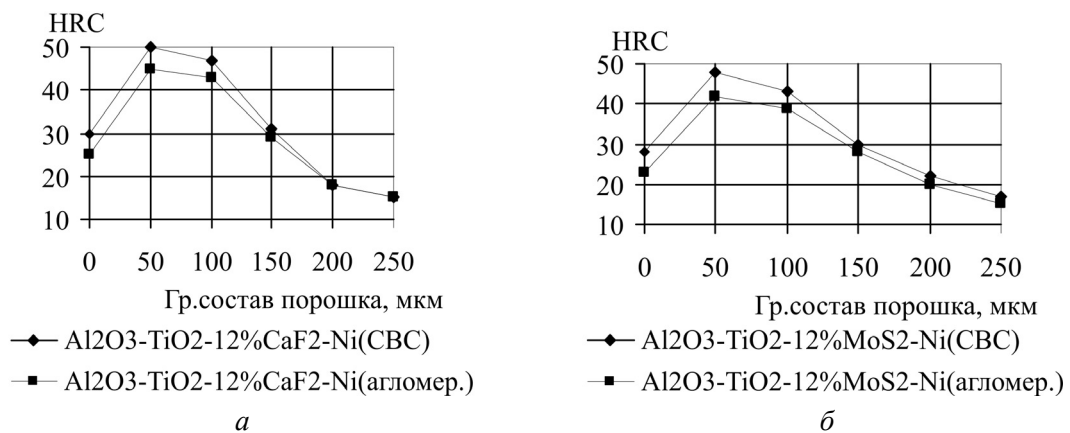


Рис. 7. Влияние гранулометрического состава порошка на твердость покрытия:

*a* – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-12%(MoS<sub>2</sub>-Ni); *б* – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-12%(CaF<sub>2</sub>-Ni)

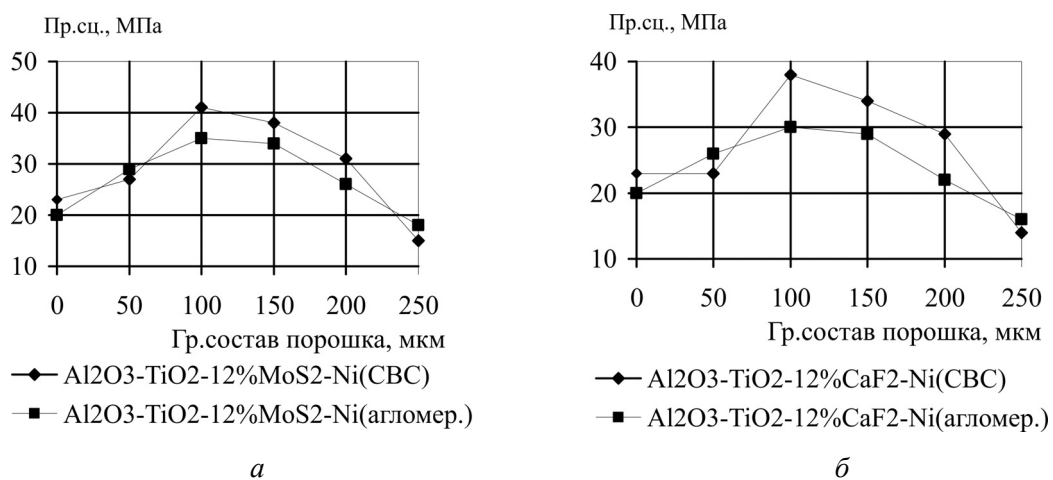


Рис. 8. Влияние гранулометрического состава порошка на прочность сцепления покрытия с основой:

*a* – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-12%(MoS<sub>2</sub>-Ni); *б* – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-12%(CaF<sub>2</sub>-Ni)

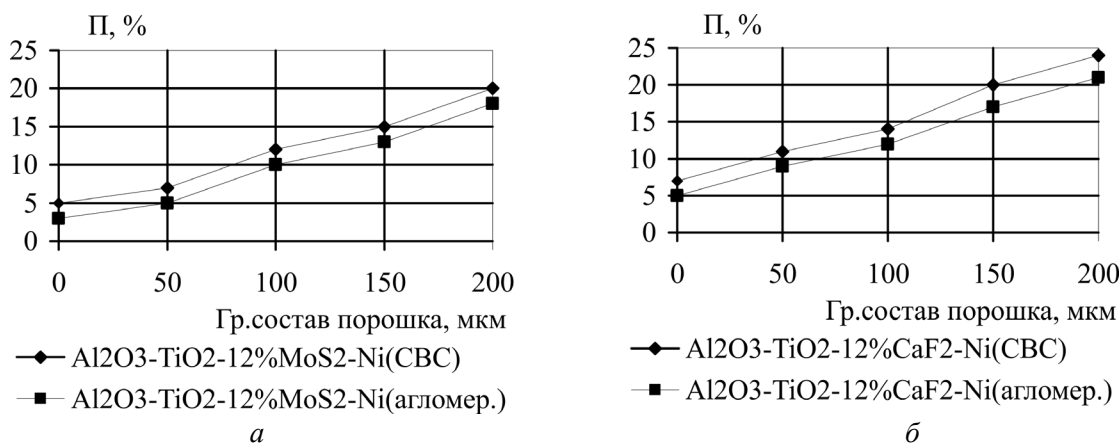


Рис. 9. Влияние гранулометрического состава порошка на пористость покрытия:

*a* – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-12%(MoS<sub>2</sub>-Ni); *б* – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-12%(CaF<sub>2</sub>-Ni)

### Выводы

Для повышения антифрикционных характеристик керамических износостойких плазменных покрытий в условиях высокотемпературной коррозии необходимо использование многофункциональной оксидной керамики, в частности, композиционного керамического материала на основе оксид алюминия – оксид титана – плакированная никелем твердая смазка. Такие покрытия характеризуются повышенной пластичностью, коррозионной стойкостью и стойкостью по отношению к ударным нагрузкам, а также обладают меньшими значениями пористости, равномерностью стальной структуры и изотропностью свойств. Необходимо также отметить, что применяемая технология изготовления композиционного порошка должна также обеспечивать придание частицам свойств, способствующих формированию заданной структуры покрытий. Содержание аморфной фазы в плазменных керамических покрытиях можно существенно изменить параметрами напыления или последующей термической обработкой. Проведена оптимизация параметров APS процесса для материалов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-12%(MoS<sub>2</sub>-Ni), полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием и методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Оптимизация параметров напыления проводилась на основании получения максимального коэффициента использования материала и минимальной пористости покрытия. На оптимальных режимах (расход плазмообразующего газа азота для СВС-порошков

55 л/мин, для агломерированных порошков 50 л/мин, ток 550 А, дистанция напыления 100 мм, фракция порошка 50...100 мкм, расход порошка 3,5 кг/ч, получены покрытия с КИМ 60 %, пористостью 3 %, прочностью сцепления 42 МПа, твердостью 50 HRC.

### Список литературы

1. Ильющенко А.Ф., Оковитый В.А., Шевцов А.И. Формирование износостойких плазменных покрытий на основе композиционных самосмазывающихся материалов. – Минск: Беспринт, 2005. – 253 с.
2. Витязь П.А. Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И. Основы нанесения износостойких, коррозионно-стойких и теплозащитных покрытий. – Минск: Белорусская наука, 2006. – 363 с.
3. Получение композиционного керамического материала для нанесения износостойких покрытий / В.А. Оковитый, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, Ф.И. Пантелеенко, В.В. Оковитый // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Белорусская наука, 2008. – Вып. 31. – С. 156–162.
4. Оковитый В.А. Плазменные износостойкие покрытия с включением твердой смазки // Сварочное производство. – 2002. – № 6. – С. 41–43.
5. Триботехнические испытания образцов аморфизированных плазменных композиционных покрытий с включением твердой смазки / В.А. Оковитый, А.И. Шевцов, А.Ф. Ильющенко, О.Г. Девойно, Ф.И. Пантелеенко, В.В. Оковитый // Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. – 2008. – Вып. 1. – С. 2–6.
6. Керамический материал системы «оксид титана – оксид алюминия – твердая смазка» / В.А. Оковитый, О.Г. Девойно, А.Ф. Пантелеенко, В.В. Оковитый //

Вестник Белорусского национального технического университета. – 2011. – № 1. – С. 16–20.

7. Исследование структуры плазменных износостойких покрытий на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый, Т.Л. Талако, О.Г. Девойно, А.Ф. Пантелеенко, В.В. Оковитый // Наука и техника. – Минск, 2013. – № 5. – С. 15–21.

8. Процессы плазменного нанесения покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко, С.П. Кундас, А.П. Достанко, E. Lugscheider, U. Eritt. – Минск: Научный центр исследований политики и бизнеса «Армита-Маркетинг, Менеджмент», 1999. – 543 с. – ISBN 985-6320-58-5.

9. Aspects of friction surfaces failure and prospects of strengthening of tribocouplings by gas-thermal spraying of composite self-lubricating coatings / A. Ilyushenko, A. Shevtsov, I. Smurov, M. Ignatiev, E. Kovaliov // Proceedings of the 10th International Baltic Conference “Materials Engineering & Baltrib’2001”, 27–28 September 2001, Jūrmala, Latvia. – Riga, 2001. – P. 142–147.

10. К вопросу оптимизации технологических параметров газотермического напыления защитных покрытий / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый, Г.Ф. Громыко // Сборник докладов 8 международного симпозиума «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка», Минск, 10–12 апреля 2013 г.: в 2 ч. – Минск: Беларуская навука, 2013. – Ч. 2. – С. 239–245.

11. Шаронов Е.А. Методика испытания на срез покрытий с повышенной прочностью // Пленки и покрытия 2001: труды 6 Международной конференции, 3–5 апреля 2001 г. – СПб., 2001. – С. 618–620.

12. Калита В.И., Комлев Д.И. К вопросу о механизме формирования аморфной структуры в металлических сплавах при плазменном напылении // Металлы. – 2003. – № 6. – С. 30–37.

13. Роль адгезии смазочного масла при граничной смазке / А.И. Шевцов, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко, В.М. Изойтко, К.В. Буйкус // Трение и износ. – 1998. – Т. 19, № 3. – С. 350–354.

14. Исследование процессов трения и изнашивания газотермических композиционных покрытий, обработанных импульсами плазменной струи / А.И. Шевцов, А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, Ю.С. Фень, А.С. Козорез // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Тонпик, 2006. – Вып. 29. – С. 243–248.

15. Исследование параметров обработки импульсным лазером плазменных износостойких покрытий из плакированных композиционных порошков / А.И. Шевцов, А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, О.Г. Девойно, А.Н. Чумаков, Н.А. Босак // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Беларуская навука, 2009. – Вып. 32. – С. 194–199.

## OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(67), April – June 2015, Pages 46–54

### Optimization of the deposition process of wear-resistant coatings based on multifunctional oxide ceramics

Okovity V.A., Ph.D. (Engineering), Leading Researcher, e-mail: vasil\_ok@inbox.ru

Panteleenko A.F., Scientific Associate, e-mail: alex\_1895@mail.ru

Belarussian National Technical University, 65 Nezavisimosty avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus

#### Abstract

The optimization of the process parameters for the APS materials  $Al_2O_3$ - $TiO_2$ -12% ( $MoS_2$ -Ni),  $Al_2O_3$ - $TiO_2$ -12% ( $CaF_2$ -Ni), obtained by agglomerating finely dispersed blend followed by high temperature sintering and method of self-propagating high-temperature synthesis is made. Spraying of the wear resistant coatings of aluminum oxide – titanium oxide – solid lubricant obtained by the method of agglomerating finely dispersed blend, followed by high temperature sintering and SHS was carried out on a plasma-spraying in air. Such coatings are characterized by high ductility, corrosion resistance and shock resistance, and also have lower values of porosity, uniform steel structure and isotropic properties. Optimization of parameters of the deposition was carried out on the basis of obtainment the

maximum utilization factor of the material and the minimum porosity of the coating. The effect of current, spraying distance, the powder particle size distribution, a method for manufacturing the powder utilization factor and the porosity of the coating material, as well as the influence of particle size distribution on adhesion strength of the coating to the substrate and coating hardness is examined. The results of these coatings studies led to the conclusion that the technology for manufacturing powder has a dominant influence on the formation of the coating structure. The use of SHS powders, in contrast to the agglomerates, allows creating high-density coating of eutectic composition, enhancing physical and mechanical properties.

### Keywords:

wear-resistant coatings, oxide ceramics, solid lubricant, plasma-spraying, optimization parameters utilization factor material, coating porosity.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-46-54

### References

1. Ilyushchenko A.F., Okovity V.A., Shevtsov A.I. *Formirovanie iznosostoikikh plazmennykh pokrytii na osnove kompozitsionnykh samosmazyvayushchikhsya materialov* [The creation of wear-resistant plasma coatings on the base of composite self-lubricating materials]. Minsk, Besprint Publ., 2005. 253 p.
2. Vityaz' P.A. Ilyushchenko A.F., Shevtsov A.I. *Osnovy naneseniya iznosostoikikh, korrozionnostoikikh i teplo-zashchitnykh pokrytii* [The principles of wear-resistant, corrosion-resistant, heat-reflecting coatings deposition]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2006. 363 p.
3. Okovity V.A., Il'yushchenko A.F., Shevtsov A.I., Panteleenko F.I., Okovity V.A. [The production of composite ceramic material for wear-resistant coatings deposition]. *Respublikanskii mezhdvdomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi "Poroshkovaya metallurgiya"* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB "Powder Metallurgy"], 2008, iss. 31, pp. 156–162. (In Russian)
4. Okovity V.A. Plazmennye iznosostoikie pokrytiya s vklyucheniem tverdoi smazki [Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding International*, 2002, vol. 49, iss. 6, pp. 41–43. (In Russian)
5. Okovity V.A., Shevtsov A.I., Ilyushchenko A.F., Devoino O.G., Panteleenko F.I., Okovity V.V. Tribotekhnicheskie ispytaniya obraztsov amorfizirovannykh plazmennykh kompozitsionnykh pokrytii s vklyucheniem tverdoi smazki [The tribotechnical tests of samples of plasma composite coatings with inclusion of hard lubrication that was amorphousized]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie – Bulletin of Brest State Technical University. Mechanical Engineering*, 2008, iss. 1, pp. 2–6.
6. Okovity V.A., Devoino O.G., Panteleenko A.F., Okovity V.V. Keramicheskii material sistemy «oksid titana – oksid alyuminiya – tverdaya smazka» [The ceramic material system "titanium oxide – aluminum oxide – solid lubricant"]. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Belarusian National Technical University*, 2011, no. 1, pp. 16–20.
7. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Talako T.L., Devoino O.G., Panteleenko A.F., Okovity V.V. Issledovanie struktury plazmennykh iznosostoikikh pokrytii na osnove oksidnoi keramiki s vklyucheniyami tverdoi smazki [Investigation of plasma wear resistance coating structure on basis of oxide ceramics with inclusions of solid lubrication]. *Nauka i tekhnika – Science and Technique*, 2013, no. 5, pp. 15–21. (In Russian)
8. Ilyushchenko A.F., Kundas S.P., Dostanko A.P., Lugscheider E., Eritt U. *Protsessy plazmennogo naneseniya pokrytii: teoriya i praktika* [The processes of coating plasma spraying: theory and practice]. Minsk, "Armita-Marketing, Menedzhment" Publ., 1999. 543 p. ISBN 985-6320-58-5
9. Ilyushchenko A., Shevtsov A., Smurov I., Ignatiev M., Kovaliov E. Aspects of friction surfaces failure and prospects of strengthening of tribocouplings by gas-thermal spraying of composite self-lubricating coatings. *Proceedings of the 10th International Baltic Conference "Materials Engineering & Baltrib'2001"*, 27–28 September 2001, Jūrmala, Latvia. Riga, 2001, pp. 142–147.
10. Ilyushchenko A.F., Shevtsov A.I., Okovity V.A., Gromyko G.F. [On the question of optimization of process parameters of thermal spraying coatings]. *Sbornik dokladov 8-go mezhdunarodnogo simpoziuma "Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverkhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy. Svarka"*. V 2 ch. [Proceedings of 8th International Symposium "Powder metallurgy: surface engineering, new powder composite materials. Welding", Minsk, April 10–12, 2013. In 2 pt.]. Minsk, Belaruskaja nauka Publ., 2013, pt. 2, pp. 239–245. (In Russian)
11. Sharonov E.A. [Test Methods Shear coatings with improved strength]. *Trudy 6 Mezhdunarodnoi konferentsii "Plenki i pokrytiya 2001"* [Proceedings of the 6th International Conference "Films and Coatings 2001"]. Saint Petersburg, 3–5 April 2001, pp. 618–620.

12. Kalita V.I., Komlev D.I. K voprosu o mekhanizme formirovaniya amorfnoi struktury v metallicheskih splavakh pri plazmennom napylenii [To problem on mechanism of amorphous structure formation in metal alloys while making plasma spraying]. *Metally – Russian Metallurgy*, 2003, no. 6, pp. 30–37. (In Russian)
13. Shevtsov A.I., Ivashko V.S., Ilyuschenko A.Ph., Izoitko V.M., Buykus K.V. Rol' adgezii smazochnogo masla pri granichnoi smazke [Role of adhesion of lubricating oil during friction at boundary lubrication]. *Trenie i iznos – Journal of Friction and Wear*, 1998, vol. 19, no. 3, pp. 350–354. (In Russian)
14. Shevtsov A.I., Ilyuschenko A.F., Okovity V.A., Fen' Yu.S., Kozorez A.S. [The study of friction and wear of gas-thermal composite coatings treated with pulses of plasma jet]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi “Poroshkovaya metallurgiya”* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB “Powder Metallurgy”], 2006, iss. 29, pp. 243–248. (In Russian)
15. Shevtsov A.I., Ilyuschenko A.F., Devoino O.G., Okovity V.A., Chumakov A.N., Bosak N.A. [Investigation of plasma processing parameters wear resistant clad composite powders]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi “Poroshkovaya metallurgiya”* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB “Powder Metallurgy”], 2009, iss. 32, pp. 194–199. (In Russian)

Received 6 April 2015

Revised 6 May 2015

Accepted 15 May 2015



# ВЛИЯНИЕ ПРОКАТКИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СЛОЕВ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ТИТАНОВЫХ ЗАГОТОВКАХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ\*

*В. В. САМОЙЛЕНКО, аспирант*  
*Д. В. ЛАЗУРЕНКО, канд. техн. наук, доцент*  
*И. А. ПОЛЯКОВ, аспирант*  
*А. А. РУКТУЕВ, аспирант*  
*О. Г. ЛЕНИВЦЕВА, ассистент*  
*В. С. ЛОЖКИН, ассистент*  
(НГТУ, г. Новосибирск)

Поступила 6 апреля 2015

Рецензирование 6 мая 2015

Принята к печати 15 мая 2015

**Самойленко В.В.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: samoylenko.vitaliy@mail.ru

В работе проведены исследования, направленные на оценку влияния прокатки и отжига на структуру и свойства титана ВТ1-0, поверхностно легированного танталом методом вневакуумной электронно-лучевой обработки. Установлено, что электронно-лучевая обработка способствует формированию слоев, характеризующихся наличием дендритной ликвации, которая не устраняется при проведении последующих технологических процессов. Структурные исследования показали, что отжиг прокатанных композиций приводит к преобразованию закаленной игольчатой структуры наплавленных слоев в стабильную, представленную равноосными зернами и пластинами.

Уровень микротвердости поверхностных слоев титана после электронно-лучевой обработки повышается со 165 до 385 НV. Прокатка и отжиг не оказывают существенного влияния на твердость наплавленных слоев, однако влияют на твердость основного металла (титана). Предел прочности титановых образцов после электронно-лучевой обработки практически не изменяется и находится на уровне ~ 420 МПа. Прокатка композиций приводит к наклепу титановых пластин и повышению суммарной прочности материала до 610 МПа, которая снижается в процессе последующего отжига до ~ 450 МПа. При этом во всех случаях пластичность исследуемого материала оказалась ниже пластичности титана ВТ1-0. Наплавленный слой вызывает снижение уровня ударной вязкости титана ВТ1-0 до 55 Дж/см<sup>2</sup>, который еще более существенно снижается после прокатки (до ~40 Дж/см<sup>2</sup>). Последующий отжиг устраняет негативное влияние технологических операций на ударную вязкость материала и способствует ее повышению до ~ 100 Дж/см<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая наплавка, тантал, титан, коррозионная стойкость.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-55-63

## Введение

Во многих случаях задача повышения коррозионной стойкости оборудования, работающего

в условиях воздействия агрессивных сред, является весьма актуальной. Особенно опасным может быть выход из строя оборудования, предназначенного для переработки токсичных отхо-

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-38-20776 мол\_a\_вед.

дов и отработанного ядерного топлива, а также реакторов для производства растворов сильных кислот.

В современной промышленности в качестве материалов, способных противостоять коррозионному разрушению, наиболее широко используются хромоникелевые аустенитные стали [1–3], которые, кроме того, являются надежными конструкционными материалами. Однако в условиях воздействия кипящих концентрированных кислот и растворов на их основе уровень коррозионной стойкости сталей может оказаться недостаточным. В этом случае высоколегированные сплавы на основе железа могут быть заменены на титановые сплавы [4]. В работах [5–8] было показано, что особенно эффективным является использование сплавов системы «титан-тантал». Так, например, уровень коррозионной стойкости титанового сплава, содержащего 40 % тантала, сопоставим с уровнем коррозионной стойкости технически чистого тантала [2, 5]. Следует отметить, что высокая стойкость к воздействию агрессивных сред может быть также обеспечена сплавами с более низкой концентрацией тантала [6–10].

Несмотря на положительный эффект, который оказывает тантал на коррозионную стойкость титановых сплавов, его широкое применение весьма ограничено, что объясняется высокой стоимостью материала [11]. Кроме того, титановые сплавы, легированные большим количеством тантала, имеют высокую плотность. Таким образом, для обеспечения экономии дорогостоящего тантала без значительного увеличения плотности сплава рациональным решением является поверхностное легирование титана танталом.

В качестве технологии, позволяющей формировать высококачественные коррозионно-стойкие слои системы «титан-тантал», в работе [12] предлагается использовать вневакуумную электронно-лучевую наплавку. Данная технология обеспечивает получение поверхностно легированных слоев на большую глубину (1,5...2 мм) на толстолистовых титановых заготовках. Однако повышенный уровень коррозионной стойкости могут обеспечить и более тонкие покрытия. Снижения толщины легированного слоя можно достичь путем прокатки биметаллической композиции «титан-наплавленный слой». Для пони-

жения уровня напряжений и снятия деформации прокатанной заготовки целесообразно использовать последующий отжиг. Однако влияние данных процессов на наплавленные слои не изучено.

Таким образом, целью данной работы было исследовать структурные преобразования, протекающие в легированном слое и материале основы в процессе прокатки и термической обработки и определить их влияние на механические свойства композиции.

## Материалы и методы исследования

Электронно-лучевая обработка образцов проводилась на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-6 (Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН). Перед наплавкой на пластины из титана VT1-0 размером 100×50×10 мм наносилась порошковая смесь с плотностью насыпки 0,45 г/см<sup>3</sup>. Легирующая порошковая смесь состояла из 51 % (вес.) *Ta* и 18 % (вес.) *Ti*, а также сварочного флюса (23 % (вес.)  $CaF_2$  и 8 % (вес.)  $LiF$ ). Далее пластины с нанесенным порошковым слоем устанавливались на подвижный стол, который поступательно перемещался относительно выпускного отверстия ускорителя со скоростью 10 мм/с. Для увеличения производительности метода на выходе электронного луча устанавливалась электромагнитная развертка, увеличивающая размах области сканирования до 50 мм [13]. Ток пучка составлял 24 мА. Энергия электронов была равна 1,4 МэВ.

После электронно-лучевой обработки титановые заготовки с коррозионно-стойкими слоями прокатывали в горячем состоянии [14]. Предварительный нагрев образцов под прокатку происходил в воздушной атмосфере при температуре 800 °С. Суммарная степень обжатия поверхностно легированных титановых пластин после четырех циклов прокатки и нагрева составила 80 %. Последующий отжиг прокатанных пластин проводился в вакууме при температуре 850 °С в течение одного часа.

Структурные исследования биметаллов были проведены на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer Z1m и на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP, оснащенном энергодисперсионным анализатором INCA X-ACT (Oxford Instruments). Микроструктура образцов выявлялась травлением смесью 40 %-го

водного раствора едкого калия, 30 %-й перекиси водорода и воды при температуре 80 °С, а также в смеси 2 %-го и 6 %-го водного раствора плавиковой и азотной кислоты соответственно.

Уровень твердости биметаллических композиций оценивался на микротвердомере Wolpert Group 402 MVD. Испытания в условиях одноосного растяжения проводились на универсальном измерительном комплексе Instron 3369. По результатам испытаний определялись показатели предела прочности ( $\sigma_b$ ) и относительного удлинения материалов ( $\delta$ ).

Испытания на ударный изгиб проводились на маятниковом копре Instron Ceast 9050 с максимальной энергией удара 25 Дж. Для испытаний были подготовлены образцы размерами 50×10×2 мм. Концентратор V-образной формы был нанесен в

направлении, перпендикулярном наплавленному слою. Образцы испытывались по схеме нагружения, представленной в работе [12].

## Результаты и обсуждение

Структурные исследования на оптическом микроскопе показали, что в процессе электронно-лучевой наплавки были сформированы слои толщиной ~1,3 мм. Наплавленные слои характеризуются высоким качеством. В них отсутствуют такие дефекты, как поры, микротрещины и нерастворившиеся частицы (рис. 1, а). Результаты микрорентгеноспектрального анализа свидетельствуют о том, что среднее содержание тантала в наплавленном слое составляет 27 % (вес.).

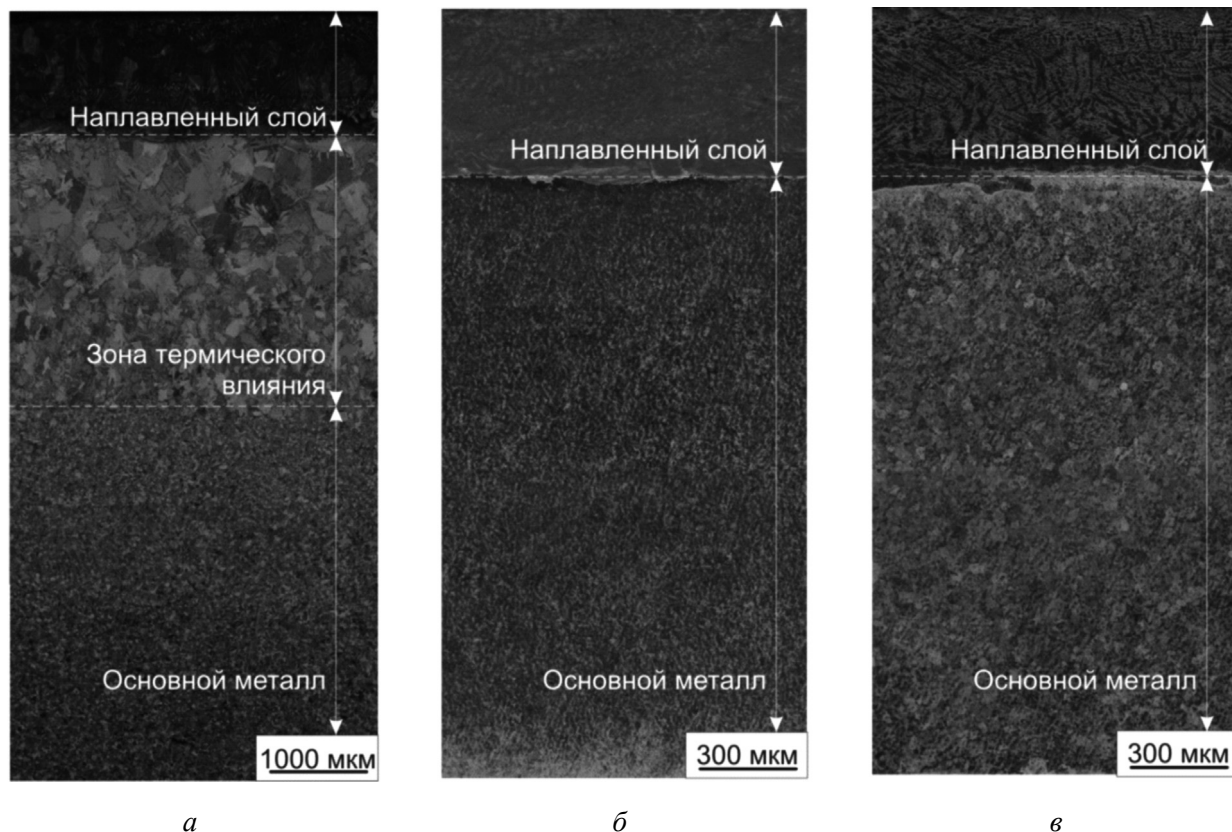


Рис. 1. Общий вид материалов с титан-танталовыми слоями:

а – после наплавки; б – после прокатки; в – после прокатки и отжига

Общий вид материала после наплавки представлен на рис. 1, а. В поперечном сечении композит представлен тремя зонами: зоной наплавленного слоя, зоной термического влияния, характеризующейся формированием крупнозернистой структуры, и зоной основного металла,

не подвергшегося в процессе наплавки термическому воздействию.

Металлографические исследования наплавленных слоев позволили выявить формирование в них структуры, типичной для первичной кристаллизации (рис. 3, а), о чем свидетельствует

появление дендритной ликвации (рис. 2). Наличие дендритной ликвации в наплавленном слое объясняется большой разницей в температурах плавления компонентов, входящих в состав сплава. В процессе кристаллизации обогащенные танталом кристаллы зарождаются раньше, при этом прилегающий к ним раствор обедняется тугоплавким компонентом. Таким образом, после завершения процесса кристаллизации формируется структура, которая характеризуется повышенной концентрацией тантала в ветвях дендритов, окруженных более легкоплавкой матрицей с повышенным содержанием титана.

На больших увеличениях в наплавленных слоях наблюдается формирование тонких мелкодисперсных структурных составляющих, за-

кономерно ориентированных относительно друг друга. На рис. 3, б представлена типичная для наплавленных слоев неравновесная структура закаленного сплава титана, которая, как правило, состоит из  $\alpha'$  или  $\alpha''$ -фаз титана [15, 16].

Общий вид поверхностно легированного материала после прокатки представлен на рис. 1, б. В его структуре можно выделить только две характерные зоны: поверхностно легированный слой и основной металл. Поскольку материал был деформирован в горячем состоянии, при 800 °С, нагрев до указанной температуры способствовал развитию рекристаллизационных процессов и выравниванию структуры титановой основы. Толщина наплавленного слоя после прокатки снизилась до 500 мкм. Характерной особенностью прокатанного материала является изменение соотношения толщины наплавленного слоя к основному металлу. Если в материале после наплавки на долю легированного слоя приходится ~ 15 %, то после прокатки легированный слой занимает 20 % от общей толщины материала. Это явление связано с различием в прочности между материалами основы и наплавленного слоя [17]. В результате легирования танталом, а также высокоскоростного охлаждения прочность наплавленного слоя существенно превышает прочность материала основы. Таким образом, более прочный материал наплавленного слоя деформируется в меньшей степени. Отмеченное явление неравномерности деформации наплавленного слоя и материала основы

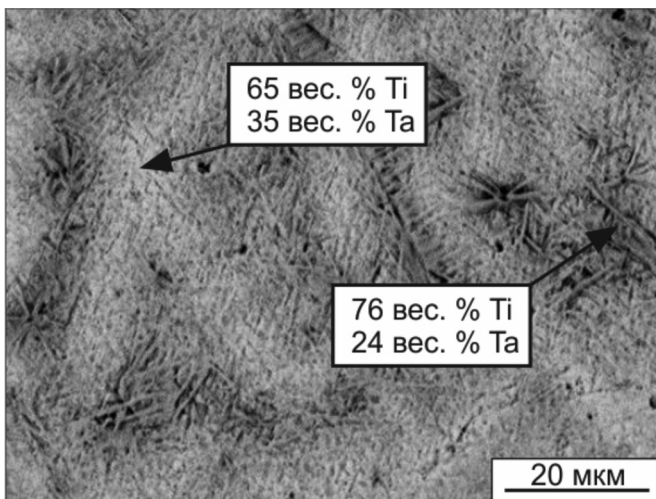
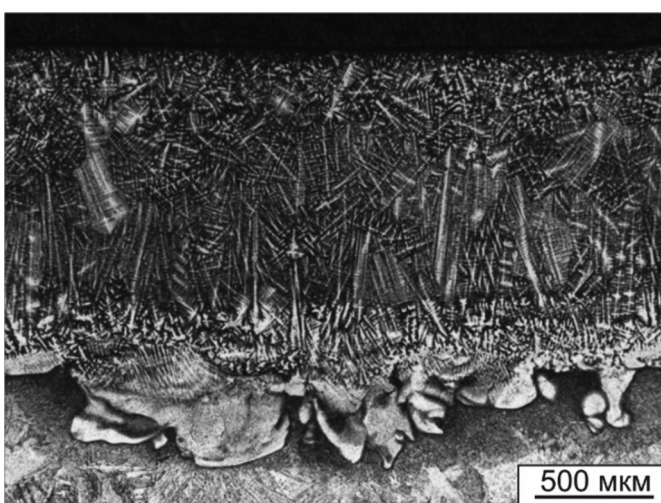
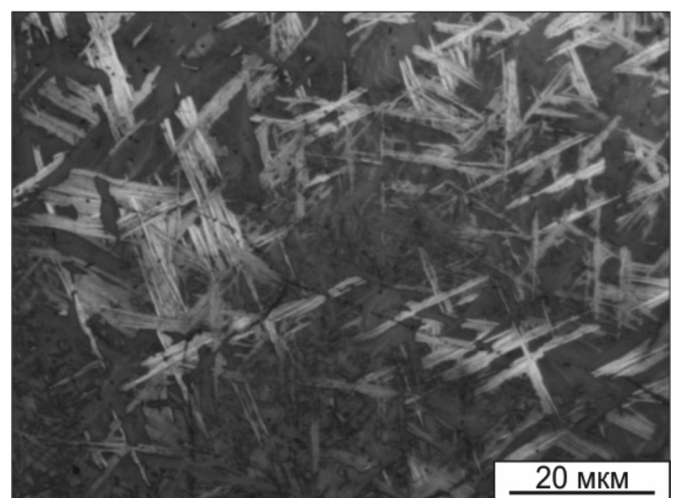


Рис. 2. Микрорентгеноспектральный анализ ветвей дендритов и междендритного пространства



а



б

Рис. 3. Структура слоев с содержанием 27 % (вес.) *Ta*, сформированных на титановой основе методом электронно-лучевой наплавки

приводит к заметному изгибу прокатанного образца в сторону меньшей вытяжки (т. е. в сторону наплавленного слоя).

Прокатка образцов при температуре 800 °С привела к частичному вытягиванию дендритных осей первого порядка вдоль направления прокатки (рис. 4, *а*), а также к деформации структурных составляющих пластинчатой формы (рис. 4, *б*).

После прокатки титановые заготовки с наплавленными слоями подвергались отжигу для снятия наклепа и внутренних напряжений. Общий вид образца представлен на рис. 1, *в*. Основными структурными составляющими являлись пластины  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы и полиэдрические зерна (рис. 5). Формирование структурных

составляющих различной морфологии является следствием неравномерного распределения тантала в наплавленном слое (рис. 5, *б*), которое сохраняется в материале даже после термического воздействия. Структура пластинчатого типа образуется преимущественно в участках, обогащенных танталом, в то время как зоны с низким содержанием тантала имеют полиэдрическое строение. Согласно диаграмме состояния  $Ti - Ta$  [18] нагрев сплава, содержащего ~19 % (вес.)  $Ta$ , до 850 °С соответствует границе перехода из области  $\alpha + \beta$  в  $\beta$  область. Для сплава с содержанием ~32 % (вес.)  $Ta$  нагрев до указанной температуры соответствует  $\beta$ -области. Очевидно, что охлаждение сплавов из различных структур-

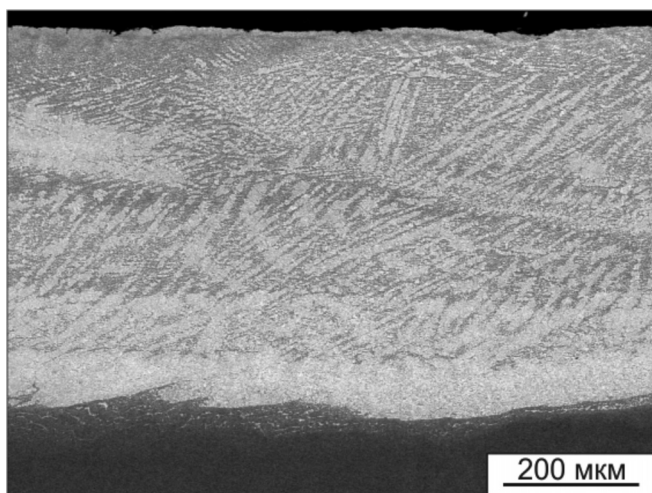
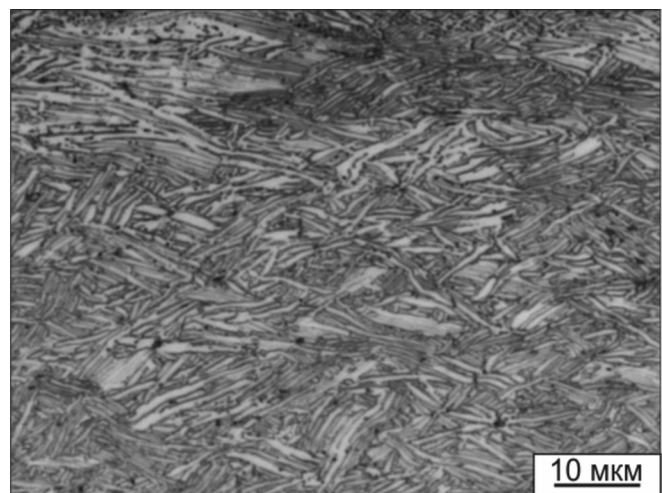
*а**б*

Рис. 4. Структура наплавленных слоев после прокатки

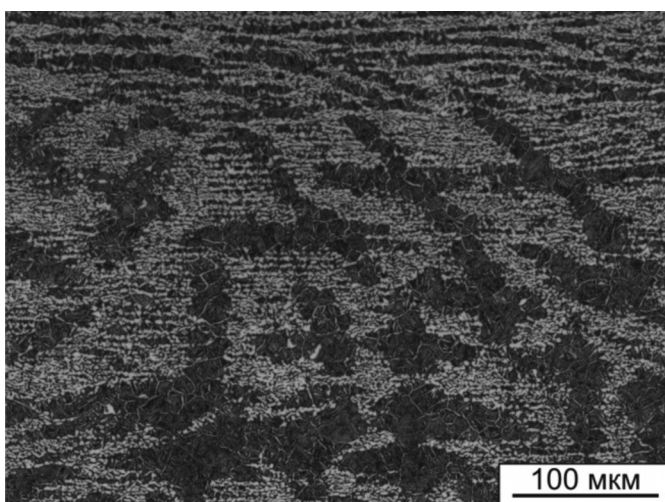
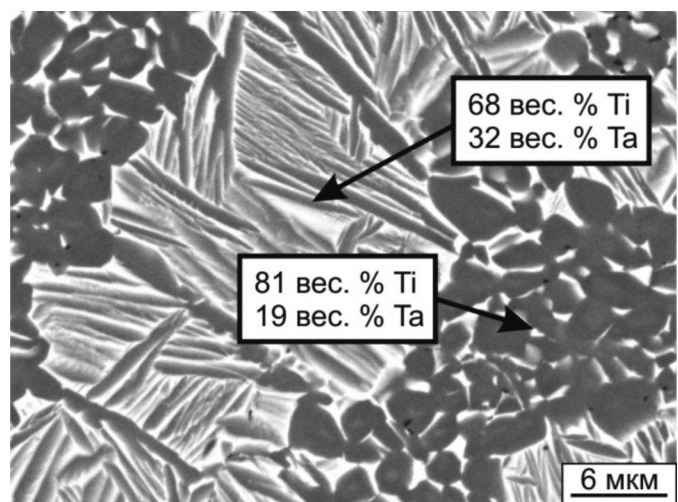
*а**б*

Рис. 5. Структура наплавленных слоев после прокатки и отжига (*а*) и результаты микрорентгено-спектрального анализа отдельных участков (*б*)

ных состояний влияет на конечную структуру сплава после охлаждения.

Различие в механических свойствах легированного слоя и материала основы после различных этапов механического и термического воздействия оценивалось методом микроиндентирования. Характер распределения микротвердости образцов в поперечном сечении отражен на рис. 6. Средний уровень микротвердости легированного слоя после электронно-лучевой наплавки составил 385 HV, при этом микротвердость материала основы находилась на уровне 165 HV. Прокатка образцов привела к повышению микротвердости титановой основы до 210 HV, однако на твердость наплавленного слоя прокатка повлияла незначительно. Отжиг материала после прокатки способствовал снижению микротвердости титана до исходного уровня за счет снятия наклепа, обусловленного рекристаллизацией металла. Максимальное значение микротвердости соответствовало приповерхностной зоне и составило 430 HV для слоев после электронно-лучевой наплавки и 500...550 HV для образцов, подвергнутых последующей прокатке и отжигу. Упрочнение данной зоны связано с насыщением приповерхностного слоя ванны расплава газами атмосферы и, в частности, кислородом [19].

Определение механических свойств материала, в том числе прочности и ударной вязкости, позволяет оценить его эксплуатационные характеристики и технологичность, т. е. возможность изготовления из него реальных конструктивных элементов.

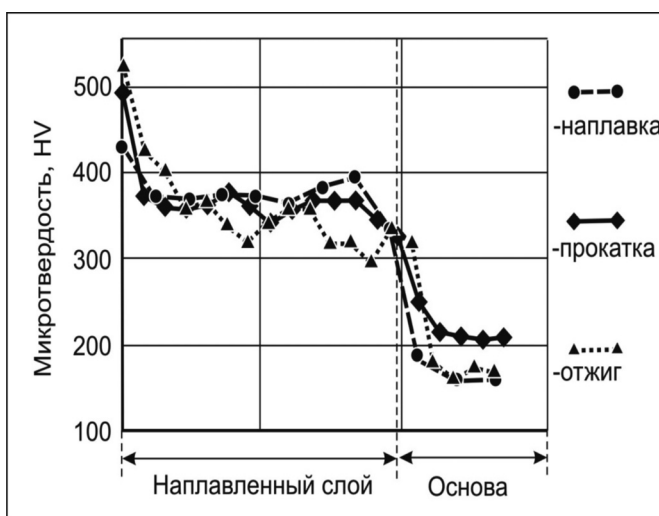


Рис. 6. Микротвердость титановых основ с обогащенным танталом поверхностным слоем

Прочностные свойства оценивались по результатам испытаний на растяжение титановой основы с наплавленным слоем. Предел прочности материала после наплавки составляет 425 МПа. При этом предел прочности технически чистого титана находится на уровне 415 МПа, т. е. наплавка практически не влияет на прочностные характеристики титана ВТ1-0. Однако формирование наплавленных слоев приводит к резкому снижению показателей пластичности. Относительное удлинение упало с 40 % (для титана ВТ1-0) до 3 % (для ВТ1-0 после электронно-лучевой наплавки). Прокатка материала с наплавленными слоями привела к его значительному упрочнению за счет наклепа ( $\sigma_b = 610$  МПа), но при этом не оказала влияния на его пластичность. Отжиг способствует снижению предела прочности материала до уровня, близкого к прочности чистого титана (~450 МПа), и повышению его относительного удлинения до 9 %.

Испытания материалов с коррозионно-стойкими слоями на ударный изгиб показали, что после наплавки ударная вязкость образца почти в два раза ниже ударной вязкости исходного титана (55 и 125 Дж/см<sup>2</sup> соответственно) [12]. Минимальное значение ударной вязкости было зафиксировано для образцов после прокатки (~40 Дж/см<sup>2</sup>). Отжиг прокатанных композиций приводит к росту ударной вязкости до 95...100 Дж/см<sup>2</sup>.

## Выводы

Проведенные исследования показали, что электронно-лучевая наплавка позволяет формировать танталсодержащие поверхностные слои высокого качества на заготовках из технического чистого титана. Наплавленные слои имели дендритное строение; распределение легирующего элемента в наплавленном слое не является равномерным. Съемка при больших увеличениях позволила зафиксировать наличие в наплавленных слоях закаленных структур. Прокатка и отжиг не устраняют дендритную ликвацию, однако способствуют развитию рекристаллизационных процессов в зоне термического влияния и переходу наплавленного слоя в более равновесное состояние. Неравномерность химического состава в наплавленных слоях приводит к форми-

рованию после прокатки и отжига структурных составляющих двух типов: равноосных зерен и пластин.

ДюрOMETрические исследования показали, что твердость поверхностных слоев титана после наплавки повышается со 165 до 385 HV. По этой причине в процессе последующей прокатки поверхностные слои и титановая основа деформируются неравномерно. Прокатка и отжиг не оказывают существенного влияния на твердость наплавленных слоев, однако твердость титановой основы изменяется при проведении указанных технологических операций.

Прочностные характеристики композиции «титан – наплавленный слой» обеспечиваются главным образом титановой основой и, следовательно, находятся примерно на одном уровне с технически чистым титаном (~420 МПа). Однако пластичность материала после электронно-лучевой обработки существенно снижается. Прокатка повышает прочность композиции до 610 МПа за счет наклепа, который снимается в процессе последующего отжига. Уровень прочности материала после прокатки и отжига находится на уровне ~450 МПа.

Электронно-лучевая наплавка способствует снижению уровня ударной вязкости титана ВТ1-0 со 125 до 55 Дж/см<sup>2</sup>. Прокатка приводит к дальнейшему снижению указанной характеристики (до ~40 Дж/см<sup>2</sup>), однако последующий отжиг устраняет негативное влияние наклепа на уровень ударной вязкости материала. После термической обработки он возрастает до ~100 Дж/см<sup>2</sup>.

### Список литературы

1. *Talbot D., Talbot J.* Corrosion science and technology. – Boca Raton, Florida: CRC Press, 1998. – 390 p. – ISBN 0-8493-8224-6.
2. Corrosion: vol. 1: Metal/Environment Reactions / ed. by L.L. Shreir, R.A. Jarman, G.T. Burstein. – 3<sup>rd</sup> ed. – London: Butterworth-Heinemann, 2000. – 1432 p. – ISBN 0-7506-1077-8.
3. The corrosion handbook / ed. by H.H. Uhlig. – New York: John Wiley & Sons, 1948. – 1188 p.
4. *Raj B., Mudali U.K.* Materials development and corrosion problems in nuclear fuel reprocessing plants // Progress in Nuclear Energy. – 2006. – Vol. 48, iss. 4. – P. 283–313. – doi: 10.1016/j.pnucene.2005.07.001.
5. *De Souza K.A., Robin A.* Influence of concentration and temperature on the corrosion behavior of titanium, titanium-20 and 40 % tantalum alloys and tanta-

lum in sulfuric acid solutions // Materials Chemistry and Physics. – 2007. – Vol. 103, iss. 2–3. – P. 351–360. – doi: 10.1016/j.matchemphys.2007.02.026.

6. Structure of the oxide film on Ti–6Ta alloy after immersion test in 8 mol/L boiling nitric acid medium / D. Guo, Y. Yang, J. Wu, B. Zhao, H. Zhao, H. Su, Y. Lu // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. – 2013. – Vol. 189. – P. 122–126. – doi: 10.1016/j.elspec.2013.08.013.

7. Corrosion resistance and biocompatibility of Ti–Ta alloys for biomedical applications / Y.L. Zhou, M. Niinomi, T. Akahori, H. Fukui, H. Toda // Materials Science and Engineering: A. – 2005. – Vol. 398, iss. 1–2. – P. 28–36. – doi: 10.1016/j.msea.2005.03.032.

8. Effect of heat treatment on the corrosion behavior of Ti–5Ta–1.8Nb alloy in boiling concentrated nitric acid / A.R. Shankar, R.K. Dayal, R. Balasubramaniam, V.R. Raju, R. Mythili, S. Saroja, M. Vijayalakshmi, V.S. Raghunathan // Journal of Nuclear Materials. – 2008. – Vol. 372, iss. 2–3. – P. 277–284. – doi: 10.1016/j.jnucmat.2007.03.216.

9. Effect of metal ions in a heated nitric acid solution on the corrosion behavior of a titanium-5% tantalum alloy in the hot acid condensate / Y. Sano, M. Takeuchi, Y. Nakajima, H. Hirano, G. Uchiyama, Y. Nojima, S. Fujine, S. Matsumoto // Journal of Nuclear Materials. – 2013. – Vol. 432, iss. 1–3. – P. 475–481. – doi: 10.1016/j.jnucmat.2012.08.009.

10. Gamma-ray irradiation effect on corrosion rates of stainless steel, Ti and Ti-5Ta in boiling 9N nitric acid / T. Yamamoto, S. Tsukui, S. Okamoto, T. Nagai, M. Takeuchi, S. Takeda, Y. Tanaka // Journal of Nuclear Materials. – 1996. – Vol. 228, iss. 2. – P. 162–167. – doi: 10.1016/S0022-3115(95)00227-8.

11. *De Souza K.A., Robin A.* Preparation and characterization of Ti–Ta alloys for application in corrosive media // Materials Letters. – 2003. – Vol. 57, iss. 20. – P. 3010–3016. – doi: 10.1016/S0167-577X(02)01422-2.

12. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum / M.G. Golkovski, I.A. Bataev, A.A. Bataev, A.A. Ruktuev, T.V. Zhuravina, N.K. Kukanov, R.A. Salimov, V.A. Bataev // Materials Science and Engineering: A. – 2013. – Vol. 578. – P. 310–317. – doi: 10.1016/j.msea.2013.04.103.

13. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovsky, A.Yu. Teplykh, V.G. Burov, S.V. Veselov // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 207. – P. 245–253. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.081.

14. Титан и его сплавы в химическом машиностроении / Б.А. Галицкий, М.М. Абелев, Г.Л. Шварц, Б.Н. Швелкин. – М.: Машиностроение, 1968. – 340 с.

15. Структурные исследования покрытий системы «титан-тантал», полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки / И.А. Батаев,

Т.В. Журавина, А.А. Руктуев, О.Г. Ленивцева, Ю.Н. Ромашова // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2012. – № 3 (56). – С. 56–59.

16. Многослойная электронно-лучевая наплавка танталсодержащих порошковых смесей на заготовки из титана VT1-0 / М.Г. Голковский, В.В. Самойленко, А.И. Попелюх, А.А. Руктуев, Н.В. Плотнокова, Н.С. Белоусова // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2013. – № 4 (61). – С. 43–48.

17. Голованенко С.А., Меандров Л.В. *Производство биметаллов*. – М.: Металлургия, 1966. – 153 с.

18. Microstructure and mechanical properties of Ti-40 Wt Pct Ta (Ti-15 At. Pct Ta) / J.D. Cotton, J.F. Bingert, P.S. Dunn, R.A. Patterson // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 1994. – Vol. 25, iss. 3. – P. 461–472. – doi: 10.1007/BF02651588.

19. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошков системы титан-тантал-ниобий на титан VT1-0 / Т.В. Журавина, И.А. Батаев, А.А. Руктуев, А.П. Алхимов, О.Г. Ленивцева, О.А. Бутыленкова // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2012. – № 1 (54). – С. 90–95.

## OBRAHOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(67), April – June 2015, Pages 55–63

### Influence of rolling and heat treatment on the structure and properties of the coatings fabricated on the titanium substrates by electron beam cladding

Samoylenko V. V., Ph.D. student, e-mail: samoylenko.vitaliy@mail.ru

Lazurenko D.V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: pavlyukova\_87@mail.ru

Polyakov I.A., Ph.D. student, e-mail: status9@mail.ru

Ruktuev A.A., Ph.D. student, e-mail: alex47@211.ru

Lenivtseva O.G., Assistant, e-mail: lenivtseva\_olga@mail.ru

Lozhkin V.S., Assistant, e-mail: logkaa@mail.ru

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

#### Abstract

The influence of rolling and annealing on the structure and properties of VT1-0 titanium with cladded tantalum-containing coatings is estimated. It was found that electron beam treatment contributes to the formation of coatings characterized by the presence of dendritic segregation which is not neutralized by subsequent technological processes. However, the structural investigations revealed that annealing of the rolled material induces transformation of the quenched needlelike structure to the stable one, which is represented by equiaxial grains and lamination.

A microhardness level of titanium surface layers after electron beam treatment increased from 165 to 385 HV. Rolling and annealing had no significant effect on the hardness of cladded layers, but they had an impact on hardness of the titanium substrate. Ultimate tensile strength of titanium workpieces after electron beam treatment was approximately equal to tensile strength of commercially pure (cp) titanium (about 420 MPa). Rolling of the composites led to workhardening of the titanium plate and increase of strength up to 610 MPa which was subsequently reduced to about 450 MPa by annealing. Plasticity of investigated materials was lower than plasticity of cp-titanium after all kinds of treatment. Electron beam cladding also induced decreasing the titanium impact strength level to 55 J/cm<sup>2</sup>, which decreased to a greater extent (to 40 J/cm<sup>2</sup>) after rolling. However, subsequent annealing eliminated the negative effect of technological processes on impact strength of the material and contributed to its increase up to approximately 100 J/cm<sup>2</sup>.

#### Keywords:

electron beam cladding, tantalum, titanium, coating, corrosion resistance.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-55-63

#### References

1. Talbot D., Talbot J. *Corrosion science and technology*. Boca Raton, Florida, CRC Press, 1998. 390 p. ISBN 0-8493-8224-6
2. Shreir L.L., Jarman R.A., Burstein G.T. *Corrosion*. Vol. 1: *Metal/Environment Reactions*. 3<sup>rd</sup> ed. London, Butterworth-Heinemann Publ., 2000. 1432 p. ISBN 0-7506-1077-8



3. Uhlig H.H., ed. *The corrosion handbook*. New York, John Wiley & Sons Publ., 1948. 1188 p.
4. Raj B., Mudali U.K. Materials development and corrosion problems in nuclear fuel reprocessing plants. *Progress in Nuclear Energy*, 2006, vol. 48, iss. 4, pp. 283–313. doi: 10.1016/j.pnucene.2005.07.001
5. De Souza K.A., Robin A. Influence of concentration and temperature on the corrosion behavior of titanium, titanium-20 and 40% tantalum alloys and tantalum in sulfuric acid solutions. *Materials Chemistry and Physics*, 2007, vol. 103, iss. 2–3, pp. 351–360. doi: 10.1016/j.matchemphys.2007.02.026
6. Guo D., Yang Y., Wu J., Zhao B., Zhao H., Su H., Lu Y. Structure of the oxide film on Ti-6Ta alloy after immersion test in 8 mol/L boiling nitric acid medium. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 2013, vol. 189, pp. 122–126. doi: 10.1016/j.elspec.2013.08.013
7. Zhou Y.L., Niinomi M., Akahori T., Fukui H., Toda H. Corrosion resistance and biocompatibility of Ti-Ta alloys for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, vol. 398, iss. 1–2, pp. 28–36. doi: 10.1016/j.msea.2005.03.032
8. Shankar A.R., Dayal R.K., Balasubramaniam R., Raju V.R., Mythili R., Saroja S., Vijayalakshmi M., Raghunathan V.S. Effect of heat treatment on the corrosion behavior of Ti-5Ta-1.8Nb alloy in boiling concentrated nitric acid. *Journal of Nuclear Materials*, 2008, vol. 372, iss. 2–3, pp. 277–284. doi: 10.1016/j.jnucmat.2007.03.216
9. Sano Y., Takeuchi M., Nakajima Y., Hirano H., Uchiyama G., Nojima Y., Fu-jine S., Matsumoto S. Effect of metal ions in a heated nitric acid solution on the corrosion behavior of a titanium-5% tantalum alloy in the hot acid condensate. *Journal of Nuclear Materials*, 2013, vol. 432, iss. 1–3, pp. 475–481. doi: 10.1016/j.jnucmat.2012.08.009
10. Yamamoto T., Tsukui S., Okamoto S., Nagai T., Takeuchi M., Takeda S., Tanaka Y. Gamma-ray irradiation effect on corrosion rates of stainless steel, Ti and Ti-5Ta in boiling 9N nitric acid. *Journal of Nuclear Materials*, 1996, vol. 228, iss. 2, pp. 162–167. doi: 10.1016/S0022-3115(95)00227-8
11. De Souza K.A., Robin A. Preparation and characterization of Ti-Ta alloys for application in corrosive media. *Materials Letters*, 2003, vol. 57, iss. 20, pp. 3010–3016. doi: 10.1016/S0167-577X(02)01422-2
12. Golkovski M.G., Bataev I.A., Bataev A.A., Ruktuev A.A., Zhuravina T.V., Kuksanov N.K., Salimov R.A., Bataev V.A. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, vol. 578, pp. 310–317. doi: 10.1016/j.msea.2013.04.103
13. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Teplykh A. Yu., Burov V.G., Veselov S.V. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 207, pp. 245–253. doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.081
14. Galitskii B.A., Abelev M.M., Shvarts G.L., Shevelkin B.N. *Titan i ego splavy v khimicheskoy mashinostroyeni* [Titanium and its alloys in chemical engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1968. 340 p.
15. Bataev I.A., Zhuravina T.V., Ruktuev A.A., Lenivtseva O.G., Romashova Yu.N. Strukturnye issledovaniya pokrytii sistemy «titan-tantal», poluchennykh metodom vnevakuumnoi elektronno-luchevoy naplavki [Structural investigation of “titanium-tantalum” coatings obtained by non-vacuum electron beam cladding]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2012, no. 3 (56), pp. 56–59.
16. Golkovskii M.G., Samoilenko V.V., Popelyukh A.I., Ruktuev A.A., Plotnikova N.V., Belousova N.S. Mnogosloynaya elektronno-luchevaya naplavka tantalsoderzhashchikh poroshkovykh smesei na zagotovki iz titana VT1-0 [Multilayered electron-beam overlay welding of the tantalum-containing powder mixtures on the commercial pure titanium]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 4 (61), pp. 43–48.
17. Golovanenko S.A., Meandrov L.V. *Proizvodstvo bimetallov* [Bimetal production]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1966. 153 p.
18. Cotton J.D., Bingert J.F., Dunn P.S. Microstructure and mechanical properties of Ti-40 Wt Pct Ta (Ti-15 At. Pct Ta). *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1994, vol. 25, iss. 3, pp. 461–472. doi: 10.1007/BF02651588
19. Zhuravina T.V., Bataev I.A., Ruktuev A.A., Alkhimov A.P., Lenivtseva O.G., Butylenkova O.A. Vnevakuumnaya elektronno-luchevaya naplavka poroshkov sistemy titan-tantal-niobii na titan VT1-0 [Non-vacuum electron beam cladding of titanium, tantalum and niobium powders on titanium substrate]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2012, no. 1 (54), pp. 90–95.

## Funding

The reported study was partially supported by RFBR, research project No. 15-38-20776.

Received 6 April 2015

Revised 6 May 2015

Accepted 15 May 2015

## Рекомендации по написанию научной статьи

Оформление русскоязычной части статьи, подаваемой в научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)», должно соответствовать по стилю и содержанию определенным минимальным требованиям еще до того, как она будет принята на рассмотрение для публикации. Статьи, не соответствующие этим минимальным требованиям, получают мотивированный отказ редактора – их даже не отправляют на рассмотрение в редакционный совет. Вопросы новизны и оригинальности исследования решаются авторами статьи.

Отметим одно необходимое условие, сформировавшееся за время работы в журнале, – нельзя подавать на рассмотрение работу, которая предварительно не прошла оценки качества самим автором (и научным руководителем в случае недостаточного опыта автора в подготовке научных статей). Кроме того, текст должен быть внимательно прочитан всеми авторами (а не одним автором, как это зачастую бывает), так как все авторы несут коллективную ответственность за содержание работы.

### 1. Общие комментарии

Пишите доходчивым и простым языком – абстрактные формулировки и излишне длинные фразы трудны как для чтения, так и для понимания.

Статья не должна быть слишком длинной, даже если журнал не указывает максимального объема статьи. Пишите лаконично и грамотно, соблюдая правила написания по русскому языку.

Избегайте:

- неряшливости, например, многочисленных опечаток, небрежного стиля, маленьких иллюстраций, уравнений с ошибками и др.;
- длинного текста (абзаца), содержащего избыточные высказывания.

Научная статья должна иметь определенную структуру, которая описана ниже.

### 2. Заглавие и сведения об авторах

Используйте лаконичное описательное название, содержащее основные ключевые слова темы статьи. Перед заглавием обязательно указывается УДК.

После заглавия по порядку следуют И.О. ФАМИЛИЯ авторов, их ученая степень, ученое звание, в скобках указываются сокращенное название организации, город. Ниже – данные для переписки: Фамилия И.О. основного автора, почтовый адрес и полное название организации, e-mail.

### 3. Аннотация (реферат)

Аннотация содержит ключевые слова и представляет собой сжатый обзор содержания работы, указывает на основные проблемы, к которым обращается автор, на подход к этим проблемам и на достижения работы (не менее 10 строк).

### 4. Ключевые слова

Ключевые слова должны отображать и покрывать содержание работы. Ключевые слова служат профилем вашей работы для баз данных.

### 5. Введение

Раздел «Введение» должен быть использован для того, чтобы определить место вашей работы (подхода, данных или анализа). Подразумевается, что существует нерешенная или новая научная проблема, которая рассматривается в вашей работе. В связи с этим в данном разделе следует представить краткий, но достаточно информированный литературный обзор (до 2 стр.) по состоянию данной отрасли науки. Не следует пренебрегать книгами и статьями, которые были написаны, например, раньше, чем пять лет назад. В конце раздела «Введение» формулируются цели работы и описывается стратегия для их достижения.

## **6. Описание экспериментальной части и теоретической/вычислительной работы**

### **6.1. Материал, испытываемые образцы и порядок проведения испытаний**

Приводится обоснование выбора данного материала (или материалов) и методов описания материала (материалов) в данной работе.

При необходимости приводятся рисунки образцов с единицами измерения (единицы измерения только в системе СИ). При испытании стандартных образцов достаточно ссылки на стандарт. Для большой программы испытаний целесообразно использовать таблицу матричного типа. Если образцы взяты из слитков, заготовок или компонентов, то описывается их ориентация и нахождение в исходном материале, используются стандартные обозначения по ГОСТу.

При проведении испытаний приводится следующая информация.

1. Тип и условия испытаний, например, температура испытаний, скорость нагружения, внешняя среда.

2. Описываются переменные параметры, измеряемые величины и методы их измерения с точностью, степенью погрешности, разрешением и т.д.; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

### **6.2. Результаты экспериментов**

Результаты предпочтительно представлять в форме графиков и описывать их словесно. Не следует писать о том, что ясно видно по графику.

### **6.3. По теоретической/вычислительной работе**

Вышеперечисленные рекомендации актуальны также и для теоретической и вычислительной работы. В статьях, основанных на вычислительной работе, необходимо указать тип конечного элемента, граничные условия и входные параметры. Численный результат представляется с учетом ограничений (точности) в применяемых вычислительных методах.

В статьях, основанных на аналитической работе, при изложении длинного ряда формул необходимо давать поясняющий текст, чтобы была понятна суть содержания работы. Правильность вычислений необходимо подтверждать промежуточными вычислениями. Так же как и в случае с экспериментальной работой, простого описания числовых или аналитических преобразований без рассмотрения теоретической (физической) первопричины обычно недостаточно, для того чтобы сделать публикацию такой статьи оправданной. Простой отчет о числовых результатах в форме таблиц или в виде текста, как и бесконечные данные по экспериментальной работе, без попытки определить или выдвинуть гипотезу о том, почему были получены такие результаты, без попытки выявить причинно-следственные связи, не украшают работу.

Сравнение ваших числовых результатов с числовыми результатами, полученными кем-то другим, может быть информативным. Но оно ничего не ДОКАЗЫВАЕТ. Контроль при помощи сравнения с общеизвестными решениями и проверка при помощи сравнения с экспериментальными данными являются обязательными.

## **7. Обсуждение**

Необходимо использовать этот раздел для того, чтобы в полном объеме объяснить значимость вашего подхода, данных или анализа и результатов. Настоящий раздел упорядочивает и интерпретирует результаты. Цель раздела – показать, какие знания были получены в результате вашей работы, а также перспективу полученных результатов, сравнив их с существующим положением в данной области, описанным в разделе «Введение». Большое количество графиков и цветных иллюстраций не дает научного результата, это не презентация в PowerPoint. Обязанностью автора является упорядочивание данных и систематическое представление результатов. Так, простой отчет о результатах испытаний без попытки исследовать внутренние механизмы не имеет большой ценности.

## 8. Выводы

Этот раздел обычно начинается с нескольких фраз, подводящих итог проделанной работе, а затем в виде списка представляются основные выводы. Следует быть лаконичным.

## 9. Список литературы

Прежде чем составить список литературы, необходимо ознакомиться с правилами оформления ссылок в журнале «Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)» на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru) (раздел «Научная и инновационная деятельность»; научные издания).

В списки литературы обязательно включайте иностранные источники (желательно не менее 50 %, исключение – публикации по региональной тематике); число цитируемой литературы чаще всего от 15 до 30 ссылок. Списки литературы (References) – это демонстрация вашей эрудиции, информированности о текущих исследованиях в данной области, поэтому цитируемые публикации должны быть как можно более новыми (но и увеличивать их чрезмерно без причины тоже не следует). Ссылки на свои работы приветствуются, но проявляйте умеренность.

*В.Г. Атапин, В.Ю. Скиба,  
заместители главного редактора журнала  
«Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)»*

## ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

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

Авторское резюме должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или сокращать 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, 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 основе 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, необходимо помнить следующие моменты:
  - следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;

- не включать несущественные детали;
- вы пишете для компетентной аудитории, поэтому можете использовать техническую (специальную) терминологию вашей дисциплины, четко излагая свое мнение и имея также в виду, что вы пишете для международной аудитории;
- текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т. д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.), либо разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать один из другого;
- необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т. е. “The study tested”, но не “It was tested in this study” (частая ошибка российских аннотаций);
- стиль письма должен быть компактным (плотным), поэтому предложения, вероятнее всего, будут длиннее, чем обычно.

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

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

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

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

**Научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)»** публикует статьи, содержащие новые и оригинальные результаты исследований по следующим научным направлениям (рекомендованные ВАК): 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, 05.02.08 – Технология машиностроения, 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение).

Для того чтобы подать статью, автор и все соавторы должны быть зарегистрированы на сайте журнала [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov/registration](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/registration). Автор (один из соавторов) в своем кабинете выбирает в меню пункт «Подать статью» и вводит все необходимые данные. Своих соавторов при этом он выбирает из списка зарегистрированных пользователей.

Рукопись статьи готовится в соответствии с правилами оформления в редакторе MS Word и прикрепляется в формате \*.doc, \*.docx.

Сканированные лицензионный договор с подписями авторов и экспертное заключение (цветной режим сканирования, разрешение не менее 300 dpi) необходимо также прикрепить на сайте журнала в разделе «Подать статью» в формате \*.pdf, \*.jpg, \*.jpeg.

При принятии рукописи к печати дополнительно на почтовый адрес редакции (630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 274, зам. гл. редактора Атапин В.Г., Скиба В.Ю.) высылаются оригиналы авторского лицензионного договора и экспертного заключения о возможности открытого опубликования статьи.

Все рукописи рецензируются.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

### Требования к оформлению рукописей

Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word 97-2003**. Формат оригиналов – **A4**. Шрифт – **Times New Roman**, 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 четкими и понятными, могут быть включены в текст статьи.

Научная публикация должна иметь следующую структуру.

1. **Заглавие** (должно быть как можно короче и отражать содержание текста).

2. **Аннотация**:

на русском языке на основе ГОСТ 7.995 – сжатый обзор содержания работы (по ГОСТ **не менее 10 строк, 850 знаков**), указывает на ключевые проблемы, на подход к этим проблемам и на достижения работы; следует применять значимые слова из текста статьи;

на английском языке – по объему больше аннотации на русском языке и включает **не менее 250 слов**, рекомендуется следовать хронологии статьи, использовать англоязычную специальную терминологию, не включать несущественные детали и использовать активный, а не пассивный залог, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке).

3. **Ключевые слова** (должны отображать содержание работы). На английском языке – использовать термины из контролируемых словарей.

4. **Введение** (1-2 стр., краткий обзор по состоянию проблемы с цитатами или ссылками на актуальную литературу; в конце раздела необходимо сформулировать цель или задачу нового исследования и то, как вы это сделали).

5. **Теория** (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).



6. **Результаты и обсуждение.**
7. **Выводы** (по результатам работы, описанной в данной статье; следует быть лаконичным).
8. **Список литературы:** не менее 15 наименований (оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка»).

### Краткие требования к набору рукописей

**Единицы физических величин.** При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц (СИ).

**Таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовок необходим, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

**Математические формулы.** Сложные и многострочные формулы должны быть целиком набраны в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. Используется только сквозная нумерация.

**Рисунки** представляются в форматах TIFF, PNG, JPEG, BMP, WMF. *Рисунки, сканированные откуда-либо, не принимаются.* Рекомендуемые размеры рисунков: 60 × 150, 60 × 70 мм.

**Библиографический список**, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка», составляется по ходу упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Ссылки в тексте на литературу даются в квадратных скобках, например [1], [2, 3], [4–7], [4, стр. 23–28].

### Пример оформления статьи

УДК 621.9.06:518.4

#### ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

*В.Г. ИВАНОВ, доктор техн. наук, профессор  
....., канд. техн. наук, доцент  
В.С. ПЕТРОВ, аспирант, ....., магистрант  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

**Иванов В.Г.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, e-mail: metal\_working@mail.ru

**Аннотация** (не менее 10 строк, 850 знаков)

**Ключевые слова**

<текст статьи с четко выраженной структурой>

1. Введение
2. Теория или методика экспериментального исследования или материалы и методы и др.
3. Результаты и обсуждение
4. Выводы
5. Список литературы (не менее 15 наименований)

**Choice of design parameters of base details at the design stage**

V.G. Ivanov, ....., V.S. Petrov, .....

**Abstract** (не менее 250 слов)

**Key words**

На отдельном листе приводится информация для РИНЦ (исполнение обязательно).

## Пример оформления сведений для РИНЦ:

---

УДК

621.9.06

### **Расчетная оценка упругих деформаций фундамента многоцелевого станка**

Иванов Владимир Григорьевич, Петров Виктор Сергеевич, ....

*Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20*

### **Аннотация**

Рассматривается расчет упругих деформаций фундамента тяжелого многоцелевого станка на абсолютно жестком основании и на упругом винклеровом основании. Показано, что от толщины фундамента существенно зависит деформирование его поверхности. .... (не менее 10 строк, 850 знаков)

### **Ключевые слова**

фундамент, многоцелевой станок, упругие деформации, метод конечных элементов.

### **Литература**

1. Каминская В.В., Решетов Д.Н. Фундаменты и установка металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1975. – 208 с.
2. Атапин В.Г. Проектирование рациональных несущих конструкций многоцелевых станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2008. – №4(41). – С. 18–25.
3. Атапин В.Г. Оценка параметров несущих конструкций тяжелого многоцелевого станка на этапе проектирования // Вестник машиностроения. – 2007. – № 2. – С. 61–64.  
..... (не менее 15 наименований)

### **Calculation of elastic deformations the base of the multi-purpose machine tool**

V.G. Ivanov, V.S. Petrov, ....

The calculation of the elastic deformations of the heavy multi-purpose machine for absolutely rigid basis and on an elastic basis is considered. It is shown that the thickness of substantially depends on the deformation of its surface. ... (не менее 250 слов)

### **Keywords**

foundation, machining center, elastic deformations, finite element method.



## VII Международная научно-практическая конференция «ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ 2015» 23-25 сентября 2015 года

23–25 сентября 2015 года в г. Кемерово состоится VII Международная научно-практическая конференция (МНПК) «Инновации в машиностроении-2015» (ИнМаш-2015).

Конференция посвящена обсуждению актуальных проблем машиностроения, стратегической отрасли, обеспечивающей стабильную, устойчивую, динамично развивающуюся экономику. Целью конференции является демонстрация научно-практических достижений, организация пленарных заседаний, семинаров и круглых столов ученых и специалистов ведущих российских и зарубежных вузов, научно-исследовательских институтов, машиностроительных предприятий.

Ключевое направление работы конференции – угольное машиноведение, перспективное горно-шахтное оборудование и технологии его производства. Наряду с этим будут работать секции по направлениям:

- инновационные технологические процессы изготовления деталей и сборки машин;
- прогрессивные технологические процессы заготовительного производства (обработка металлов давлением, сварочное и литейное производство);
- технологическое оборудование машиностроительных производств: новые конструкции, методы расчета, опыт эксплуатации;
- нанотехнологии и материаловедение в машиностроении. Упрочняющие технологии и функциональные покрытия;
- автоматизация проектирования машиностроительного производства;
- экономика, менеджмент и организация машиностроительного производства;
- совершенствование образования в области машиностроения.

В текущем 2015 году конференция посвящается 65-летию Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева – ведущего вуза Кузбасса в области подготовки кадров для горного машиностроения.

К участию в конференции приглашаются аспиранты, преподаватели, ученые, сотрудники вузов, учреждений РАН, НИИ и промышленных предприятий.

К обсуждению актуальных вопросов приглашаются руководители и сотрудники машиностроительных, коммерческих, горно-добывающих и сервисных компаний. В рамках конференции можно выполнить презентации проектов развития, провести фирменные семинары, опубликовать рекламу в сборнике материалов и программе конференции.

Информация о конференции представлена на сайте [science.kuzstu.ru](http://science.kuzstu.ru) (раздел «Научные мероприятия»). Контактный e-mail: [ispcime@mail.ru](mailto:ispcime@mail.ru)



## 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 %

### Журнал представлен:

- на сайте: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov);
- на сайте НГТУ: [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru) (раздел «Научная и инновационная деятельность»); научные издания)

## МЕДИАКИТ

- электронная версия журнала доступна на платформе eLIBRARY.RU.

### 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. 274, зам. гл. редактора – В. Г. Атапин, В. Ю. Скиба.

Тел.: Атапин В.Г. (383) 346-17-77,  
Скиба В.Ю. (383) 346-17-79  
E-mail: [metal\\_working@mail.ru](mailto:metal_working@mail.ru)



## МЕРОПРИЯТИЯ

## МЕДИАКИТ

С 2014 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 машиностроения и металлообработки 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/>



## РЕКЛАМА. ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ

## МЕДИАКИТ

Рекламные материалы должны соответствовать тематике научно-технического и производственного журнала по машиностроению. Для размещения рекламы предоставляется площадь трех страниц обложки (цветная).

Цветная реклама на обложке (формат А4):

- 2 страница 18 000 руб.
- 3 страница 15 000 руб.
- 4 страница 20 000 руб.

