

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ISSN 1994-6309

ТЕХНОЛОГИЯ • ОБОРУДОВАНИЕ • ИНСТРУМЕНТЫ

№ 4 (65) ОКТЯБРЬ—ДЕКАБРЬ 2014 г. научно-технический и производственный журнал

## Технология Оборудование Инструменты Материаловедение



II Международная научно-практическая конференция  
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ»  
II International Scientific and Practical Conference  
“ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING”  
25 Марта/March 2015 г.  
Подробная информация на странице 101

НОВОСИБИРСК

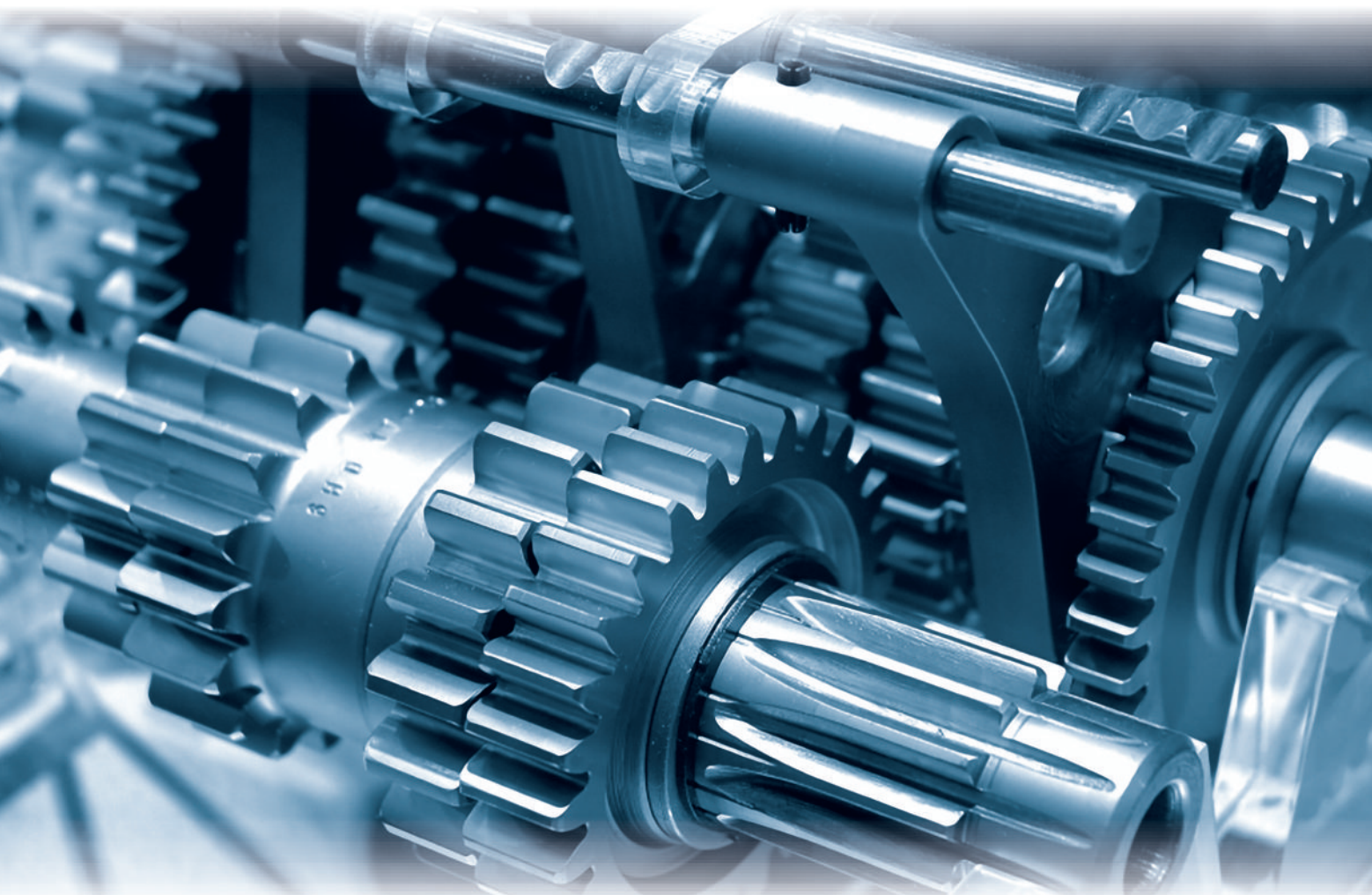


Международная выставка машиностроения  
и металлообработки

**24-27 марта 2015**

Россия, Новосибирск

[www.mashex-siberia.ru](http://www.mashex-siberia.ru)



ITE Сибирь  
Россия, Новосибирск, ул. Станционная, 104  
Тел.: (383) 363-00-36, 363-00-63

Генеральный  
информационный партнер:



# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ • ОБОРУДОВАНИЕ • ИНСТРУМЕНТЫ

№ 4 (65) ОКТЯБРЬ–ДЕКАБРЬ 2014 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, ректор НГТУ, г. Новосибирск (Российская Федерация)

### Члены совета

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

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

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

*Украина:* **Ковалевский С.В.**, доктор технических наук, профессор, 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 НПП и ЭИ «Оргстанкинпром»  
ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный  
технический университет»  
ООО НПКФ «Машсервисприбор»

### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

### ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

**Буров Владимир Григорьевич** – профессор,  
кандидат 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

- Мозговой Н.И., Мозговая Я.Г.** Управление процессом стружкообразования при обработке пластических материалов..... 6
- Чёсов Ю.С., Зверев Е.А., Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Плотникова Н.В., Лобанов Д.В.** Структура износостойких плазменных покрытий после высокоэнергетического воздействия ТВЧ..... 11

### ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

- Аксенов В.В., Вальтер А.В., Бегляков В.Ю.** Обеспечение геометрической точности оболочки при сборке секций геохода..... 19
- Овчаренко А.Г., Марусин В.В., Ульяницкий В.Ю., Козлюк А.Ю., Курепин М.О.** Повышение износостойкости бурового твердосплавного инструмента..... 29

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Осколкова Т.Н., Батаев А.А., Батаев В.А., Тюрин А.Г., Козырев Н.А., Фёдоров А.А.** Исследование структуры и свойств твёрдого сплава ВК10КС после закалки в водополимерной среде Термовит М..... 36
- Саврай Р.А., Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л.** Контактная выносимость NiCrBSi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки..... 43

### ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИИ

**По материалам III Всероссийской конференции «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций», посвященной 100-летию со дня рождения академика Ю.Н. Работнова, 26–30 мая 2014 г., Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия**

- Бузюркин А.Е., Гладкий И.Л., Краус Е.И.** Численное моделирование аварийного обрыва лопатки вентилятора газотурбинного двигателя..... 52
- Петров М.Г.** Оценка структурного состояния композиционных материалов в процессе разрушения..... 61
- Банщикова И.А., Муравьёва А.Е., Цвелодуб И.Ю.** Расчет пластин из упрочняющегося материала, сопротивляющегося растяжению и сжатию при ползучести..... 68
- Резников Б.С., Гобыш А.В.** Влияние разброса характеристик элементов композиции на эффективные коэффициенты теплового расширения микрон неоднородных материалов..... 78
- Веричев С.Н., Горев Б.В., Банщикова И.А.** Формообразование изгибом в режиме пластичности элементов самолетных конструкций..... 85
- Рекомендации по написанию научной статьи ..... 94
- Подготовка аннотации ..... 96
- Правила для авторов ..... 99

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 02.12.2014. Выход в свет 15.12.2014. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
 Усл. печ.л. 13,0. Уч.-изд. л. 24,18. Изд. № 203. Заказ 1346. Тираж 300 экз.

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

# BRABOTKA METALLOV

## METAL WORKING and MATERIAL SCIENCE

ISSN 1994-6309

Journal no. 4 (65) October – December 2014

### EDITORIAL BOARD

#### EDITOR-IN-CHIEF:

**Anatoliy A. Bataev**, D.Sc. (Engineering), Professor,  
Vice Rector for Academic Affairs,  
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**, Ph.D. (Engineering), Professor,  
Dean, Faculty of Mechanical Engineering and Technologies,  
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

## EDITORIAL COUNCIL

## CHAIRMAN:

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

## MEMBERS:

*The Federative Republic of Brazil:*

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

- Mozgovoy N.I., Mozgovaya Y.G.** Process control of chip formation during plastic material processing..... 6
- Chesov Yu.S., Zverev E.A., Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu., Plotnikova N.V., Lobanov D.V.** Structure of wear resistant plasma coatings after high-energy treatment using high-frequency currents..... 11

### EQUIPMENT. INSTRUMENTS

- Aksenov V.V., Walter A.V., Beglyakov V.Yu.** Ensuring the geometric accuracy of shell during assembly of Geohod sections..... 19
- Ovcharenko A.G., Marusin V.V., Ulyanizkiy V.Yu., Kozlyuk A.Yu., Kurepin M.O.** Improving the wear resistance of the drilling carbide tools..... 29

### MATERIAL SCIENCE

- Oskolkova T.N., Bataev A.A., Bataev V.A., Tjurin A.G., Kozyrev N.A., Fedorov A.A.** Research of the structure and properties of the hard alloy VK10KS after hardening in waterpolymeric liquid Termovit M..... 36
- Savrai R.A., Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Osintseva A.L.** The contact endurance of NiCrBSi coatings obtained by gas powder laser cladding..... 43

### PROCEEDINGS

**of the III All-Russian Conference "Deformation and Fracture of Structurally Inhomogeneous Media and Structures", dedicated to the 100th anniversary of the birth of Academician Yu.N. Rabotnov, 26–30 May 2014, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russian Federation**

- Buzyurkin A.E., Gladkiy I.L., Kraus E.I.** Numerical simulation of gas turbine engines fan blades emergency breakage..... 52
- Petrov M.G.** Evaluation of the composite materials structural condition during fracture..... 61
- Banshchikova I.A., Muraveva A.E., Tselodub I.Yu.** Calculation of plates made of strain-hardening material with different resistance to tension and compression under creep..... 68
- Reznikov B.S., Gobysh A.V.** Influence of range of compositions elements characteristics on the effective thermal expansion coefficients for microheterogeneous materials..... 78
- Verichev S.N., Gorev B.V., Banshchikova I.A.** The shaping by bending of elements aircraft structures at plasticity conditions..... 85
- Guidelines for Writing a Scientific Paper ..... 94
- Abstract requirements ..... 96
- Rules for authors ..... 99

# УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

*Н.И. МОЗГОВОЙ, канд. техн. наук, доцент  
Я.Г. МОЗГОВАЯ, канд. техн. наук, доцент  
(АлтГТУ, г. Барнаул)*

Поступила 05 сентября 2014

Рецензирование 15 сентября 2014

Принята к печати 25 сентября 2014

**Мозговой Н. И.** – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
e-mail: nick\_3@mail.ru

Рассматривается процесс стружкообразования и возможные способы управления им при обработке пластических материалов. Определена зависимость типа стружки от режимов резания. Получены номограммы, отражающие области, исключающие появление сливной стружки и попадание в воздух пылевидной и элементной стружки в зависимости от режимов резания и конструктивно-геометрических параметров режущего инструмента. Показано, что при создании модели процесса стружкообразования необходимо учитывать вышеуказанные особенности обработки пластических материалов и решать проблему расчета систем, имеющих сложную геометрическую конфигурацию и нерегулярную физическую структуру.

**Ключевые слова:** стружкообразование, пластические материалы, качество поверхности, управление процессом, обработка материалов.

## Введение

В настоящее время наряду с металлом широко применяются пластические материалы для изготовления изделий, к которым предъявляются требования высокой прочности, стабильности размеров во времени, повышенной влагостойкости, большой ударной вязкости. Сложность получения некоторых поверхностей деталей требует введения в технологический процесс операций механической обработки. В процессе резания необходимо учитывать ряд особенностей, характерных для пластических материалов, таких как стеклопластик: склонность к образованию прижогов и отслоению материала; неоднородность строения; сильное абразивное воздействие на инструмент; пониженная теплопроводность; трудность применения смазочно-охлаждающих веществ [1–5]. Указанные особенности непо-

средственно оказывают влияние на характер стружкообразования. Процесс стружкообразования является сложным физическим процессом, который сопровождается повышенным тепловыделением, деформацией металла, износом режущего инструмента и образованием нароста на поверхности инструмента. Установление закономерностей процесса резания и сопровождение его явлений позволяют рационально управлять этим процессом и изготавливать детали наиболее качественно, производительно и экономично [6, 7].

Перечисленные особенности обработки резанием пластических материалов показывают, что простой перенос закономерностей процесса резания металлов на эти материалы недопустим. Следовательно, для управления процессом образования стружки и оптимизации маршрута обработки деталей из пластических материалов и достижения максимальной производительности



и требуемого качества поверхности необходимо всестороннее исследование процесса стружкообразования [8–11].

Цель данной работы – исследовать влияние технологических параметров на вид образующейся стружки, определить специфику процесса стружкообразования на проектирование технологического процесса для операций механической обработки.

### Методика экспериментальных исследований

В качестве экспериментальных образцов взяты сплошные заготовки из стеклопластика ВМ-1 длиной 30 мм и диаметром 100 мм, изготовленные из стекловолокна и эпоксидного связующего ЭДИ или совмещенного эпоксифенолформальдегидного связующего ИФ–ЭДб по ТУ 16–504–010–71.

Механическая обработка проводилась режущим инструментом со сменными многогранными пластинами различных типов из твердого сплава ВК8. Типы сменных неперетачиваемых пластин HNUM, ГОСТ 19068–80, PNUM ГОСТ 19065–80, HNUA ГОСТ 19067–80, PNUA ГОСТ 19064–80 выбраны на основе литературных данных, которые обеспечивают необходимые значения геометрических параметров режущего инструмента при их установке на расточной резец.

Для определения упругих отжатию фиксируется сила резания при помощи фольговых тензодатчиков через деформацию расточного резца.

Обработка экспериментальных данных, записанных в файлы на жесткий диск компьютера, проводилась с использованием программного обеспечения Microsoft Excel.

Для количественной оценки адекватности полученных данных были проведены однофакторные эксперименты. Сравнение результатов экспериментов и расчетных данных подтверждает их адекватность, наибольшее расхождение составляет 8 %.

### Результаты и обсуждение

В результате анализа литературы по данной проблеме и проведения ряда экспериментальных исследований в лабораторных условиях было

установлено, что при резании пластических материалов образуются следующие наиболее характерные типы стружек: непрерывная сливная, прерывистая сливная, элементная и пылевидная.

При механической обработке образуется стружка, поверхность которой всегда неровная, поэтому и на ней заметны мелкие волны или зазубрины. Даже на прочной сливной стружке часто можно наблюдать трещины, надрывы. Поскольку полное описание механизма образования стружки сложно, то для анализа напряжений и деформаций при резании реальный процесс стружкообразования заменяют его упрощенной моделью. В частности, не принимается во внимание искажение формы полученного сечения реальной стружки и увеличение ее ширины; ее поперечное сечение представляют в виде прямоугольника с высотой, равной средней толщине стружки, и шириной, равной первоначальной ширине резания. При этих допущениях образование стружки рассматривается в идеализированном сечении по нормали к режущей кромке инструмента при свободном прямоугольном резании [12, 13].

Следует отметить, что даже при идеализации стружки нельзя пренебрегать естественной кривизной, т.е. завиванием, которое происходит потому, что сдвиг – не единственная деформация, обуславливающая превращение срезаемого слоя в стружку. Этот слой всегда с большей или меньшей интенсивностью подвергается неравномерному сжатию в направлении, перпендикулярном к передней поверхности лезвия.

Управление процессом стружкообразования при резании пластических материалов, таких как стеклопластик, имеет значение для обеспечения качества получаемой продукции, бесперебойной работы оборудования и, как следствие, повышения производительности, безопасности рабочего персонала. С этой целью в ходе лабораторных исследований были построены диаграммы областей устойчивого стружкодробления для различных типов сменных многогранных пластин (рис. 1) и диаграммы областей, исключающих попадание пыли в воздух (рис. 2). Выбор типов пластин и режимов обработки согласно данным диаграммам обеспечивает получение элементной и пылевидной стружки при резании стеклопластика. В результате анализа из диаграмм выявлено, что использование режущих пластин

PNUA и HNUA исключает появление сливной стружки на подачах до 0,7 мм/об и попадание мелких частиц стружки в воздух при подаче 0,1 мм/об и ниже. Пластины PNUM и HNUM обеспечивают устойчивое стружкодробление на подачах до 0,4 мм/об и исключают попадание в воздух пылевидной стружки при подачах 0,2 мм/об и ниже.

При использовании станков, оборудованных вытяжной вентиляцией при обработке пластичных материалов, основная задача сводится к исключению образования сливной стружки. Из диаграммы (рис. 1) видно, что данному условию удовлетворяют сменные многогранные пластины HNUA и PNUA на подачах от 0,1 до 0,7 мм/об. Пластины HNUM и PNUM могут использоваться только при подачах от 0,1 до 0,4 мм/об, так как при подачах свыше 0,4 мм/об образуется сливная стружка большой длины, которая может наматываться на заготовку и затруднять дальнейшую обработку.

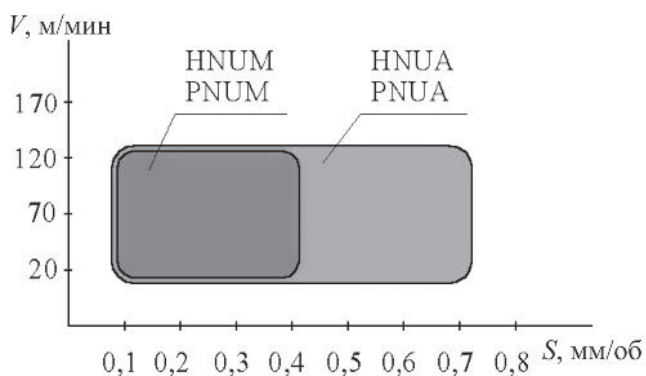


Рис. 1. Области стружкообразования, исключающие появление сливной стружки

При использовании станков для обработки пластичных материалов, таких как стеклопластик, не оборудованных вытяжной вентиляцией, важным требованием является исключение попадания мелкодисперсных элементов стружки в воздух. Это требование выполняется при обработке пластинами HNUM и PNUM на подачах от 0,1 до 0,2 мм/об, а для пластин HNUA и PNUA подача не должна превышать 0,1 мм/об (см. рис. 2). На таких режимах образуется элементная стружка, которая равномерным потоком сходит по передней поверхности резца, не загрязняя окружающее пространство и воздух.

Следует отметить, что выбор оборудования с вентиляцией может обеспечить значительное повышение производительности обработки.

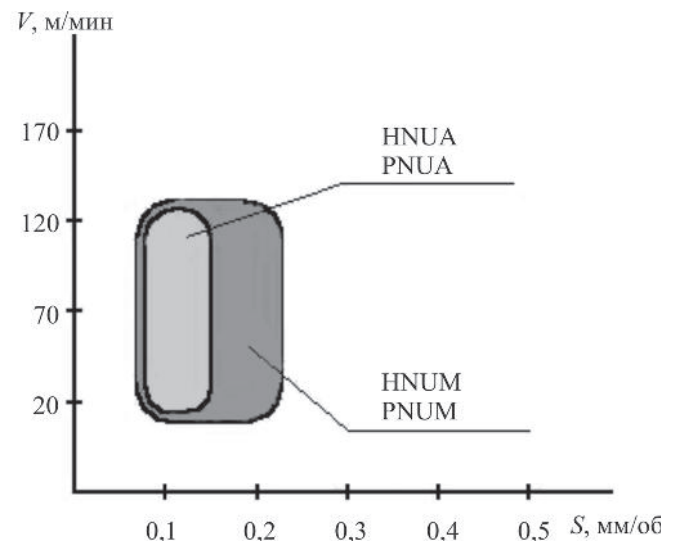


Рис. 2. Области стружкообразования, исключающие появление сливной стружки и попадание в воздух пылевидной и элементной стружки при точении стеклопластика

Однако необходимо учитывать, что такое оборудование будет иметь большую себестоимость из-за дополнительных расходов на вентиляционную установку.

При создании модели процесса стружкообразования необходимо учитывать вышеуказанные особенности обработки пластических материалов и решать проблему расчета систем, имеющих сложную геометрическую конфигурацию и нерегулярную физическую структуру. Такие расчеты можно выполнить при помощи приближенных численных методов. Зная физическую структуру материала и рассчитав геометрические параметры стружки, можно установить адаптивный контроль за процессом обработки стеклопластика, что позволит своевременно менять изношенный режущий инструмент либо корректировать режимы резания. Это позволяет гарантированно соблюдать правила техники безопасности при работе на станках с ручным управлением и необходимым условием безостановочной работы станков-автоматов.

## Выводы

Установлена зависимость вида стружки от режимов обработки и типа сменных многогранных пластин, позволяющая управлять процессом образования стружки.

Предложены рекомендации в виде номограмм образования стружки по выбору типа пла-

стин и режимов резания для механической обработки деталей из пластичных материалов:

- для станков, оборудованных вытяжной вентиляцией, использовать пластины HNUA и PNUA на подачах до 0,7 мм/об, применение которых исключает появление сливной стружки;
- для станков без вентиляции использовать пластины HNUM и PNUM на подачах до 0,2 мм/об, применение которых исключает загрязнение воздуха стружкой.

### Список литературы

1. Баранчиков В.И., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Обработка специальных материалов в машиностроении: справочник. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.: ил. – (Библиотека технолога).
2. Черпаков Б.И., Альперович Т.А. Металлорежущие станки: учебник для начального профессионального образования. – М.: Академия, 2003. – 368 с.
3. Феценко В.Н., Махмутов Р.Х. Токарная обработка: учебник. – 6-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2005. – 303 с.: ил.
4. Обработка металлов резанием: справочник технолога / А.А. Панов и др.; под общ. ред. А.А. Панова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2004. – 784 с.
5. Бурков П.В. Структурообразование, фазовый состав и свойства композиционных материалов на основе карбида титана: учебное пособие / Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2011. – 190 с.
6. Мозговой Н.И., Мозговая Я.Г. Особенности обработки отверстий в деталях из стеклопластика // Седьмая Международная научно-техническая

конференция «Информационные технологии в промышленности» (ИТИ' 2012), 30–31 октября 2012 года, Минск: тезисы докладов. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2012. – С. 207–209. – ISBN 978-985-674-478-8.

7. Мозговой Н.И., Мозговая Я.Г. Исследования влияния физико-механических свойств стеклопластиков на процесс резания // Вестник Алтайской науки. – 2013. – № 2–1. – С. 15–19.

8. Мозговой Н.И., Марков А.М., Доц М.В. Стеклопластик и особенности его механической обработки. – Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 100 с.

9. Мозговой Н.И., Марков А.М., Мозговая Я.Г. Проблемы и перспективы применения пластических материалов для деталей машиностроения // Ползуновский альманах. – 2013. – № 2. – С. 92–95.

10. Бондарь Е.Б., Марков А.М. Проблемы обработки пластмасс резанием // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2004. – № 2. – С. 20–21.

11. Доц М.В., Марков А.М., Бондарь Е.Б. Моделирование сил резания при точении стеклопластика // Управление качеством образования, продукции и окружающей среды: материалы третьей межрегиональной научно-практической конференции 29–30 июня 2005 г. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2005. – С. 217–220.

12. Материаловедение. Технология композиционных материалов: учебник / А.Г. Кобелев, М.А. Шаронов, О.А. Кобелев, В.П. Шаронова. – КноРус, 2014. – 270 с.

13. Бондарь Е.Б. Повышение производительности изготовления деталей из стеклопластика резцами со сменными многогранными пластинами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2007. – 20 с.

## OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

№ 4(65), October – December 2014, Pages 6–10

### Process control of chip formation during plastic material processing

Mozgovoy N.I., Ph.D. (Engineering), e-mail: nick\_3@mail.ru

Mozgovaya Y.G., Ph.D. (Engineering), e-mail: yanagm@mail.ru

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

### Abstract

The process of chip formation and possible ways of its control during plastic material processing is considered. The dependence of the chips type on the cutting conditions is determined. Processing of some plastic materials such as fiberglass is accompanied by several problems: the tendency to form burns and peeling of the material; heterogeneity of the structure; strong abrasive effect on the tool; reduced thermal conductivity; difficulty in applying lubricating substances. Chip formation process in this case is very important to ensure the quality of the manufactured

products, the smooth operation of the equipment and, as a result, increase in efficiency, security of workers. These studies have determined the type of chips from the cutting conditions. Nomograms, reflecting areas that preclude the emergence of the flow chips and ingress of discontinuous and dusty chip into the air are obtained. It is showed that when creating a model of the process of chip formation it is necessary to consider the above-mentioned features of plastic materials processing and solve the problem of designing systems with complex geometric configuration and irregular physical structure.

### Keywords:

chip formation, plastic materials, surface quality, process control, material handling.

### References

1. Baranchikov V.I., Tarapanov A.S., Kharlamov G.A. *Obrabotka spetsial'nykh materialov v mashinostroenii. Spravochnik. Biblioteka tekhnologa* [Machining of special materials in mechanical engineering. Handbook. Library of industrial engineer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 264 p.
2. Cherpakov B.I., Al'perovich T.A. *Metallorazhushchie stanki* [Metal cutting machines]. Moscow, Publishing center "Academia", 2003. 368 p.
3. Feshchenko V.N., Makhmutov R.Kh. *Tokarnaya obrabotka* [Turning]. 6<sup>th</sup> ed. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2005. 303 p.
4. Panov A.A., Anikin V.V., Boim N.G., Bez'yazychnyi V.F., Volkov V.S. et al. *Obrabotka metallov rezaniem. Spravochnik tekhnologa* [Metalcutting: Directory of Industrial Engineer]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 784 p.
5. Burkov P.V. *Strukturoobrazovanie, fazovyi sostav i svoystva kompozitsionnykh materialov na osnove karbida titana* [Structure formation, phase composition and properties of composite materials based on titanium carbide]. Tomsk, TPU Publ., 2011. 190 p. ISBN 978-5-98298-884-3
6. Mozgovoy N.I., Mozgovaya Ya.G. [Processing features holes in parts made of glass-fiber material]. *Tezisy dokladov VII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v promyshlennosti»* [Proceedings of the VII International Scientific Conference "Information Technologies in Industry" (ITI \* 2012)]. Minsk, UIIP NAS Belarus Publ., 2012, pp. 207–209. ISBN 978-985-6744-78-8
7. Mozgovoy N.I., Mozgovaya Ya.G. Issledovaniya vliyaniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv stekloplastikov na protsess rezaniya [Investigations of the influence of physical and mechanical properties of glass-fiber material on the cutting process]. *Vestnik Altaiskoy nauki – Bulletin of the Altai Science*, 2013, no. 2–1, pp. 15–19.
8. Mozgovoy N.I., Markov A.M., Dots M.V. *Stekloplastik i osobennosti ego mekhanicheskoi obrabotki* [Glass-fiber material and features of its machining]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 100 p.
9. Mozgovoy N.I., Markov A.M., Mozgovaya Ya.G. Problemy i perspektivy primeneniya plasticheskikh materialov dlya detalei mashinostroeniya [Problems and perspectives of the use of plastic materials for machine parts]. *Polzunovskii al'manakh – Polzunov Almanac*, 2013, no. 2, pp. 92–95.
10. Bondar' E.B., Markov A.M. Problemy obrabotki plastmass rezaniem [Problems processing plastic cutting]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2004, no. 2, pp. 20–21.
11. Dots M.V., Markov A.M., Bondar' E.B. [Simulation of cutting forces in turning glass-fiber material]. *Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Upravlenie kachestvom obrazovaniya, produktsii i okruzhayushchei sredy"* [Proceedings of the III Inter-Regional Scientific-Practical Conference]. Biysk, AltSTU Publ., 2005, pp. 217–220.
12. Kobelev A.G., Sharonov M.A., Kobelev O.A., Sharonova V.P. *Materialovedenie. Tekhnologiya kompozitsionnykh materialov* [Materials science. The technology of composite materials]. Moscow, Knorus Publ., 2014. 270 p.
13. Bondar' E.B. *Povyshenie proizvoditel'nosti izgotovleniya detalei iz stekloplastika reztsami so smennymi mnogogrannymi plastinami*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Increasing machining productivity of parts made of glass-fiber material by cutters with indexable inserts. Author's abstract of Dr. tech. sci. diss.]. Tomsk, 2010. 20 p.

Received 05 September 2014

Revised 15 September 2014

Accepted 25 September 2014

# СТРУКТУРА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТВЧ\*

*Ю.С. ЧЁСОВ*<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент  
*Е.А. ЗВЕРЕВ*<sup>1</sup>, канд. техн. наук  
*В.В. ИВАНЦИВСКИЙ*<sup>1</sup>, доктор техн. наук, доцент  
*В.Ю. СКИБА*<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент  
*Н.В. ПЛОТНИКОВА*<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент  
*Д.В. ЛОБАНОВ*<sup>2</sup>, доктор техн. наук, доцент  
(<sup>1</sup>НГТУ, г. Новосибирск, <sup>2</sup>БрГУ, г. Братск)

Поступила: 22 сентября 2014

Рецензирование: 06 октября 2014

Принята к печати: 05 ноября 2014

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

В работе представлены результаты исследования влияния высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты на качество плазменных покрытий из высокохромистого порошкового чугуна. Приведены результаты металлографических, рентгенофазовых и энергодисперсионных исследований структуры износостойких плазменных покрытий до и после индукционного нагрева. Показано, что после дополнительного высокотемпературного воздействия в структуре покрытий повысилась равномерность распределения микротвердости по глубине слоя: после плазменного напыления величина доверительного интервала составляла 1,7...2,8 ГПа; после воздействия ВЭН ТВЧ – доверительный интервал варьировался в пределах 0,5...1,3 ГПа. Выявлено, что в выбранной области режимов индукционного нагрева в структуре плазменных покрытий сохраняется карбидная составляющая. Установлен рациональный режим повторного нагрева ТВЧ (удельная мощность источника  $q_{\text{и}} = (3,0...3,2) \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>; относительная скорость перемещения детали  $V_{\text{д}} = 60...80$  мм/с), при котором наблюдается уменьшение пористости плазменного покрытия с 12 до 1 %.

**Ключевые слова:** качество, высокохромистый чугун, плазменные покрытия, структура, высокоэнергетическое воздействие, токи высокой частоты.

## Введение

Обеспечение требуемого уровня качества поверхности слоя, а следовательно, и эксплуатационных свойств деталей машин является одной из приоритетных задач современной технологии машиностроения. Эта проблема особенно актуальна применительно к деталям, работающим в условиях тяжелых режимов нагружения. Среди наиболее распространенных в машиностроении методов поверхностного упрочнения деталей за-

метное место принадлежит процессу плазменного напыления износостойких покрытий [1–3]. Несмотря на ряд очевидных достоинств, которые присущи данному методу, ему свойственны и недостатки, обусловленные нестабильностью показателей качества напыленного слоя: химического и фазового состава структуры, степени расплавленности порошкового материала, количества и размера пор, а также характера границы между покрытием и основой [4–6]. Эти показатели закономерно определяют адгезионную

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, по государственному заданию № 2014/138, проект № 257.

прочность покрытий (прочность сцепления с основой), знак, величину и закономерность распределения остаточных напряжений в слое покрытия. Так, относительно невысокий уровень адгезионной прочности при высоких контактных давлениях может являться причиной нарушения сплошности поверхности плазменных покрытий в виде отслоений и сколов частиц покрытия в процессе эксплуатации оборудования, что, естественно, ограничивает его технический ресурс.

С целью увеличения адгезионной прочности, уменьшения пористости, ликвидации нерасплавленных частиц порошка в структуре покрытий и обеспечения равномерного распределения микротвердости по глубине упрочненного слоя используют повторное оплавление покрытий концентрированными источниками энергии [7–9].

Анализ технологических возможностей основных методов обработки концентрированными источниками энергии (электродуговой, электронно-лучевой, лазерный, плазменный и индукционный) [10, 11], которые можно использовать для повторного высокоэнергетического воздействия на структуру плазменных покрытий, показал, что при повторной обработке токопроводящих плазменных покрытий явным преимуществом обладает высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ) [12, 13]. Характерной особенностью этого процесса является то, что источник нагрева – объемный, и выделение энергии осуществляется в поверхностном слое, толщина которого определяется частотой тока, удельным электрическим сопротивлением и теплофизическими характеристиками материала покрытия. Выбор соответствующей частоты генератора позволяет выполнять одновременный нагрев во всей толщине нанесенного покрытия.

Цель настоящей работы – исследование структуры плазменного покрытия из высокохромистого чугуна марки ПГ-С27 после повторного оплавления ВЭН ТВЧ.

## 1. Методика экспериментального исследования

Покрытия наносили методом плазменного напыления на подложки размером  $100 \times 10 \times 10$  мм, изготовленные из стали 20. Предварительная

подготовка образцов производилась на обрабатывающем центре DMC 635 и плоскошлифовальном станке 3Г71. С целью активации поверхности образцы подвергались струйно-абразивной очистке острогранными частицами электрокорунда марки 13А, в результате чего была сформирована поверхность с шероховатостью  $Rz = 50 \dots 75$  мкм. Контроль размеров осуществлялся на профилографе-профилометре *Form Talysurf Series 2*.

В качестве материала для напыления использовали промышленный порошок хромистого чугуна марки ПГ-С27 с фракционным размером  $50 \dots 100$  мкм [14]. Обработка производилась на установке «Киев-7» плазмотроном ПУН-8 мощностью 40 кВт [15, 16]. Режимы напыления: сила тока дуги плазмотрона  $I = 140$  А; напряжение  $U = 140$  В; расход плазмообразующего газа (воздуха)  $G = 18$  л/мин при давлении  $P = 0,4$  МПа; дистанция напыления  $L = 110$  мм; скорость перемещения плазмотрона  $V = 12$  м/мин.

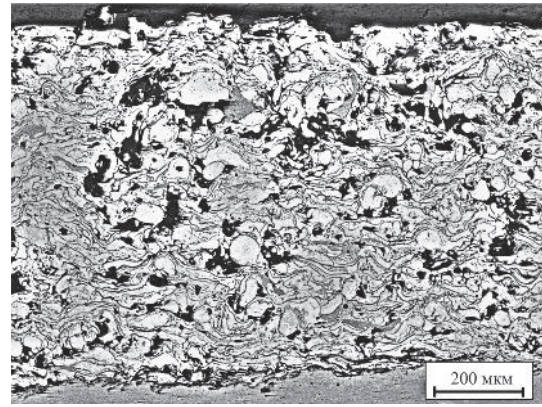
Оплавление поверхности образцов осуществлялось на экспериментальной установке, привод главного движения которой имеет плавное регулирование скорости [17]. Источником энергии выбран ламповый генератор марки ВЧГ 6-60/0.44 с рабочей частотой тока  $440 \cdot 10^3$  Гц. Процесс нагрева осуществлялся по глубинной схеме (глубина выделения энергии  $0,6 \dots 0,8$  мм) непрерывно-последовательным способом. При упрочнении использовался индуктор петлевого типа, оснащенный ферритовым магнитопроводом марки N87 (для работы в диапазоне частот до 500 кГц) с магнитной проницаемостью  $\mu_i = 2200$ . Удельная мощность нагрева варьировалась в пределах  $q_n = (2,8 \dots 3,4) \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>, а скорость перемещения детали  $V_d = (20 \dots 120)$  мм/с. Ширина активного провода индуктора составляла  $R_n = 2$  мм, обработка осуществлялась с зазором  $\Delta = 0,1 \dots 0,2$  мм.

Для определения фазового состава исходного порошка и нанесенного покрытия использовали рентгеновский дифрактометр ARL X'TRA. Источником рентгеновского излучения являлась медная трубка. Дифракционные картины регистрировали с шагом  $\Delta 2\theta$  и временем накопления 10 с на одну точку. Определение пористости покрытия осуществлялось микроскопическим (металлографическим) методом [18].Metalлографические исследования структуры выполняли

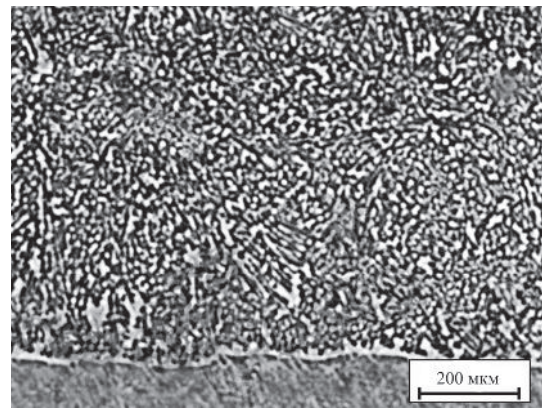
на световых микроскопах *NIKON Eclipse MA100* и *Carl Zeiss Axio Observer A1m* и растровом электронном микроскопе модели *Carl Zeiss EVO 50 XVP*. Металлографические шлифы готовили по стандартной технологии, основанной на механическом шлифовании и полировании анализируемого материала [19]. Для химического травления покрытий использовался реактив  $\text{FeCl} + \text{HNO}_3 + \text{HCl}$  (хлорного железа – 20 г, азотной кислоты – 1-2 мл, соляной кислоты – 100 мл). Микротвердость  $H_{\mu}$  покрытий определяли на приборе *Wolpert Group 402MVD*. Нагрузка на алмазный индентор составляла 0,98 Н. Энергодисперсионный анализ проводился на растровом электронном микроскопе *Carl Zeiss EVO 50 XVP* с использованием приставки *Inca X-Act*.

## 2. Результаты исследований и их обсуждение

При исследовании влияния режимов ВЭН ТВЧ на плазменные покрытия установлено, что в исследуемом диапазоне условий индукционного нагрева формируются различные модификации структуры: при минимальных значениях удельной мощности и максимальных значениях скорости перемещения образцов относительно индуктора наблюдается неполное оплавление по глубине покрытия, структура которого практически не отличается от исходного состояния. В то же время при высокой мощности и низких скоростях перемещения образцов формируется структура с излишней степенью термического воздействия. Проведенные исследования позволили установить область наиболее рациональных режимов повторного высокоэнергетического индукционного воздействия – диапазон удельной мощности от  $3,0 \cdot 10^8$  до  $3,2 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> при относительной скорости перемещения от 60 до 80 мм/с. При обработке плазменных покрытий в установленном рациональном диапазоне режимов формируется равномерно проплавленная структура покрытий. На рис. 1 показаны структуры покрытий после напыления плазмой (рис. 1, а) (режимы:  $I = 140$  А,  $G = 18$  л/мин,  $L = 110$  мм) и дополнительного воздействия на нее ВЭН ТВЧ ( $q_{\text{и}} = 3,1 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>,  $V_{\text{д}} = 80$  мм/с). Отчетливо видно, что при дополнительном воздействии ВЭН ТВЧ в структуре плазменного покрытия происходят существенные изменения



а



б

Рис. 1. Структуры покрытий:  
а – после плазменного напыления; б – после плазменного напыления и оплавления ВЭН ТВЧ

(рис. 1, б): значительно уменьшено количество пор и нерасплавленных частиц порошка, отсутствуют участки с несплошностью на переходной границе. Экспериментальные данные показали, что пористость исходной структуры составляла  $\Pi = 12$  %. Оплавление покрытия ВЭН ТВЧ позволило достичь значения  $\Pi = 1$  %.

Результаты металлографического анализа подтверждаются и распределением микротвердости по глубине слоя покрытия (рис. 2).

В отличие от исходной структуры (рис. 2, а) (колебания значений микротвердости в пределах доверительного интервала достигают 1,7...2,8 ГПа) после воздействия ВЭН ТВЧ распределение микротвердости более равномерное (рис. 2, б) (доверительный интервал варьируется в пределах 0,5...1,3 ГПа), хотя в целом максимальная микротвердость покрытия осталась на уровне  $H_{\mu} \approx 8,5$  ГПа.

В то же время нельзя исключить и отрицательного влияния процесса ВЭН ТВЧ. В частности,

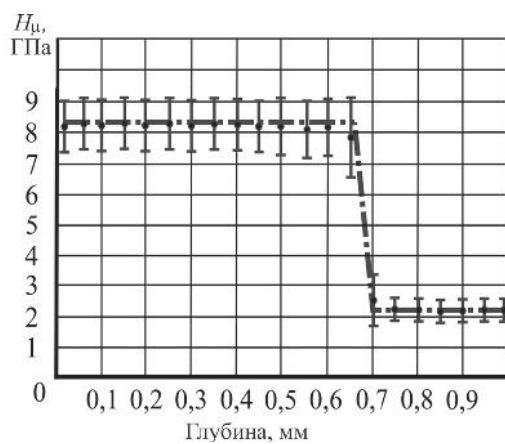
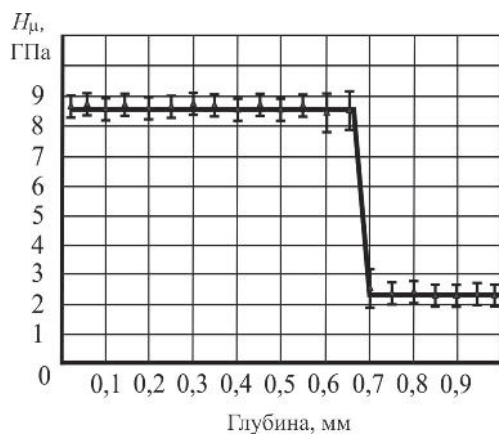

*a*

*б*

Рис. 2. Распределение микротвердости покрытий по глубине слоя:

*a* – после плазменного напыления; *б* – после плазменного напыления и последующего оплавления ВЭН ТВЧ

высокая температура нагрева может привести к изменению химического и фазового составов, а также к росту остаточных напряжений в покрытиях, что приведет к снижению уровня эксплуатационных свойств деталей машин.

Микроструктурный анализ исходных покрытий после химического травления позволил выявить наличие участков различной степени травимости (рис. 3, *a*). Мы предполагаем, что светлые частицы содержат в качестве основной фазы  $\gamma$ -железо, а темные вытравленные –  $\alpha$ -железо. Кроме того, по данным рентгенофазового анализа (рис. 4) установлено, что в карбидах  $M_7C_3$  в качестве металла преимущественно выступают атомы хрома (рис. 3, *б*) [14].

Микроструктура равномерно проплавленно-го ВЭН ТВЧ покрытия после химического травления при разной степени увеличения представлена на рис. 5.

В стальной основе наблюдается зона термического влияния порядка 50 мкм с характерной структурой феррита видманштеттова типа (рис. 5, *a*). Кроме того, на границе раздела в сторону покрытия прорастают дендритные кристаллы, образование которых свидетельствует о равномерном расплавлении всего покрытия вплоть до стальной основы.

Структура оплавленного покрытия представляет собой структуру заэвтектического чугуна, состоящую из мелкодисперсной эвтектики ледебурита и первичных кристаллов карбида (рис. 5, *б*). Из литературных данных известно, что увеличение в чугунах содержания хрома выше 10 % приводит к образованию в их структуре первичного карбида тригонального типа  $(Cr, Fe)_7C_3$  [20]. Проведенный нами энергодисперсионный анализ показал, что основными элементами, входящими в исследуемую фазу (рис. 6, *a*), являются железо, хром и углерод (рис. 6, *б, в*).

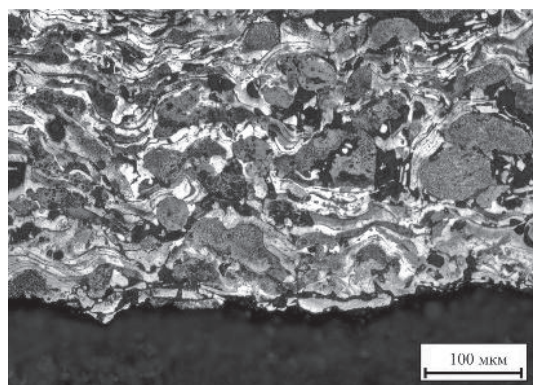
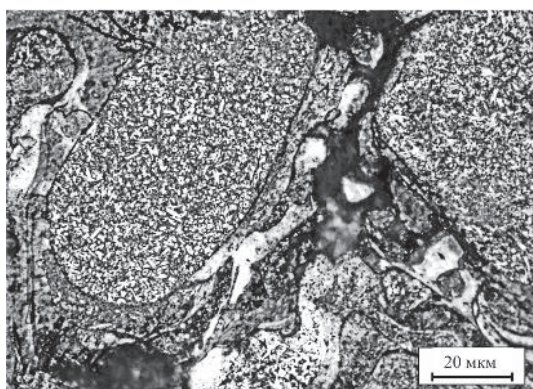

*a*

*б*

Рис. 3. Микроструктура исходного покрытия после химического травления:

*a* – формирование в покрытии частиц различной травимости; *б* – сохранение карбидов  $Cr_7C_3$  в структуре частиц материала покрытия



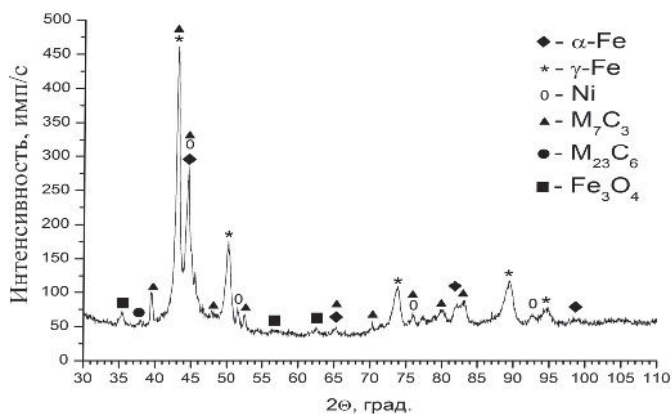
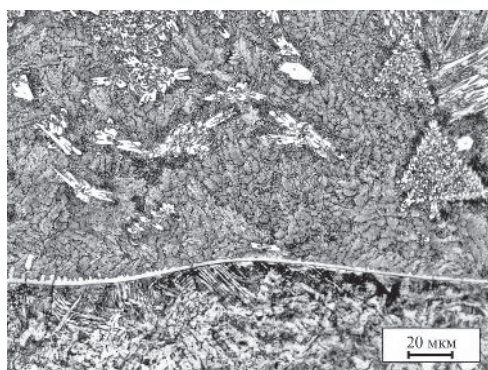
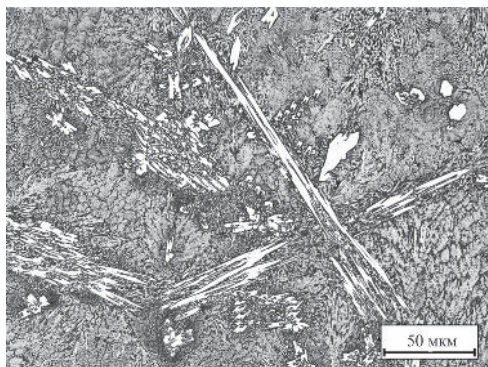


Рис. 4. Дифракционная картина покрытия сформированного методом плазменного напыления

ветвленных кристаллов карбида. При обработке ВЭН ТВЧ реализуется режим ускоренного охлаждения за счет быстрого теплоотвода в глубь стальной основы, что приводит к расщеплению кристаллов карбида и их разрастанию в виде «веера». В поперечных сечениях карбиды выглядят в виде гексагональных или тригональных призм, а разрез «веера» представляет собой комбинацию сечений нескольких тригональных призм (см. рис. 5).



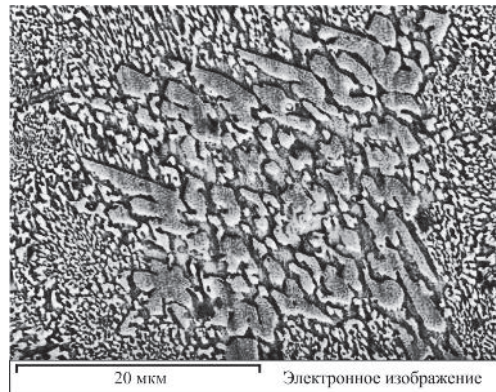
*a*



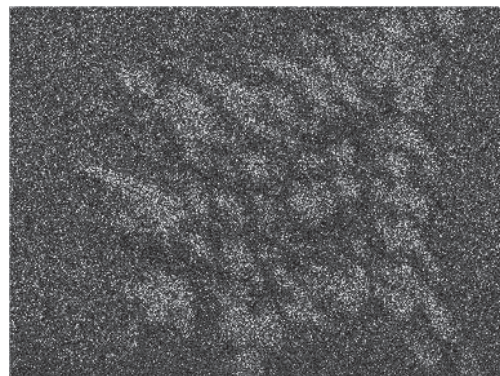
*б*

Рис. 5. Плазменное покрытие после воздействия ВЭН ТВЧ:  
*a* – граница раздела «основной металл-покрытие»; *б* – тонкая структура покрытия

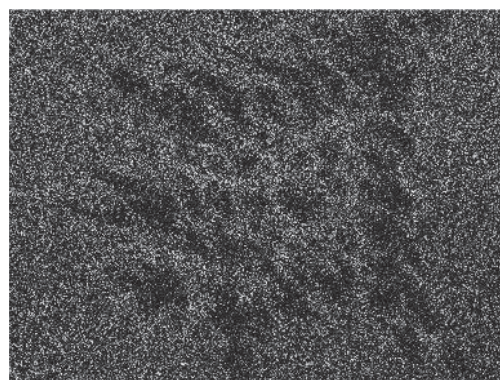
Как правило, при кристаллизации хромистокарбидной эвтектики карбиды типа  $M_7C_3$  не образуют непрерывную фазу, а располагаются в виде изолированных тригональных карбидов. Кроме того, в работе [21] показана особенность формирования первичных сложных карбидов в зависимости от условий охлаждения при кристаллизации. Увеличение скорости охлаждения приводит к образованию крупных, сильнораз-



*a*



*б*



*в*

Рис. 6. Результаты энергодисперсионного анализа покрытия:  
*a* – структура карбидного включения; *б* – спектр хрома; *в* – спектр железа

## Выводы

Таким образом, в результате проведения комплекса исследований было установлено следующее: полученные после повторного индукционного нагрева структуры плазменно напыленных слоев обладают более качественными показателями. Об этом свидетельствуют снижение пористости (с 12 % исходной структуры после плазменного напыления до 1 %), отсутствие нерасплавленных частиц и высокое качество границы между покрытием и основой. При этом распределение микротвердости по всей глубине упрочненного слоя практически равномерно, хотя ее уровень и не превышает максимально достигнутого значения на стадии плазменного напыления покрытий. Повторное высокотемпературное воздействие на поверхность плазменных покрытий существенно влияет на характер исходной структуры: видоизменяется карбидная фаза и формируется дендритная структура.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение износостойкости полученных покрытий. Ожидается увеличение уровня износостойкости плазменных покрытий после оплавления ВЭН ТВЧ.

## Список литературы

1. *Cartier M.* Handbook of surface treatments and coatings. – New York: ASME Press, 2003. – 464 p. – ISBN 978-1-86058-375-9.
2. Handbook of thermal spray technology / J.R. Davis, ed. – Ohio, USA: ASM International, Materials Park, 2004. – 338 p. – ISBN-10 0-87170-795-0. – ISBN-13 978-0-87170-795-6.
3. ASM Handbook. Vol. 5A: Thermal Spray Technology / R.C. Tucker Jr, ed. – Ohio, USA: ASM International, Materials Park, 2013. – 412 p. – ISBN: 978-1-61503-996-8.
4. *Пузряков А.Ф.* Теоретические основы технологии плазменного напыления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 360 с.
5. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардаговская. – Киев: Наукова думка, 1987. – 544 с.
6. *Чёсов Ю.С., Зверев Е.А., Плохов А.В.* Структура плазменных износостойких покрытий из порошкового материала марки ПГ-C27 // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2010. – № 1 (46). – С. 14–18.
7. *Nielsen S.E.* Laser fusing-a technique for surface improvement // *Industrial Laser Solutions*. – 2009. – Vol. 24, iss. 12. – P. 13.
8. Thermal modification of zinc-aluminum coated steel using lasers / R. Mathew, P. Stoddart, D. Nolan, Y. Durandet // *Proceedings of the 30th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO 2011)*. – Orlando, Florida, United States, 2011. – P. 457–462.
9. Методы повышения эксплуатационных свойств плазменных покрытий / Ю.С. Чёсов, П.В. Трегубчак, Е.А. Зверев, И.А. Ерохин // *Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 10 Всероссийской научно-практической конференции*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – С. 23–25.
10. *Fauchais P.L., Heberlein J. V.R., Boulos M.I.* Thermal Spray Fundamentals. – New York: Springer US Publ., 2014. – 1566 p. – doi: 10.1007/978-0-387-68991-3. – Print ISBN 978-0-387-28319-7.
11. *Advanced Tribology: Proceedings of CIST2008 & ITS-IFTToMM2008 / Jianbin Luo, Yonggang Meng, Tianmin Shao, Qian Zhao*. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag; Beijing: Tsinghua University Press, 2009. – 1056 p.
12. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Степанова Н.П.* Методика назначения рациональных режимов поверхностной закалки сталей с использованием концентрированных источников нагрева // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2006. – № 4 (33). – С. 17–19.
13. Анализ напряженно-деформированного состояния материала при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты / В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2014. – № 3 (64). – С. 90–102.
14. Особенности микроструктуры износостойких покрытий / В.С. Веселов, Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, П.В. Трегубчак, В.В. Базаркина, В.С. Ложкин // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2010. – № 4 (49). – С. 35–37.
15. *Чёсов Ю.С., Зверев Е.А.* Исследование износостойкости покрытий, нанесенных методом плазменного напыления // *Научный вестник НГТУ*. – 2008. – № 3 (32). – С. 175–181.
16. *Чёсов Ю.С., Зверев Е.А.* Методика нанесения плазменных износостойких покрытий // *Научный вестник НГТУ*. – 2014. – № 2 (55). – С. 156–165.
17. *Скиба В.Ю.* Повышение эффективности технологического процесса обработки деталей машин при интеграции абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.03.01 / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2008. – 257 с.
18. Методы исследований материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов,

А.О. Токарев, В.И. Синдеев. – М.: Мир, 2004. – 384 с. – ISBN 5-03-003572-9.

19. ASM Handbook. Vol. 9: Metallography and Microstructures / G.F. Vander Voort, ed. – ASM International Publ., 2004. – 1184 p. – ISBN 978-0-87170-706-2.

20. *Гарбер М.Е.* Износостойкие белые чугуны. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2010. – 281 с.

21. *Бунин К.П., Малиночка Я.Н., Таран Ю.Н.* Основы металлографии чугуна. – М.: Metallurgy, 1969. – 420 с.

## OBRAOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(65), October – December 2014, Pages 11–18

### Structure of wear resistant plasma coatings after high-energy treatment using high-frequency currents

**Chesov Yu. S.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: chesov@ngs.ru

**Zverev E. A.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), e-mail: egor\_z@ngs.ru

**Ivancivsky V. V.**<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ivancivskij@corp.nstu.ru

**Skeeba V. Yu.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skeeba\_vadim@mail.ru

**Plotnikova N. V.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: plotnikova1975@mail.ru

**Lobanov D. V.**<sup>2</sup>, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: mf\_nauka@brstu.ru

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

<sup>2</sup> Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

#### Abstract

**Purpose:** In order to ensure the required level of wear resistance of high-chromium cast iron powder plasma coatings, research on the effect of high-energy heating by high frequency currents (HEH HFC) on the quality of the surface layer is conducted. **Methods:** The results of metallographic, X-ray diffraction and energy-dispersive studies of the structure of wear-resistant plasma coatings before and after the induction heating are presented. **Results and Discussion:** Pores, unmelted powder particles and discontinuities in the transitional boundary, as well as improved uniformity of the microhardness in the depth the layer have virtually disappeared after additional high-temperature influence. After plasma spraying the value of the microhardness confidence interval was 1.7 ... 2.8 GPa; after HEH HFC - microhardness confidence interval ranged between 0.5 and 1.3 GPa. In the structure of plasma coatings carbide component is preserved in the selected area of induction heating modes. An efficient mode of HFC reheating (source specific power  $q = (3,0 \dots 3,2) \cdot 108 \text{ W/m}^2$ , the relative rate of details movement  $V = 60 \dots 80 \text{ mm/s}$ ) at which there is a decrease in porosity of the plasma coating from 12 % to 1% is set.

#### Keywords:

quality, wear resistance, high-chromium cast iron, plasma coatings, structure, high-energy influence, high-frequency currents.

#### References

1. Cartier M. Handbook of surface treatments and coatings. New York, ASME Press, 2003. 464 p. ISBN: 978-1-86058-375-9.

2. Davis J.R. ed. Handbook of thermal spray technology. ASM International, Materials Park, 2004. 338 p. ISBN-10: 0-87170-795-0. ISBN-13: 978-0-87170-795-6.

3. Tucker R.C. Jr., ed. ASM Handbook, Volume 5A: Thermal Spray Technology. ASM International, Materials Park, 2013. 412 p. ISBN: 978-1-61503-996-8.

4. Puzryakov A.F. *Teoreticheskie osnovy tekhnologii plazmennogo napyleniya* [Theoretical Foundations of Technology Plasma Spraying]. Moscow, BMSTU Publ., 2008. 360 p.

5. Borisov Yu.S., Kharlamov Yu.A., Sidorenko S.L., Ardatovskaya E.N. *Gazotermicheskie pokrytiya iz poroshkovykh materialov: spravochnik* [Thermal spray coating of powder materials. Handbook]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987. 544 p.

6. Chesov Yu.S., Zverev E.A., Plokhov A.V. Struktura plazmennyykh iznosostoikikh pokrytii iz poroshkovogo materiala marki PG-S27 [Structure of plasma wear-resistant coatings of powdered ПГ-C27]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) - Metal Working and Material Science*, 2010, no. 1 (46), pp. 14–18.
7. Nielsen S.E. Laser fusing-a technique for surface improvement. *Industrial Laser Solutions*, 2009, vol. 24, iss. 12, p. 13.
8. Mathew R., Stoddart P., Nolan D., Durand Y. Thermal modification of zinc-aluminum coated steel using lasers. Proceedings of the 30th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO 2011), Orlando, Florida, United States, 2011, pp. 457–462.
9. Chesov Yu.S., Tregubchak P.V., Zverev E.A., Erokhin I.A. [Methods to improve the performance properties of plasma coatings]. *Materialy 10-i Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Problemy povysheniya effektivnosti metalloobrabotki v promyshlennosti na sovremennom etape"* [Proceedings of the 10th All-Russian Scientific and Practical Conference "Problems of increasing efficiency in the metalworking industry at the present stage"]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2012, pp. 23–25.
10. Fauchais P.L., Heberlein J. V.R., Boulos M.I. Thermal Spray Fundamentals. New York, Springer US Publ., 2014. 1566 p. doi: 10.1007/978-0-387-68991-3. Print ISBN 978-0-387-28319-7.
11. Jianbin Luo, Yonggang Meng, Tianmin Shao, Qian Zhao Advanced Tribology: Proceedings of CIST2008 & ITS-IFTToMM2008. Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 1056 p.
12. Ivantsivskii V.V., Skeebe V.Yu., Stepanova N.P. Metodika naznacheniya ratsional'nykh rezhimov poverkhnostnoi zakalki staley s ispol'zovaniem kontsentrirrovannykh istochnikov nagreva [Definition technique of rational modes of surface hardening of steels with concentrated heat sources]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) - Metal Working and Material Science*, 2006, no. 4 (33), pp. 17–19.
13. Skeebe V.Yu., Pushnin V.N., Erokhin I.A., Kornev D.Yu. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya materiala pri vysokoenergeticheskom nagreve tokami vysokoi chastoty [Analysis of the stress-strain state of the material under high-energy heating by high frequency currents]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) - Metal Working and Material Science*, 2014, no. 3 (64), pp. 90–102.
14. Veselov V.S., Chesov Yu.S., Zverev E.A., Tregubchak P.V., Bazarkina V.V., Lozhkin V.S. Osobennosti mikrostruktury iznosostoikikh pokrytii [Features of a microstructure of wear-resistant plasma coatings]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) - Metal Working and Material Science*, 2010, no. 4 (49), pp. 35–37.
15. Chesov Yu.S., Zverev E.A. Issledovanie iznosostoikosti pokrytii, nanesennykh metodom plazmennogo napyleniya [Research of wear resistance of the coatings received by the method of plasma spraying]. *Nauchnyi vestnik NGTU - Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2008, no. 3 (32), pp. 175–181.
16. Chesov Yu.S., Zverev E.A. Metodika naneseniya plazmennyykh iznosostoikikh pokrytii [Technique of wear-resistant plasma coating spraying]. *Nauchnyi vestnik NGTU - Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2014, no. 2 (55), pp. 156–165.
17. Skeebe V.Yu. *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei mashin pri integratsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of the technological processing machinery parts with the integration of abrasive grinding and surface hardening currents by high frequency currents. Dr. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, 2008. 257 p.
18. Tushinskii L.I., Plokhov A.V., Tokarev A.O., Sindeev V.I. *Metody issledovaniya materialov: Struktura, svoystva i protsessy naneseniya neorganicheskikh pokrytii* [Techniques of materials research: The structure, properties and deposition processes of inorganic coatings]. Moscow, Mir Publ., 2004. 384 p. ISBN 5-03-003572
19. Vander Voort G.F., ed. ASM Handbook. Vol. 9: Metallography and Microstructures. ASM International Publ., 2004. 1184 p. ISBN: 978-0-87170-706-2
20. Garber M.E. *Iznosostoikie belye chuguny* [Wear-resistant white iron]. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 281 p.
21. Bunin K.P., Malinochka Ya.N., Taran Yu.N. *Osnovy metallografii chuguna* [Fundamentals of cast iron metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969. 420 p.

### Funding

The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Public contract no. 2014/138, project no. 257).

Received 22 September 2014

Revised 06 October 2014

Accepted 05 November 2014

УДК 622.002.5

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ОБОЛОЧКИ ПРИ СБОРКЕ СЕКЦИЙ ГЕОХОДА\*

*В.В. АКСЕНОВ, доктор техн. наук, профессор*  
*А.В. ВАЛЬТЕР, канд. техн. наук, доцент*  
*В.Ю. БЕГЛЯКОВ, канд. техн. наук, доцент*  
(ЮТИ ТПУ, г. Юрга)

Поступила 25 сентября 2014  
Рецензирование 23 октября 2014  
Принята к печати 03 ноября 2014

**Вальтер А.В.** – 652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26,  
Юргинский технологический институт (филиал)  
федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,  
e-mail: avwalter@tpu.ru

Рассматриваются вопросы обеспечения геометрической точности при сборке крупногабаритных кольцевых сегментных изделий на примере сборки секций геолода. Предложена схема установки, заключающаяся в базировании сектора поверхностью оболочки по неподвижным опорам, при этом оболочки отдельных секторов аппроксимируют оболочку секции в целом. Получены аналитические выражения для определения величины отклонения профиля сектора от номинальной окружности с учетом действительных размеров секторов и расстояний, устанавливающих положение опор. Выявлены факторы, влияющие на геометрическую точность оболочки секции, и установлен характер их влияния на точность. Приведена постановка задачи определения максимальных значений отклонения профиля сектора в зависимости от допусков на размеры секторов и расстояния, устанавливающие положение опор. Получены зависимости максимальных значений отклонения профиля сектора от величины допусков. Показано, что при предложенной схеме установки можно обеспечить более высокую точность оболочки секции, чем та, которую имеет отдельный сектор.

**Ключевые слова:** крупногабаритные кольцевые сегментные изделия, базирование, сборка, геометрическая точность, допуск, геолод, оболочка.

## Введение

В настоящее время активно развивается новое направление в горном машиностроении, связанное с разработкой и исследованиями геолодов. Геолод – аппарат, предназначенный для проходки горных выработок различного назначения и расположения в подземном пространстве и движущийся в породном массиве с использованием геосреды [1, 2]. Первый опыт по созданию геолодов

относится к 1980–1990-м гг. [3–5], когда, в частности, были изготовлены экспериментальные агрегаты ЭЛАНГ-3 и ЭЛАНГ-4. Результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в данной области показали необходимость постановки на производство новых, более совершенных образцов геолода.

Геолод как предмет производства обладает совокупностью специфических конструктивных признаков, обуславливающих необходимость

\* Полученные результаты достигнуты в ходе реализации комплексного проекта при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ. Договор №02.G25.31.0076.

разработки и обоснования новых технологических решений. В частности, ярко выраженной спецификой обладает носитель геохода – корпусные изделия геохода, являющиеся базовыми несущими элементами, которые взаимодействуют всей наружной поверхностью (оболочкой) с геосредой. Контакт наружной поверхности корпуса геохода с геосредой накладывает требование обеспечения геометрической точности оболочки. Несоблюдение требований геометрической точности приводит к нарушениям работоспособности машины, снижению ее надежности и энергоэффективности [6–9].

Наиболее распространенным вариантом компоновки геохода [10] является вариант с носителем, состоящий из головной и стабилизирующей секции. В соответствии с данной компоновкой разрабатывается опытный образец геохода ФЮРА. 612322.401.0.00.00.000 [11], имеющий

цилиндрическую оболочку радиусом  $1600 \pm 5$  мм (рис. 1). Каждая из секций является сборной и состоит из четырех секторов. Выполнение фрагментов оболочки на каждом из секторов радиусом  $1600 \pm 5$  мм является непростой технологической задачей, что связано с недостаточной жесткостью каждого из отдельных секторов и сложностью контроля радиуса оболочки. Механическая обработка секции в сборе недопустима вследствие высокой трудоемкости и наличия конструктивных элементов, прерывающих оболочку.

В связи с этим была поставлена задача обеспечения геометрической точности оболочки в процессе сборки секций геохода при значениях допусков на радиус секторов, превосходящих допуски на радиус секции. При этом в целях сокращения трудоемкости сборки необходимо стремиться к обеспечению точности без регулирования, пригонки и подбора.

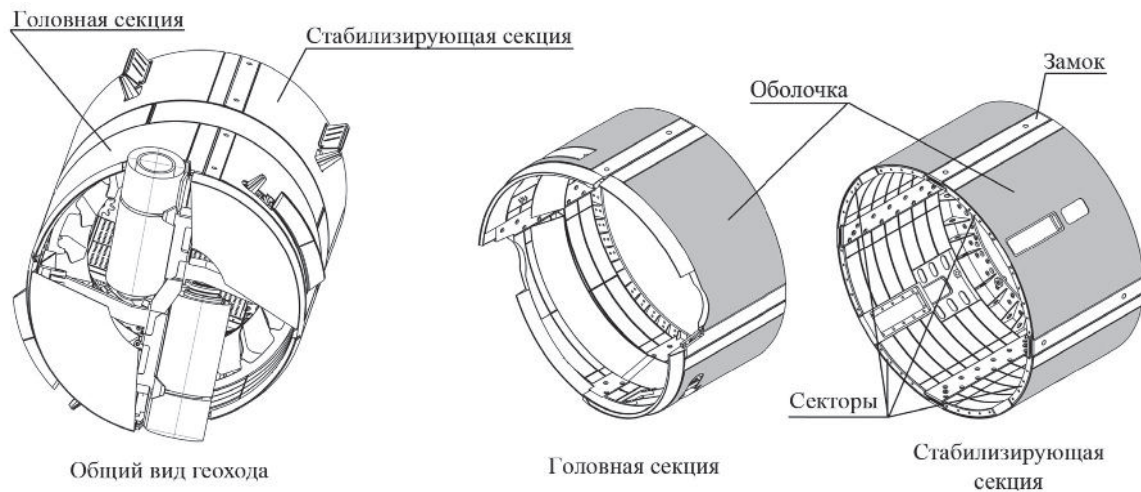


Рис. 1. Геоход и секции

## 1. Теория

### 1.1. Схема обеспечения геометрической точности оболочки секции

Сформулированная во введении задача может быть решена путем обеспечения при сборке такого положения секторов, при котором их оболочки будут с достаточной точностью аппроксимировать оболочку секции в целом. Данный подход реализуется по схеме, изображенной на рис. 2. Секторы устанавливаются на сборочной плите в упор к регулируемым опорам и закрепляются винтами. При этом должно обеспечиваться такое взаимное расположение секторов, при котором поверхность секции целиком находится

между наибольшим и наименьшим предельными цилиндрами. Для обеспечения собираемости заранее соединенные замки могут быть приварены по месту между секторами.

### 1.2. Расчетная схема и аналитические выражения

Для определения факторов, влияющих на точность формы оболочек секций и вывода аналитических выражений, устанавливающих данные связи, составим расчетную схему к модели формирования погрешности формы оболочки (рис. 3).

Для этого представим задачу в виде плоской, рассматривая поперечное сечение секции аналогично тому приему, который используется в

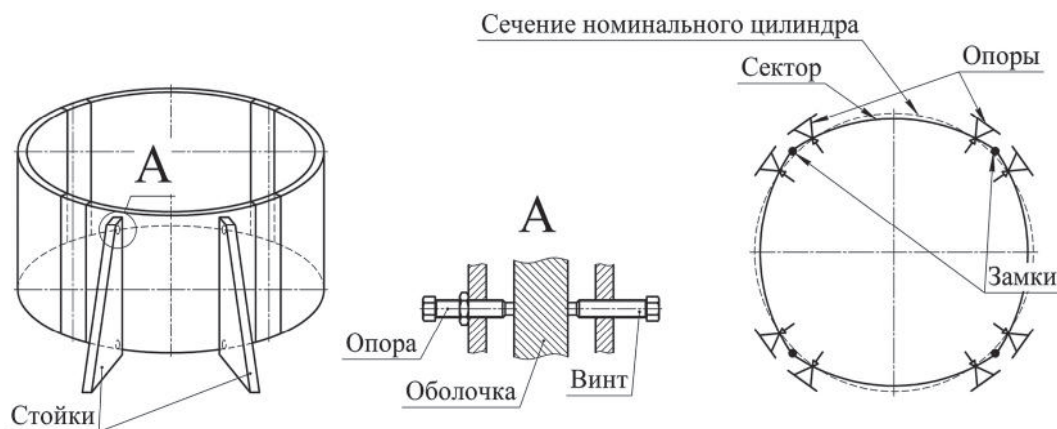


Рис. 2. Схема установки секторов при сборке

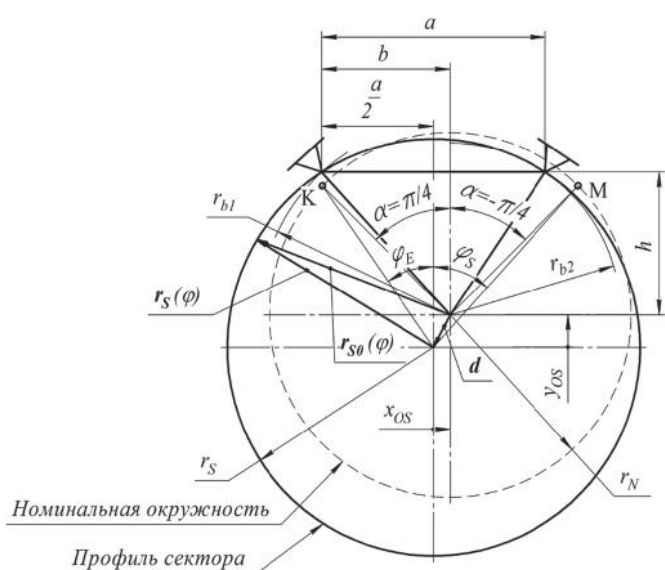


Рис. 3. Расчетная схема к модели формирования погрешности оболочки

работах [12–14]. Схема составлена для отдельного сектора, положение которого целиком определяется положением пары опор. В общем случае окружность данного сектора отличается от номинальной окружности секции как величиной радиуса, так и положением центра. Положение центра номинальной окружности задается совокупностью всех секторов секции [15], в связи с чем нельзя считать, что расстояния от центра номинальной окружности до опор являются равными.

Отклонение профиля сектора от номинальной окружности непостоянно и выражается следующим уравнением:

$$\Delta(\varphi) = |\mathbf{r}_{s0}(\varphi)| - r_N, \tag{1}$$

где  $r_N$  – радиус номинальной окружности оболочки;  $\mathbf{r}_{s0}(\varphi)$  – радиус-вектор точки сектора от

носителем центра номинальной окружности;  $\varphi$  – текущий угол радиуса-вектора.

Радиус-вектор точки сектора относительно центра номинальной окружности определяется следующей суммой векторов:

$$\mathbf{r}_{s0}(\varphi) = \mathbf{d} + \mathbf{r}_s(\varphi), \tag{2}$$

где  $\mathbf{d}$  – радиус-вектор центра дуги сектора относительно центра номинальной окружности;  $\mathbf{r}_s(\varphi)$  – радиус-вектор точки сектора относительно центра дуги сектора.

Приведенные выше радиусы-векторы могут быть определены из выражений

$$\begin{aligned} \mathbf{d} &= -x_{0s}\mathbf{i} - y_{0s}\mathbf{j}; \\ \mathbf{r}_s(\varphi) &= r_s \sin \varphi \mathbf{i} + r_s \cos \varphi \mathbf{j}, \end{aligned} \tag{3}$$

где  $x_{0s}$  и  $y_{0s}$  – координаты смещения центра дуги сектора относительно центра номинальной окружности;  $r_s$  – радиус сектора.

Координаты смещения центра дуги сектора определяются из следующих выражений:

$$\begin{aligned} x_{0s} &= \frac{a}{2} - \sqrt{r_{b1}^2 - h^2}; \\ y_{0s} &= h - \frac{1}{2}\sqrt{4r_s^2 - a^2}; \\ h &= \frac{2}{a}\sqrt{p(p-a)(p-r_{b1})(p-r_{b2})}; \\ p &= \frac{1}{2}(a + r_{b1} + r_{b2}), \end{aligned} \tag{4}$$

где  $a$  – расстояние между опорами;  $r_{b1}$  и  $r_{b2}$  – расстояния от центра номинальной окружности до опор.

Выражения (1)–(4) полностью описывают зависимость отклонения профиля сектора от номинальной окружности.

Поскольку корпус состоит из четырех секторов, отклонения необходимо рассматривать на участке номинальной окружности  $\alpha \in [-\frac{\pi}{4}; \frac{\pi}{4}]$ .

Для использования выражений (1)–(3) необходимо найти соответствующий участок  $\varphi \in [\varphi_s; \varphi_E]$  (см. рис. 3). Если принять за начало системы координат центр номинальной окружности, то уравнение окружности сектора можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} x &= -r_s \sin \varphi - x_{0s}; \\ y &= r_s \cos \varphi - y_{0s}. \end{aligned} \tag{5}$$

Для точки *K* (см. рис. 3), соответствующей  $\alpha = \frac{\pi}{4}$  и  $\varphi_E$ , выполняется условие  $-x = y$ . Для

точки *M* (см. рис. 3), соответствующей  $\alpha = -\frac{\pi}{4}$

и  $\varphi_s$ , выполняется условие  $x = y$ . Используя данные условия в выражениях (5), можно найти границы участка  $[\varphi_s; \varphi_E]$ :

$$\begin{aligned} \varphi_s &= \arcsin\left(\frac{x_{0s} - y_{0s}}{r_s \sqrt{2}}\right) - \frac{\pi}{4}; \\ \varphi_E &= \frac{\pi}{4} - \arcsin\left(\frac{-x_{0s} - y_{0s}}{r_s \sqrt{2}}\right). \end{aligned} \tag{6}$$

### 1.3. Факторы, влияющие на геометрическую точность оболочки секции

Анализ полученных выражений показывает, что на отклонение профиля сектора от номинальной окружности оказывают влияние следующие факторы:

- радиус номинальной окружности ( $r_N$ );
- действительный радиус сектора ( $r_s$ );
- действительные расстояния от центра номинальной окружности до опор ( $r_{b1}$  и  $r_{b2}$ );
- расстояние между опорами ( $a$ ).

Рассмотрим влияние перечисленных факторов на отклонение профиля сектора от номинальной окружности. Поскольку радиус номинальной окружности ( $r_N$ ) является величиной постоянной для рассматриваемого предмета производства, в дальнейших расчетах будем принимать его равным  $r_N = 1600$  мм в соответствии с параметрами геохода ФЮРА. 612322.401.0.00.00.000 [11].

В случае неравенства радиуса номинальной окружности и действительного радиуса сектора ( $r_N \neq r_s$ ) неизбежно будет возникать отклонение профиля сектора. Причем, как отмечалось выше, отклонение является непостоянным для различных участков дуги сектора. На рис. 4 приведена зависимость отклонения профиля сектора от полярного угла  $\varphi$ .

Из графика, изображенного на рис. 4, видно, что на характер зависимости существенное влияние оказывают действительные расстояния от центра номинальной окружности до опор.

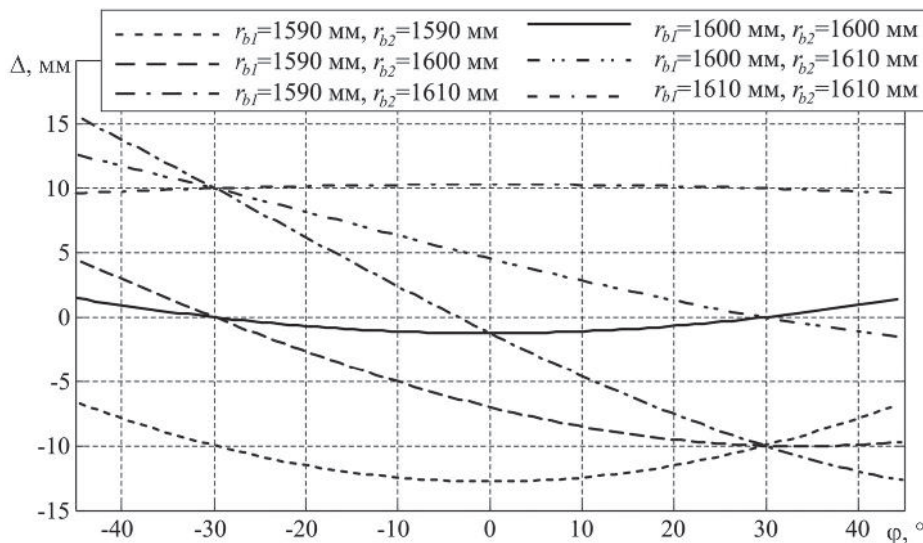


Рис. 4. Зависимость отклонения профиля сектора от полярного угла ( $r_N = 1600$  мм,  $r_s = 1608$  мм,  $a = 1600$  мм)



Учитывая, что для определения соответствия требованиям геометрической точности необходимо анализировать наибольшие отклонения, установим характер влияния перечисленных выше факторов на величину экстремального отклонения формы сечения сектора от номинальной окружности, определяемого как:

$$\Delta_{EX} = \arg \max |\Delta|. \quad (7)$$

Отрицательные значения  $\Delta_{EX}$  означают, что точка сектора с максимальным отклонением лежит внутри номинальной окружности.

На рис. 5 показана зависимость максимального значения отклонения профиля сектора от радиуса сектора. Нарушения непрерывности некоторых из приведенных зависимостей связаны с переходом экстремальных отклонений с середины сектора на его периферию, или наоборот.

На рис. 6 приведена зависимость максимального значения отклонения профиля сектора от расстояния между опорами. Как следует из графика (см. рис. 6), для определенных соотношений  $r_{b1}$  и  $r_{b2}$  существуют некоторые значения расстояния между опорами, обеспечивающие наименьшую величину отклонений профиля.

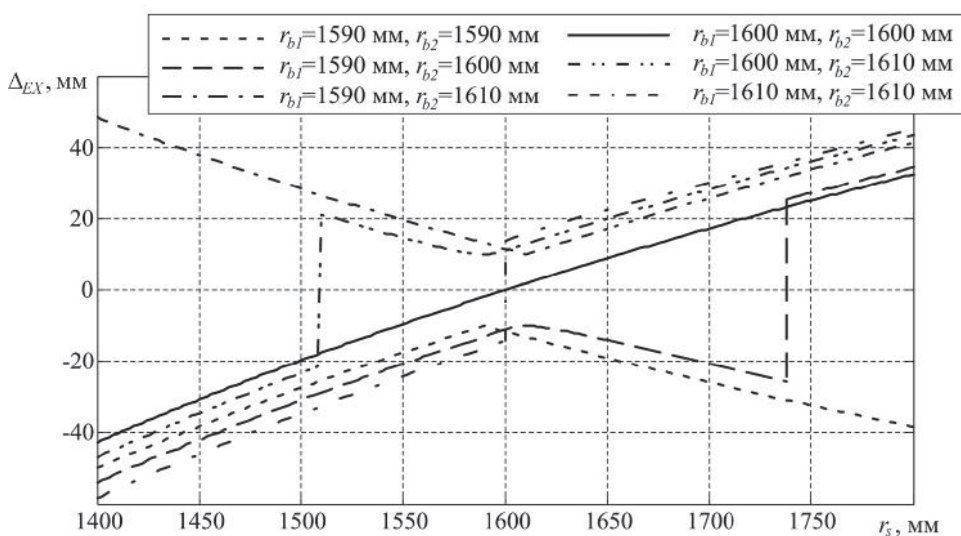


Рис. 5. Зависимость экстремального отклонения профиля сектора от радиуса сектора ( $r_N = 1600$  мм,  $a = 1600$  мм)

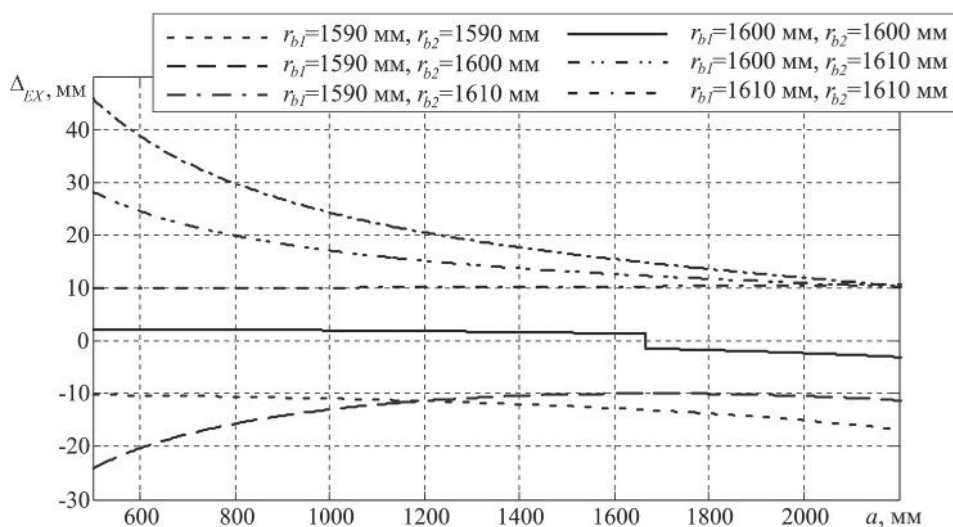


Рис. 6. Зависимость экстремального значения отклонения профиля сектора от расстояния между опорами ( $r_N = 1600$  мм,  $r_s = 1608$  мм)

### 1.4. Влияние допусков на геометрическую точность оболочки секции

С использованием полученных выражений (1)–(4) может быть решена задача определения максимального значения отклонения профиля сектора от номинальной окружности  $\Delta_{\max}$  по известным значениям радиуса номинальной окружности  $r_N$ , действительного радиуса сектора  $r_s$ , действительным расстоянием от центра номинальной окружности до опор  $r_{b1}$  и  $r_{b2}$ , расстояния между опорами  $a$ . Данная задача решается путем максимизации модуля функции  $\Delta$ :

$$\Delta_{\max} = \max |\Delta(\varphi)|; \tag{8}$$

$$\varphi \in [\varphi_{\min}; \varphi_{\max}],$$

где  $\varphi_{\min}$  и  $\varphi_{\max}$  – наименьшее и наибольшее значения угловой координаты профиля сектора соответственно.

Большой практический интерес имеет решение данной задачи с учетом допусков. Если принять симметричное расположение полей допусков, то решение данной задачи выражается в следующем виде:

$$\Delta_{\max} = \max |\Delta(\varphi, r_s, r_{b1}, r_{b2}, a)|;$$

$$\varphi \in [\varphi_{\min}; \varphi_{\max}];$$

$$r_s \in \left[ r_{sn} - \frac{1}{2} T_s; r_{s \max} + \frac{1}{2} T_s \right];$$

$$r_{b1} \in \left[ r_{bn} - \frac{1}{2} T_b; r_{bn} + \frac{1}{2} T_b \right]; \tag{9}$$

$$r_{b2} \in \left[ r_{bn} - \frac{1}{2} T_b; r_{bn} + \frac{1}{2} T_b \right];$$

$$a \in \left[ a_n - \frac{1}{2} T_a; a_n + \frac{1}{2} T_a \right],$$

где  $r_{sn}$ ,  $r_{bn}$ ,  $a_n$  – номинальные значения радиуса сектора, расстояния от центра номинальной окружности до опор и расстояния между опорами соответственно;  $T_s$ ,  $T_b$ ,  $T_a$  – допуски на радиус сектора, на расстояния от центра номинальной окружности до опор и на расстояние между опорами соответственно.

Как следует из рис. 6, изменение расстояния  $a$  между опорами в пределах обычных допусков не способно существенно повлиять на величину отклонений. В связи с этим упростим задачу, приняв  $a = \text{const}$ .

Проведенные в соответствии с (9) вычисления показали, что в случае симметричного расположения поля допуска максимальные значения отклонений наблюдаются при минимальном значении  $r_s$  и при минимальных или максимальных значениях  $r_{b1}$  и  $r_{b2}$ . В связи с этим дальнейшие расчеты  $\Delta_{\max}$  целесообразно проводить в следующем виде:

$$\Delta_{\max} = \max (\Delta(\varphi, r_s, r_{b1}, r_{b2}, a));$$

$$\varphi \in [\varphi_{\min}; \varphi_{\max}];$$

$$r_s = r_{sn} - \frac{1}{2} T_s; \tag{10}$$

$$r_{b1} = r_{bn} - \frac{1}{2} T_b, r_{b2} = r_{bn} + \frac{1}{2} T_b;$$

$$r_{b2} = r_{bn} - \frac{1}{2} T_b, r_{b1} = r_{bn} + \frac{1}{2} T_b;$$

$$a = \text{const}.$$

На рис. 7 представлены зависимости максимальных значений отклонения профиля сектора от допусков. Для принятых условий ( $r_N = r_{sn} = r_{bn} = 1600$  мм) при значениях допусков в пределах 20 мм зависимости  $\Delta_{\max}$  от  $T_s$  и  $T_b$  близки к линейным. Явная нелинейность становится заметной лишь при значениях допусков в сотни миллиметров.

Как следует из графиков, изображенных на рис. 7, на характер зависимостей влияет расстояние между опорами  $a$ . Установим характер данного влияния, построив зависимость максимальных значений отклонения профиля сектора от расстояния между опорами  $a$  и допусков  $T_s = T_b$  (рис. 8). На основании графика, представленного на рис. 8, можно заключить, что есть некоторое значение расстояния  $a$ , при котором максимальное значение отклонения профиля сектора минимально, причем данное значение мало отличается для различных значений допусков  $T_s$  и  $T_b$ .

## 2. Результаты и обсуждение

Выполненные расчеты показывают, что в общем случае все факторы, являющиеся исходными данными при расчете ( $r_N, r_s, r_{b1}, r_{b2}, a$ ), значимо влияют на величину отклонений профиля сектора от номинальной окружности и должны учитываться при определении величины погрешности формы оболочек в процессе сборки.

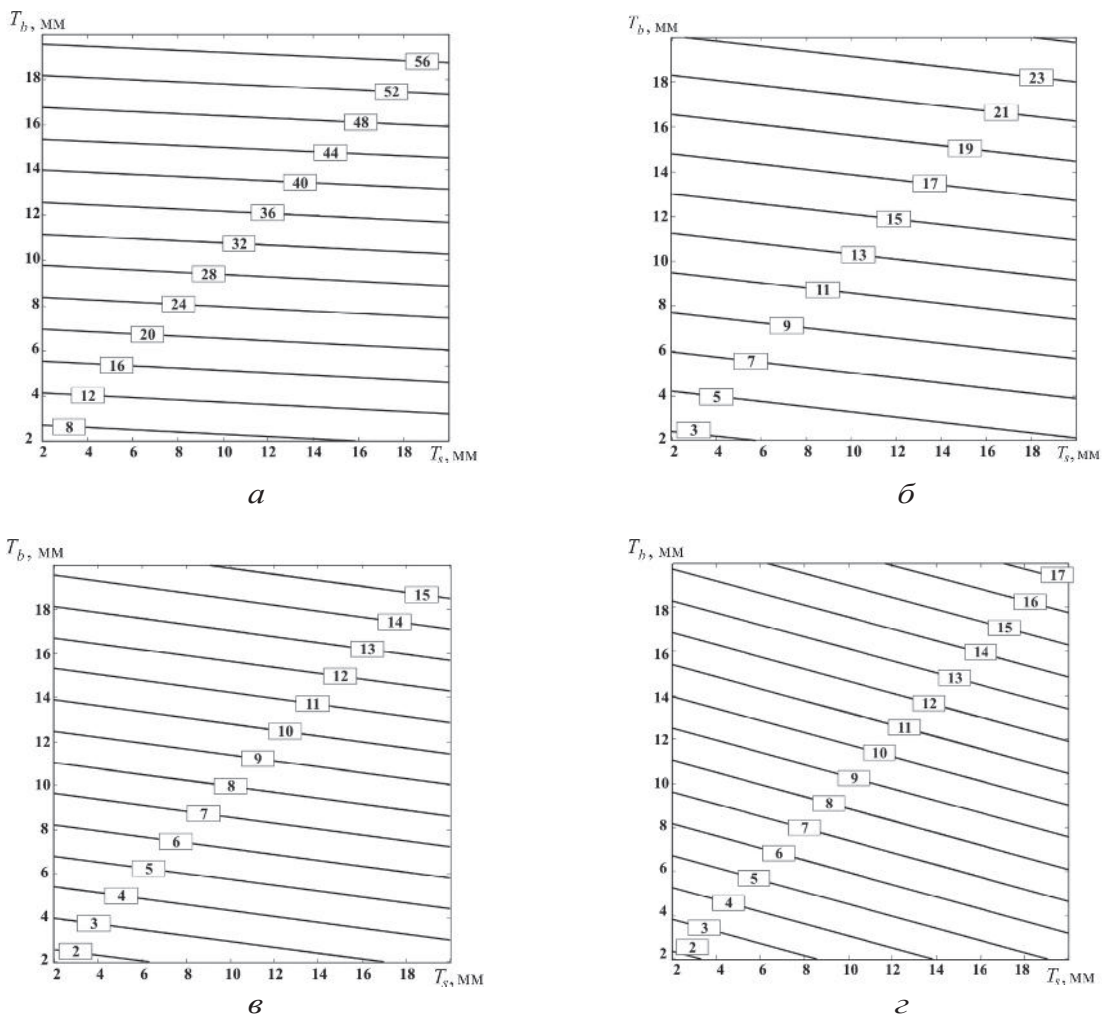


Рис. 7. Зависимость максимальных значений отклонения профиля сектора ( $\Delta_{\text{max}}$ , мм) от допусков при  $r_N = r_{sn} = r_{bn} = 1600$  мм:  
 $a - a = 400$  мм;  $б - a = 1000$  мм;  $в - a = 1600$  мм;  $г - a = 2200$  мм

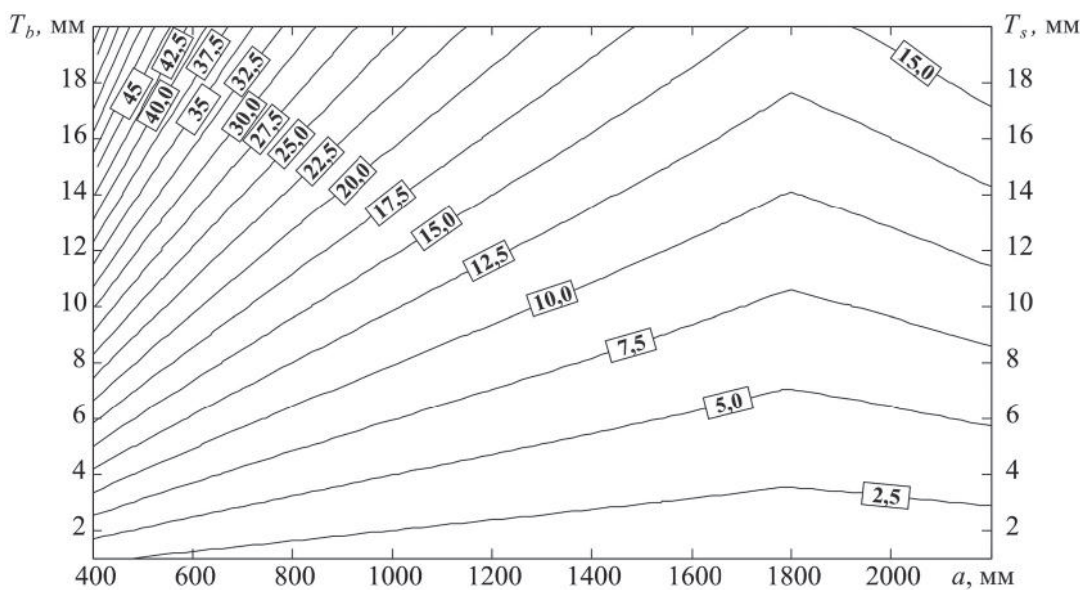


Рис. 8. Зависимость максимальных значений отклонения профиля сектора ( $\Delta_{\text{max}}$ , мм) от расстояния между опорами  $a$  и допусков при  $r_N = r_{sn} = r_{bn} = 1600$  мм

При этом изменение значения одних факторов (например,  $r_{b1}$  и  $r_{b2}$ ) зачастую приводит к изменению характера влияния других факторов (например,  $r_s$ ) на величину экстремального значения отклонения профиля сектора  $\Delta_{EX}$ .

Определение величины максимальных отклонений профиля сектора по заданным значениям исходных данных сводится к задаче максимизации одномерной функции  $\Delta(\varphi)$ . Учет допусков на величины исходных данных усложняет задачу, поскольку требует максимизации многомерной функции  $\Delta(\varphi, r_s, r_{b1}, r_{b2}, a)$ . Расчеты (см. рис. 7) показывают, что допуск на расстояние от центра номинальной окружности до опор  $T_b$  оказывает большее влияние на  $\Delta_{max}$ , чем допуск на радиус сектора  $T_s$ . Таким образом, ужесточение допуска на расстояние от центра номинальной окружности до опор  $T_b$  является одним из наиболее рациональных мероприятий по повышению точности формы оболочек секции при рассматриваемой схеме выполнения сборки.

Расчеты показывают, что существуют такие сочетания допусков  $T_s$  и  $T_b$ , а также расстояния  $a$ , при которых максимальное значение отклонения профиля сектора  $\Delta_{max}$  имеет меньшую величину, чем допуск на радиус сектора  $T_s$ . Это означает, что предложенная схема выполнения сборки позволяет добиться более высокой точности формы оболочки сектора, чем та, которую имеет отдельный сектор.

На величину  $\Delta_{max}$  значимое влияние оказывает величина расстояния между опорами  $a$ , также  $a$  определяет соотношение интенсивности влияния  $T_s$  и  $T_b$  на  $\Delta_{max}$ . С увеличением расстояния между опорами  $a$  растет интенсивность влияния  $T_s$  на  $\Delta_{max}$ . Таким образом, изменяя расстояние  $a$ , можно менять значимость допусков  $T_s$  и  $T_b$ . На практике это означает, что если технологически сложнее обеспечить точность сектора (уменьшить допуск  $T_s$ ), чем точность расположения опор (уменьшить допуск  $T_b$ ), то следует уменьшать расстояние между опорами  $a$ . В целом же следует отметить, что для заданных значений  $T_s$  и  $T_b$  существует такое значение  $a$ , при котором можно получить наименьшее значение  $\Delta_{max}$ .

## Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Выражения (1)–(4) описывают отклонения профиля сектора от номинальной окружности при сборке по схеме, представленной на рис. 1. Выражение (6) устанавливает границы сектора, соответствующие  $1/4$  номинальной окружности.

2. Отклонение профиля сектора от номинальной окружности непостоянно по угловой координате, а для оценки соответствия отклонений требованиям точности необходимо определять экстремальные значения отклонения. Возникающие отклонения существенным образом зависят от расстояний, приведенных на схеме, изображенной на рис. 3.

3. При практических расчетах в процессе проектирования операции сборки необходимо учитывать значения допусков на расстояния от центра номинальной окружности до опор и на радиус сектора. Данная задача может быть решена с использованием выражений (10).

4. Предложенная схема реализации сборки дает возможность получить геометрическую точность оболочки без регулирования, пригонки и подбора. Это подтверждается расчетами, которые показывают, что существуют такие сочетания допусков на расстояния от центра номинальной окружности до опор и на радиус сектора и расстояния между опорами, при которых обеспечивается более высокая точность оболочки секции, чем та, которую имеет отдельный сектор.

## Список литературы

1. Аксенов В.В. Научные основы геовинчестерной технологии проведения горных выработок и создания винтоповоротных агрегатов: дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.22, 05.05.06. – Кемерово, 2004. – 304 с.
2. Аксенов В.В. Геовинчестерная технология проведения горных выработок. – Кемерово: ИУУ СО РАН, 2004. – 263 с.
3. Разработка и испытание щитового вращающегося проходческого агрегата ЭЛАНГ / В.Ф. Горбунов, А.Ф. Эллер, В.В. Аксенов, В.Д. Нагорный, Ю.П. Савельев // Шахтное строительство. – 1985. – № 6. – С. 8–11.
4. Горбунов В.Ф., Эллер А.Ф., Аксенов В.В. Разработка и шахтные испытания вращающегося проходческого агрегата ЭЛАНГ // Уголь. – 1989. – № 9. – С. 33–34.
5. Винтоповоротный агрегат для щитовой проходки наклонных выработок на шахтах ассоциации «Ленинскуголь» / А.Ф. Эллер, В.В. Аксенов,

В.Ф. Горбунов, А.А. Филатов // Уголь. – 1992. – № 9. – С. 10–12.

6. Коган Б.И. Технологическое обеспечение качества горных машин и инструментов. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 1996. – 259 с.

7. Коган Б.И., Дрыгин М.Ю. Ремонтно-технологический блок для обеспечения качества монтажа крупнотоннажных узлов горных машин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 4 (57). – С. 15–18.

8. Camelio J.A., Hu S.J., Ceglarek D. Impact of Fixture Design on Sheet Metal Assembly Variation // Journal of Manufacturing Systems. – 2004. – Vol. 23, iss. 3. – P. 182–193.

9. Разработка требований к основным системам геохода / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Бегляков, М.Ю. Блащук, В.Ю. Тимофеев, А.В. Сапожкова // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 3–7.

10. Компоновочные решения машин для проведения горных выработок на основе геовинчестерной технологии / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Бегляков, П.В. Бурков, М.Ю. Блащук, А.В. Сапожкова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 1. – С. 251–259.

11. ФЮРА. 612322.401.0.00.00.000ПЗ. Геоход. Технический проект. Пояснительная записка. – Юрга: ЮТИ ТПУ, 2014. – 238 с.

12. Lowth S., Axinte D.A. An assessment of “variation conscious” precision fixturing methodologies for the control of circularity within large multi-segment annular assemblies // Precision Engineering. – 2014. – Vol. 38, iss. 2. – P. 379–390.

13. Straight-build assembly optimization: A method to minimize stage-by-stage eccentricity error in the assembly of axisymmetric rigid components (two-dimensional case study) / T. Hussain, Z. Yang, A.A. Popov, S. McWilliam // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2011. – Vol. 133, iss. 3. – P. 031014/1-031014/9.

14. Liu T., Wang M.Y. An Approximate Quadratic Analysis of Fixture Locating Schemes // Proceedings of 7th International Conference on Automation Technology “Automation 2003”, Chia-Yi, Taiwan, September 2003. – P. 527–532.

15. Memon M., Hussain T., Ali Z. Minimizing Assembly Errors by Selecting Optimum Assembly Sequence in the Assembly of a Rigid Circular Structure // Mehran University Research Journal of Engineering & Technology. – 2012. – Vol. 31, iss. 4. – P. 743–754.

## OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(65), October – December 2014, Pages 19–28

### Ensuring the geometric accuracy of shell during assembly of Geohod sections

**Aksenov V.V.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: v.aksenov@icc.kemsc.ru

**Walter A.V.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: avwalter@tpu.ru

**Beglyakov V.Yu.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: begljakov@gmail.com

Yurga Institute of Technology, TPU Affiliate, 26 Leningradskaya st., Yurga, 652055, Russian Federation

#### Abstract

The article shows the way to ensure the geometric accuracy of large segmented-ring structures, for example sections of Geohod. The method of installation, consisting in location of the sector by the shell surface on a fixed support therewith the shells of individual sectors approximate shell section as a whole, is offered. Mathematical expressions of deviation profile of the sector with the real sector size and distances, which define a position of the supports, are received. The factors affecting geometric accuracy of the shell section and the impact of these factors on the accuracy are examined. Problem of determination of the maximum deviation of the profile of the sector, depending on the tolerance of the sector size and distance, establishing the position of the supports, is set. The dependences of the maximum values of the deviation of the sector profile on the of the tolerance levels are gotten. It is shown that the proposed scheme can be installed to provide higher accuracy of the shell section, than that which has a separate sector.

#### Keywords:

large segmented-ring assemblies, fixturing, assembly, circularity, variation conscious, geokhod, shell

## References

1. Aksenov V.V. *Nauchnye osnovy geovinchesternoï tekhnologii provedeniya gornykh vyrabotok i sozdaniya vintopovorotnykh agregatov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific bases geowinchester technology of mine working and creating of pivoted screw aggregates. Dr. eng. sci. diss.]. Kemerovo, 2004. 304 p.
2. Aksenov V.V. *Geovinchesternaya tekhnologiya provedeniya gornykh vyrabotok* [Geowinchester technology of mine working]. Kemerovo, ICC SB RAS Publ., 2004. 263 p.
3. Gorbunov V.F., Eller A.F., Aksenov V.V., Nagornyi V.D., Savel'ev Yu.P. Razrabotka i ispytanie shchitovogo vrashchayushchegosya prokhodcheskogo agregata ELANG [Development and testing of the shield tunneling machine rotating "Elango"]. *Shakhtnoe stroitel'stvo – Mine Construction*, 1985, no. 6, pp. 8–11.
4. Gorbunov V.F., Eller A.F., Aksenov V.V. Razrabotka i shakhtnye ispytaniya vrashchayushchegosya prokhodcheskogo agregata ELANG [Development and testing of a rotating shaft of the tunnel aggregate "Elango"]. *UGOL – Coal*, 1989, no. 9, pp. 33–34.
5. Eller A.F., Aksenov V.V., Gorbunov V.F., Filatov A.A. Vintopovorotnyi agregat dlya shchitovoi prokhodki naklonnykh vyrabotok na shakhtakh assotsiatsii "Leninskugol" [Screw-Pivoting aggregate for shield driving inclined workings in the mines of the association "Leninskugol"]. *UGOL – Coal*, 1992, no. 9, pp. 10–12.
6. Kogan B.I. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva gornykh mashin i instrumentov* [Technological quality assurance for mining machines and tools]. Kemerovo, Kuzbassvuzizdat Publ., 1996. 259 p.
7. Kogan B.I., Drygin M.Yu. Remontno-tekhnologicheskii blok dlya obespecheniya kachestva montazha krupnotonazhnykh uzlov gornykh mashin [The repair and technological unit for support of mounting of large-capacity assemblies of mountain machines]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2012, no. 4 (57), pp. 15–18.
8. Camelio J.A., Hu S.J., Ceglarek D. Impact of fixture design on sheet metal assembly variation. *Journal of Manufacturing Systems*, 2004, vol. 23, iss. 3, pp. 182–193. doi: 10.1016/S0278-6125(05)00006-3
9. Aksenov V.V., Efremenkov A.B., Beglyakov V.Yu., Blashchuk M.Yu., Timofeev V.Yu., Sapozhkova A.V. Razrabotka trebovaniï k osnovnym sistemam geokhoda [Requirements to Main Systems of Geohod]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika – Mining Equipment and Electromechanics*, 2009, no. 5, pp. 3–7.
10. Aksenov V.V., Efremenkov A.B., Beglyakov V.Yu., Burkov P.V., Blashchuk M.Yu., Sapozhkova A.V. Komponovochnye resheniya mashin dlya provedeniya gornykh vyrabotok na osnove geovinchesternoï tekhnologii [Layout solutions for mining machinery based on screw drilling technology]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' – Mining information-analytical bulletin*, 2009, no. 1, pp. 251–259.
11. Geohod. Technical project. Explanatory note no. FYuRA. 612322.401.0.00.00.000. Yurga, UTI TPU Publ., 2014. 238 p. (In Russian)
12. Lowth S., Axinte D.A. An assessment of "variation conscious" precision fixturing methodologies for the control of circularity within large multi-segment annular assemblies. *Precision Engineering*, 2014, vol. 38, iss. 2, pp. 379–390. doi: 10.1016/j.precisioneng.2013.12.004
13. Hussain T., Yang Z., Popov A.A., McWilliam S. Straight-Build Assembly Optimization: A Method to Minimize Stage-by-Stage Eccentricity Error in the Assembly of Axisymmetric Rigid Components (Two-Dimensional Case Study). *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011, vol. 133, iss. 3, pp. 031014/1–031014/9. doi:10.1115/1.4004202
14. Liu T., Wang M.Y. An Approximate Quadratic Analysis of Fixture Locating Schemes. Proceedings of 7th International Conference on Automation Technology "Automation 2003", Chia-Yi, Taiwan, September 2003, pp. 527–532.
15. Memon M., Hussain T., Memon Z.A. Minimizing Assembly Errors by Selecting Optimum Assembly Sequence in the Assembly of a Rigid Circular Structure. *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology*, 2012, vol. 31, iss. 4, pp. 743–754.

## Funding

The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Public contract no. 02.G25.31.0076).

Received 25 September 2014

Revised 23 October 2014

Accepted 03 November 2014

# ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ БУРОВОГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА

*А.Г. ОВЧАРЕНКО<sup>1</sup>, доктор техн. наук, профессор  
В. В. МАРУСИН<sup>2</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор  
В. Ю. УЛЬЯНИЦКИЙ<sup>3</sup>, доктор техн. наук, профессор  
А.Ю. КОЗЛЮК<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент  
М.О. КУРЕПИН<sup>1</sup>, инженер  
(<sup>1</sup>БТИ АлтГТУ, г. Бийск,  
<sup>2</sup>ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск,  
<sup>3</sup>ИГиЛ СО РАН, г. Новосибирск)*

Поступила 13 октября 2014  
Рецензирование 05 ноября 2014  
Принята к печати 10 ноября 2014

**Овчаренко А.Г.** – 659305, Бийск, ул. Трофимова, 27  
Бийский технологический институт,  
филиал Алтайского государственного технического университета,  
e-mail: pbuk@bti.secna.ru

Создание породоразрушающего инструмента с высокими эксплуатационными показателями является актуальной проблемой. Ее решение станет существенным резервом дальнейшего роста эффективности буровых работ.

Для повышения износостойкости бурового инструмента из твердого сплава типа ВК8 предложен метод комбинированной магнитно-импульсной обработки, включающий в себя предварительный нагрев и воздействие импульсного магнитного поля. Износостойкость образцов оценивалась на оборудовании для эрозионного тестирования согласно ASTM G76-07 «Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets».

Результаты экспериментальных исследований показали, что при температуре предварительного нагрева 1000 °С, магнитной индукции 1,8 Тл и времени воздействия импульса  $7 \cdot 10^{-4}$  с износ обработанных образцов в 2,5 раза меньше, чем необработанных контрольных образцов.

Предложенный метод обработки твердосплавных инструментов является перспективным для добывающей отрасли промышленности. В дальнейшем для исследований по применению комбинированной МИО требуется расширить номенклатуру бурового инструмента из твердого сплава.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка, твердость, бурение, твердосплавный инструмент, упрочнение поверхности, износостойкость.

## Введение

Важным материалом в производстве высококачественных шарошечных долот являются вольфрамкобальтовые твердые сплавы, применяемые для изготовления зубков и армирования зубьев фрезерованных шарошек, козырьков лап и других частей долота, подвергающихся в процессе работы абразивному износу.

В России твердосплавные зубки изготавливаются преимущественно из твердых сплавов марок ВК8, ВК10, ВК11, ВК13, ВК16 с различной формой вершин в зависимости от твердости обрабатываемой породы. Причем многие марки сплавов с одинаковым химическим, но различным гранулометрическим составом могут существенно отличаться по своим физико-механическим свойствам, что позволяет более точно

подбирать марку сплава при изготовлении зубков той или иной формы для эффективного разрушения конкретных горных пород.

Повышение износостойкости породоразрушающего инструмента является значительным резервом увеличения производительности труда при бурении скважин. Увеличение ресурса инструмента сокращает затраты времени на непроизводительные операции, повышает непрерывность рабочего процесса, снижает энергозатраты и материальные затраты на сооружение скважин.

Существующие способы упрочнения твердых сплавов из-за большой сложности и малой эффективности не нашли широкого применения при создании породоразрушающего инструмента. Практически отсутствуют способы повышения износостойкости серийно выпускаемого инструмента. Поэтому создание породоразрушающего инструмента с высокими эксплуатационными показателями является актуальной проблемой и ее решение станет существенным резервом дальнейшего роста эффективности буровых работ [1].

Одним из перспективных методов повышения долговечности твердосплавных металлорежущих инструментов является магнитно-импульсная обработка (МИО). В известной монографии Б.В. Малыгина [2] широко представлено магнитное упрочнение различных инструментов и деталей машин.

Метод магнитно-импульсной обработки металлов известен достаточно давно и основан на технологическом использовании энергии сильных импульсных магнитных полей. Первая в мире промышленная магнитно-импульсная установка типа «Magneform-1» была изготовлена в 1962 году известной американской фирмой General Dynamics Corporation [3]. В бывшем СССР работы по исследованию и разработке технологического оборудования для обработки металлов давлением МИО были начаты в 1962 году в Харьковском политехническом институте под научным руководством С.М. Фертика. Итогом работы этой группы ученых явился известный справочник по МИО металлов [4].

Результаты исследований [5, 6] показали, что магнитная импульсная обработка позволяет дополнительно повысить твердость и прочность

материалов, не упрочняемых термической обработкой. Так, после импульсной обработки стали 08 ее твердость по Бринеллю (НВ) повысилась с 1142 до 1550 МПа. У конструкционной стали 40Х твердость по Роквеллу (HRC) возросла с 32 до 36 единиц, а у инструментальной стали Х10СФЮТ – с 60 до 65 единиц.

При этом отмечается, что импульсное воздействие приводит к существенному измельчению зерна (в 2...3 раза), для новых зерен характерна зубчатость границ. Таким образом, после импульсного воздействия в сталях наблюдаются структурные признаки двух процессов: высокоскоростной сдвиговой микропластической деформации по механизму двойникования и динамической рекристаллизации.

Если для быстрорежущих сталей метод МИО для повышения износостойкости в настоящее время находит широкое применение, то для твердых сплавов в ряде работ использование МИО вызывает сомнения [7]. Однако в работе [8] приводятся экспериментальные данные по различным высокоэнергетическим воздействиям на зубки буровых коронок, изготовленных из твердого сплава ВК8: облучение гамма-квантами, быстрыми электронами и магнитно-импульсной обработкой. При этом отмечается, что МИО является наиболее технологичным методом из использованных, приводит к увеличению микротвердости и уменьшению размеров зерна карбида вольфрама в твердом сплаве.

Новым решением поверхностного упрочнения твердосплавного металлорежущего инструмента служит комбинированная магнитно-импульсная обработка, которая основана на воздействии импульсного магнитного поля высокой напряженности на предварительно нагретую обрабатываемую поверхность с целью улучшения ее механических и физических свойств [9–10]. Новизна и эффективность предлагаемого способа подтверждается патентом РФ на изобретение №2339704 [11].

С учетом сказанного целью данной работы является оценка возможности применения метода комбинированной магнитно-импульсной обработки для повышения износостойкости твердосплавных зубков, используемых в качестве породоразрушающего инструмента при бурении скважин.



## Материалы и методика исследования

В качестве объектов исследования на экспериментальной установке комбинированной МИО были выбраны зубки для шарошечных долот из твердого сплава ВК8 (рис. 1).



Рис. 1. Зубки для шарошечных долот

Твердый сплав ВК8 является композиционным материалом и состоит из связки (кобальт) и наполнителя (карбиды вольфрама). При этом кобальт является ферромагнетиком, что позволяет использовать магнитную обработку для упрочнения инструмента.

В качестве основного рабочего элемента экспериментальной установки для обработки зубков шарошечных долот использовался индуктор для магнитно-импульсной обработки, состоящий из концентратора магнитного поля и катушки индуктивности (рис. 2).

Применение такой конструкции индуктора позволило создавать необходимую напряженность магнитного поля при обработке инструментов различной формы [12].

МИО зубков для шарошечных долот из твердого сплава ВК8 проводилась в следующей последовательности.

1. Образец устанавливался в индуктор печи и производился предварительный нагрев токами высокой частоты (ТВЧ). Диапазон температур предварительного нагрева был выбран с учетом анализа предыдущих

экспериментов с металлорежущими инструментами из аналогичного материала и физических свойств кобальта, у которого точка Кюри равна  $1121\text{ }^{\circ}\text{C}$  [9–10, 13].

2. Затем производилась подача образца в индуктор для МИО и обработка импульсным магнитным полем при величине магнитной индукции, равной  $1,8\text{ Тл}$ , соответствующей магнитному насыщению кобальта [13]. Время воздействия импульса составляло  $7 \cdot 10^{-4}\text{ с}$ .

3. После МИО образцы выдерживались на неметаллической подложке для завершения в металле превращений 1-го и 2-го рода и уменьшения избыточной энергии. Время выдержки обработанных образцов составляло 24 ч.

После выдержки образцы исследовались на износостойкость с помощью оборудования для эрозионного тестирования согласно ASTM G76-07 «Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets». Испытания образцов проводились в пределах от 5 до 50 мин с шагом 5 мин. В качестве частиц эрозионного тестера использовались частицы электрокорунда нормальной марки 13А зернистостью 20П, при этом давление воздуха на входе в сопло было  $0,4\text{ МПа}$ , а расстояние от сопла до образца составляло 11 мм. Скорость частиц на выходе из сопла была равна  $65\text{ м/с}$  при внутреннем диаметре отверстия на выходе соплового устройства 6 мм. Износ образцов оценивался весовым методом в граммах.

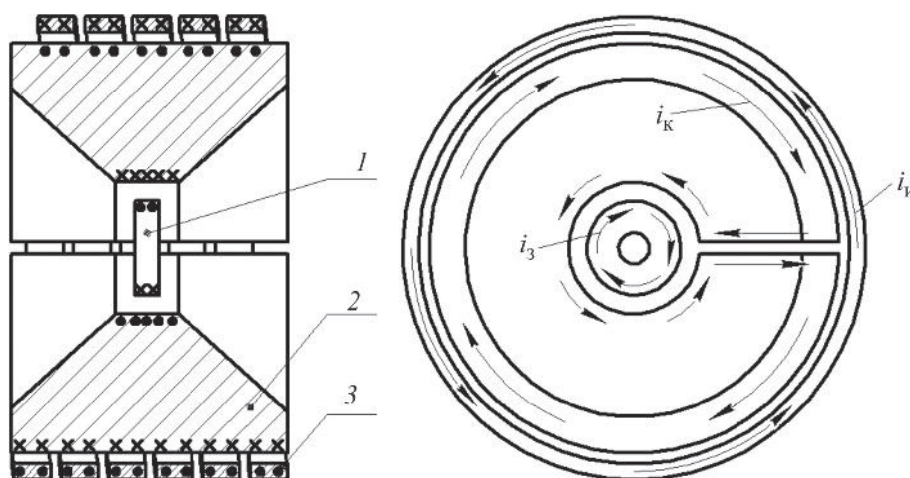


Рис. 2. Индуктор для магнитно-импульсной обработки:

1 – индуктор; 2 – концентратор магнитного поля; 3 – обрабатываемая заготовка;  $i_n$  – электрический ток в индукторе;  $i_k$  – электрический ток в концентраторе магнитного поля;  $i_z$  – электрический ток в заготовке

## Результаты и обсуждение

Результаты исследования сведены в таблицу и на их основе построены зависимости износа образцов  $m$  в миллиграммах от времени износа  $\tau$  в минутах (рис. 3). Каждому значению точки на кривых соответствует среднее арифметическое трех экспериментальных значений для каждой температуры предварительного нагрева образцов.

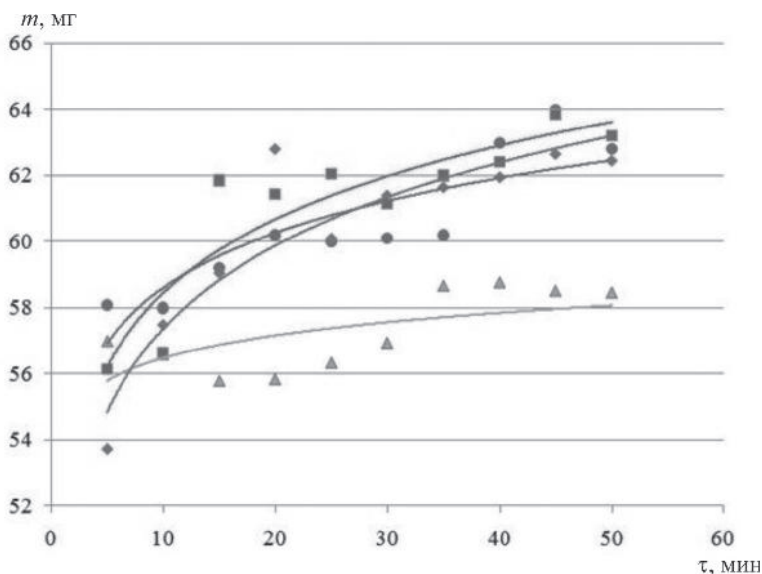


Рис. 3. Кривые износа образцов твердосплавных зубков марки ВК8:

Сплошные линии – кривые износа образцов, точки – эксперимент, образцы, обработанные при температуре предварительного нагрева соответственно:  $\blacklozenge$  – при температуре 800 °C;  $\blacksquare$  – при температуре 900 °C;  $\blacktriangle$  – при температуре 1000 °C;  $\bullet$  – контрольные образцы (без предварительного нагрева и МИО)

Анализ экспериментальных исследований показал, что износ образцов, обработанных при температуре предварительного нагрева, равной 1000 °C, на кривой износа в 2,5 раза меньше, чем износ контрольных образцов (без нагрева и МИО). Полученный эффект значительного увеличения износостойкости можно объяснить увеличением микротвердости поверхностного слоя образцов и уменьшением остаточных и усталостных напряжений в структуре материала. Износ образцов, обработанных при более низких температурах предварительного нагрева, равных 800 и 900 °C соответственно, а также износ контрольных необработанных образцов имеют близкие значения износа (см. таблицу).

Это говорит о том, что МИО образцов при этих температурах предварительного нагрева незначительно влияет на износостойкость материала твердосплавных зубков.

Из рис. 3 видно, что в результате проведения исследования получены экспериментальные точки, имеющие значительный разброс от аппроксимирующих кривых. Возможно, это связано с неотработанной технологией изготовления опытных образцов (зубков), различным гранулометрическим составом твердых сплавов и поставкой для исследования твердосплавных зубков из разных партий.

### Износ твердосплавных зубков марки ВК8 после комбинированной МИО

Время, мин	Износ образцов, граммы			
	Контрольные образцы	Температура предварительного нагрева		
		800 °C	900 °C	1000 °C
5	0,0581	0,0537	0,0561	0,0570
10	0,0580	0,0575	0,0566	0,0566
15	0,0592	0,0590	0,0618	0,0558
20	0,0602	0,0628	0,0614	0,0558
25	0,0600	0,0601	0,0620	0,0563
30	0,0601	0,0614	0,0611	0,0569
35	0,0602	0,0616	0,0620	0,0586
40	0,0630	0,0619	0,0624	0,0587
45	0,0640	0,0626	0,0638	0,0585
50	0,0628	0,0624	0,0632	0,0584

## Выводы

Проведенные исследования показали значительное увеличение износостойкости твердосплавных зубков марки ВК8 при температуре предварительного нагрева 1000 °С и индукции магнитного поля 1,8 Тл. Можно утверждать, что предложенный способ обработки твердосплавных зубков, используемых в качестве породоразрушающего инструмента при бурении скважин, является перспективным для добывающей и других отраслей промышленности. Необходимо расширить номенклатуру бурового инструмента из твердого сплава для исследований по применению и поиску оптимальных режимов комбинированной МИО.

## Список литературы

1. *Рябчиков С.Я.* Объемное упрочнение твердосплавного и алмазного породоразрушающего инструмента с целью повышения его эксплуатационных показателей: дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 2002. – 309 с.
2. *Малыгин Б.В.* Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 112 с. – ISBN 5-217-00448-7.
3. *Furth H.P., Waniek R.W.* New ideas on magnetic forming // *American Machinist / Metalworking Manufacturing*. – 1962. – Vol. 106. – P. 92–95.
4. *Белый И.В., Фертик С.М., Хищенко Л.Т.* Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков: Вища школа, 1977. – 168 с.
5. *Дураченко А.М., Малиночка Е.Я.* Влияние импульсной обработки на релаксационные спектры аморфных сплавов на основе железа и никеля // *Известия Академии наук СССР. Металлы*. – 1985. – № 6. – С. 167–170.
6. *Воробьева Г.А., Иводитов А.Н., Сизов А.М.* О структурных превращениях в металлах и сплавах под воздействием импульсной обработки // *Известия Академии наук СССР. Металлы*. – 1991. – № 6. – С. 131–137.
7. *Орлов А.С.* Повышение работоспособности режущих инструментов путем упрочнения импульсной магнитной обработкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2012. – 20 с.
8. *Сухорукова С.Е.* Выбор и обоснование метода повышения стойкости буровых коронок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2013. – 20 с.
9. *Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю., Курепин М.О.* Повышение износостойкости пластин из твердого сплава // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2010. – № 2. – С. 13–15.
10. Исследование влияния комбинированной магнитно-импульсной обработки на качество твердосплавного инструмента / А.Г. Овчаренко, А.Ю. Козлюк, М.О. Курепин, А.Г. Тюрин, Д.С. Терентьев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2011. – № 3. – С. 95–98.
11. Способ комбинированной магнитно-импульсной обработки поверхностей инструментов и деталей машин: патент 2339704 Российская Федерация: МПК<sup>8</sup> С 21 D 1/04, С 21 D 9/22 / А.Г. Овчаренко, А.Ю. Козлюк; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ). – № 2007105490/02; заявл. 13.02.2007; опубл. 27.11.2008, Бюл. № 33. – 7 с.
12. *Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю., Курепин М.О.* Индукторы для комбинированной магнитно-импульсной обработки инструментов различной формы // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2008. – № 3. – С. 11–12.
13. *Мишин Д.Д.* Магнитные материалы: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.

## OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(65), October – December 2014, Pages 29–35

### Improving the wear resistance of the drilling carbide tools

**Ovcharenko A.G.**<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: pbuk@bti.secna.ru  
**Marusin V.V.**<sup>2</sup>, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: marusin@itam.nsc.ru  
**Ulyanizkiy V.Yu.**<sup>3</sup>, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: ulianv@mail.ru  
**Kozlyuk A.Yu.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: andrey-pbuk@mail.ru  
**Kurepin M.O.**<sup>1</sup>, Engineer, e-mail: btimish@mail.ru

<sup>1</sup> Biysk Technological Institute, Branch of I.I. Polzunov Altai State Technical University, 27 Trafimova st., Biysk, Altai region, 659305, Russian Federation

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

<sup>3</sup> Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the RAS, 15 Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

### Abstract

Creating a rock cutting tool with high performance is a burning problem and its solution will be a significant reserve of the further rise in the efficiency of drilling.

The method of combined magnetic-pulse treatment including preheating and effects of pulsed magnetic field to improve the wear resistance of drilling tools carbide type VK8 is proposed. Wear resistance of the samples are evaluated on the equipment for erosion testing according to ASTM G76-07 «Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets».

The results of experimental investigations show that the preheating temperature of 1000 °C, the magnetic induction of 1.8 T and a pulse influence time  $7 \cdot 10^{-4}$  s of the wear treated samples are 2.5 times less than the untreated control samples.

The proposed method of processing carbide tools is promising for mining industry. In future research on the application of the combined magnetic-pulse treatment of drilling carbide tools will be expanded.

### Keywords:

magnetic-pulse treatment, hardness, drilling, carbide tools, surface hardening, wear resistance.

### References

1. Ryabchikov S.Ya. *Ob''emnoe uprochnenie tverdospлавного i almaznogo porodorazrushayushchego instrumenta s tsel'yu povysheniya ego ekspluatatsionnykh pokazat.* Diss. dokt. tekhn. nauk [Volumetric hardening of hard-alloy and diamond rock cutting tool for improve its operational performance. Dr. eng. sci. diss.]. Tomsk, 2002. 309 p.
2. Malygin B.V. *Magnitnoe uprochnenie instrumenta i detalei mashin* [Magnetic hardening of tools and machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 112 p. ISBN 5-217-00448-7
3. Furth H.P., Waniek R.W. New ideas on magnetic forming. *American Machinist / Metalworking Manufacturing*, 1962, vol. 106, pp. 92–95.
4. Belyi I.V., Fertik S.M., Khimenko L.T. *Spravochnik po magnitno-impul'snoi obrabotke metallov* [Magnetic-pulse treatment of metals: Handbook]. Kharkov, Vishcha shkola Publ., 1977. 168 p.
5. Durachenko A.M., Malinochka E.Ya. Vliyanie impul'snoi obrabotki na relaksatsionnye spektry amorfnykh splavov na osnove zheleza i nikelya [Effect of pulse treatment on the relaxation spectra of amorphous alloys based on iron and nickel]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya Metally – Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Series: Metals*, 1985, no. 6, pp. 167–170.
6. Vorob'eva G.A., Ivoditov A.N., Sizov A.M. O strukturnykh prevrashcheniyakh v metallakh i splavakh pod vozdeistviem impul'snoi obrabotki [Structural transformations in metals and alloys under the influence of pulse processing]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya Metally – Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Series: Metals*, 1991, no. 6, pp. 131–137.
7. Orlov A.S. *Povyshenie rabotosposobnosti rezhushchikh instrumentov putem uprochneniya impul'snoi magnitnoi obrabotkoi.* Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Increasing the efficiency of cutting tools by pulsed magnetic hardening treatment. Author's abstract of Ph.D. eng. sci. diss.]. Ivanovo, 2012. 20 p.
8. Sukhorukova S.E. *Vybor i obosnovanie metoda povysheniya stoikosti burovnykh koronok.* Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Selection and justification of the method of increasing the resistance of crown bits. Author's abstract of Ph.D. eng. sci. diss.]. Moscow, 2013. 20 p.
9. Ovcharenko A.G., Kozlyuk A.Yu., Kurepin M.O. Povyshenie iznosostoikosti plastin iz tverdogo splava [The increase of wear resistance for the hard-facing alloys plates]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2010, no. 2 (47), pp. 13–15.
10. Ovcharenko, A.G., Kozlyuk A.Yu., Kurepin M.O., Tyurin A.G., Terentiev D.S. Issledovanie vliyaniya kombinirovannoi magnitno-impul'snoi obrabotki na kachestvo tverdospлавного instrumenta [The investigation of effect combined magnetic pulse treatment on quality hardmetal tools]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 3 (52), pp. 95–98.

11. Ovcharenko A.G., Kozlyuk A.Yu. *Sposob kombinirovannoi magnitno-impul'snoi obrabotki poverkhnosti instrumentov i detalei mashin* [The method of combined magnetic-pulse treatment of surfaces of tools and machine parts]. Patent RF, no. 2339704, 2008.

12. Ovcharenko A.G., Kozlyuk A.Yu., Kurepin M.O. Induktory dlya kombinirovannoi magnitno-impul'snoi obrabotki instrumentov razlichnoi formy [Induction coils for combined magnetic impulse work of tools of various shapes], *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2008, no. 3, pp. 11–12.

13. Mishin D.D. *Magnitnye materialy* [Magnetic materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1981. 335 p.

Received 13 October 2014

Revised 05 November 2014

Accepted 10 November 2014

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК10КС ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ В ВОДОПОЛИМЕРНОЙ СРЕДЕ ТЕРМОВИТ М\*

*Т.Н. ОСКОЛКОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент  
А.А. БАТАЕВ<sup>2</sup>, доктор техн. наук, профессор  
В.А. БАТАЕВ<sup>2</sup>, доктор техн. наук, профессор  
А.Г. ТЮРИН<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент  
Н.А. КОЗЫРЕВ<sup>1</sup>, доктор техн. наук, профессор  
А.А. ФЁДОРОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент*  
<sup>1</sup>(СибГИУ, г. Новокузнецк,  
<sup>2</sup>НГТУ, г. Новосибирск)

Поступила: 02 сентября 2014

Рецензирование: 23 октября 2014

Принята к печати: 05 ноября 2014

**Осколкова Т.Н.** – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,  
Сибирский государственный индустриальный университет,  
e-mail: oskolkova@kuz.ru

Рассмотрены результаты исследований карбидовольфрамового твердого сплава марки ВК10КС после закалки от температуры 1150 °С в водополимерную среду Термовит М с концентрацией 4 % при температуре 40 °С. Установлены изменения в структуре сплава, заключающиеся в частичном растворении карбида вольфрама WC при нагреве под закалку и, следовательно, уменьшении его среднего размера с 6,5 мкм в исходном состоянии до 3 мкм после термообработки. Растворение карбида вольфрама приводит к дополнительному легированию кобальтовой связующей углеродом и вольфрамом. В исходных образцах в кобальтовой фазе растворено 10,89 вес. % вольфрама, а после закалки его содержание увеличивается до 20,18 вес. %. Вышеописанные изменения в структуре твердого сплава после закалки приводят к увеличению предела прочности при изгибе на 10 %, уменьшению площади лунки изнашивания при трибологических испытаниях на 35 % по сравнению с исходным спеченным состоянием.

**Ключевые слова:** твердый сплав, закалка, водополимерные среды, индустриальное масло, микроструктура, износостойкость, кобальтовая связующая, твердость, предел прочности.

## Введение

Одним из методов упрочнения твердых сплавов является закалка, позволяющая фиксировать структурные изменения, которые происходят во время нагрева и охлаждения. Согласно работам [1–3] долговечность твердых сплавов, закаленных в масле, повышается в 2...6 раз по сравнению с долговечностью сплавов в исходном состоянии после спекания. Таким образом, использование твердого сплава в термически

обработанном состоянии в различных условиях эксплуатации способствует сокращению его расхода на единицу продукции и улучшению ряда других технико-экономических показателей производства. Однако известно [4], что в процессе работы масло окисляется при постепенном накоплении в нем продуктов термического разложения, грязи, окалины и других примесей, его вязкость повышается, а закаливающая способность снижается. В связи с этим в последнее время большое внимание уделяют разработке и

\* Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки России № 11.1531.2014/к

применению охлаждающих сред на основе водорастворимых полимеров при закалке различных сталей [5–11]. Все полимерные охлаждающие среды предназначены для замены масел с целью устранения их недостатков (возгораемость, задымленность, загрязнение окружающей среды).

В работах [10–11] установлено, что изменение концентрации полимера Термовит М в растворе позволяет существенно изменить характеристики закалочной среды, в том числе и среднюю скорость охлаждения. Средние скорости охлаждения в 4,0...4,5 %-м водном растворе Термовит М при температурах от 20 до 60 °С близки к средней скорости охлаждения в масле.

Цель исследований заключалась в изучении структуры и свойств твердого сплава ВК10КС после закалки в водополимерной среде Термовит М.

### Методика экспериментального исследования

В настоящей работе для термической обработки твердого сплава марки ВК10КС производства ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» использовался 4 %-й водный раствор полимера Термовит М [12]. Закалочная жидкость представляет собой водный раствор полимера производства ЗАО НПО «Промэкология», г. Омск (концентрат водополимерной закалочной среды изготавливают в соответствии с техническими условиями ТУ 2219-045-23763315-2007).

Исследование структуры твердого сплава и химического состава кобальтовой связующей до и после закалки осуществлялось с помощью растрового электронного микроскопа «Philips XL-30». Изучение поверхности изломов образцов из сплава ВК10КС проводилось после испытаний на статический изгиб с использованием растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 XVP.

Рентгеноструктурные исследования проводились с помощью дифрактометра ДРОН-2,0 в  $K_{\alpha}$ -излучении железа. Определение параметра кристаллической решетки кобальтовой связующей проводилось с точностью  $\pm 0,001 \text{ \AA}$ .

Испытания для определения предела прочности при поперечном изгибе проводились в соответствии с ГОСТ 20019–74 на электромеханической универсальной системе Instron 3369, а

испытания по измерению твердости – на твердомере Wolpert Group марки Model 600 MRD.

Трибологические испытания образцов в спеченном состоянии до и после термообработки проводились с помощью трибометра «PC-Operated High Temperature Tribometer». Износ образцов определялся путем измерения глубины и площади лунки износа в поперечном сечении после испытаний. Лунка изнашивания образовывалась в результате действия неподвижного алмазного индентора на плоскую поверхность вращающегося цилиндрического образца при нагрузке 3 Н, числе оборотов 4000, линейной скорости движения 2,5 см/с.

### Результаты и обсуждение

Микроструктура твердого сплава ВК10КС после спекания состоит из зерен карбида вольфрама (WC), размер которых находится в диапазоне 5...8 мкм, и кобальтовой фазы. Зерна карбида вольфрама выглядят как многогранники с четкими границами. После спекания частицы карбида вольфрама в большинстве случаев расположены под острыми углами от 10 до 80 градусов по отношению друг к другу. Углы карбидных зерен между собой могут служить концентраторами напряжений и при дальнейшей эксплуатации способствовать образованию микротрещин.

Эксплуатационные характеристики твердых сплавов во многом зависят от состояния кобальтовой связующей и карбидной фазы. Изменение химического состава и свойств кобальтовой фазы достигается путем различных видов термической обработки. Одним из таких методов является закалка, позволяющая фиксировать структурные изменения, происходящие во время нагрева и охлаждения.

Применение к твердым сплавам закалки основывается на известном факте: в твердых растворах, образованных на основе металла (к таковым относится кобальтовая связующая), с увеличением содержания легирующего элемента (такого, как вольфрам) повышается сопротивление пластической деформации [13]. Легирующие элементы, имеющие ограниченную растворимость в матричной фазе, в большей степени искажают решетку последней и приводят к возрастанию прочностных характеристик, что, в свою очередь, должно положительно сказаться на уровне прочности всего сплава [2].

В работе [2] показано, что при нагреве твердого сплава выше температуры 1000 °С происходит интенсивное растворение вольфрама и углерода в кобальте, что приводит к увеличению прочностных и эксплуатационных характеристик при последующей закалке. По результатам исследований сотрудников Института сверхтвердых материалов НАН Украины [1–3] установлено, что наилучшим комплексом механических свойств обладают сплавы ВК10, закаленные в индустриальном масле от температур 1100...1150 °С.

С учетом описанного выше твердый сплав ВК10КС подвергался закалке от температур 1150 °С в 4 %-м водополимерном растворе Термовит М, имевшем температуру 40 °С.

Микроструктура твердого сплава ВК10КС после закалки представлена на рис. 1. Следует отметить в целом уменьшение среднего размера частиц карбида вольфрама после закалки твердого сплава до 2...4 мкм вместо 5...8 мкм в исходном состоянии. Такая картина может являться следствием частичного растворения зерен карбида вольфрама в кобальте при нагреве до температуры закалки.

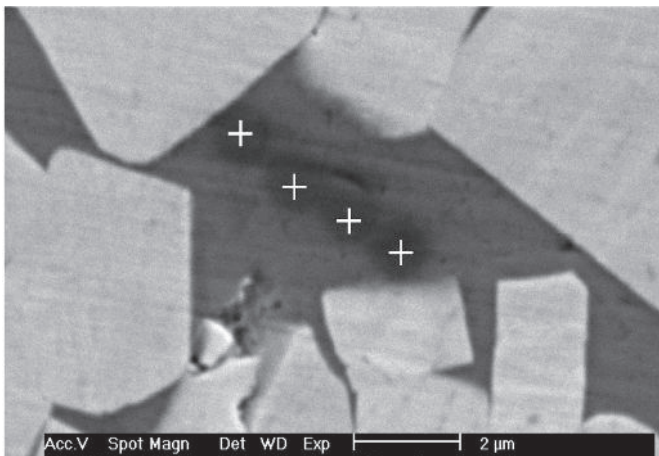
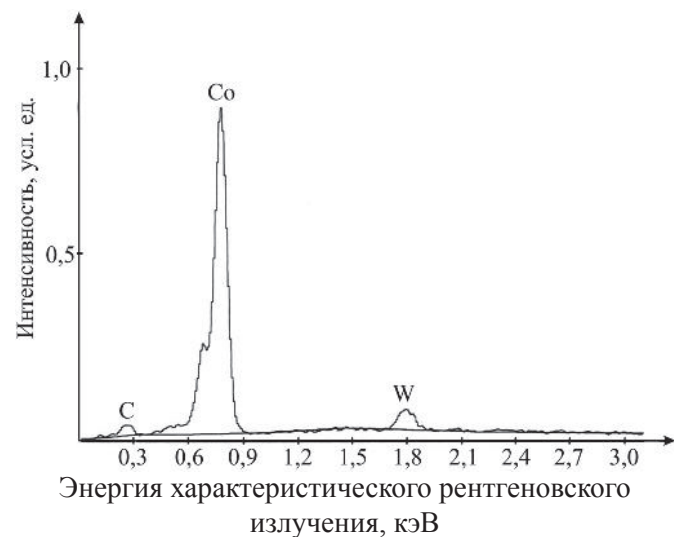


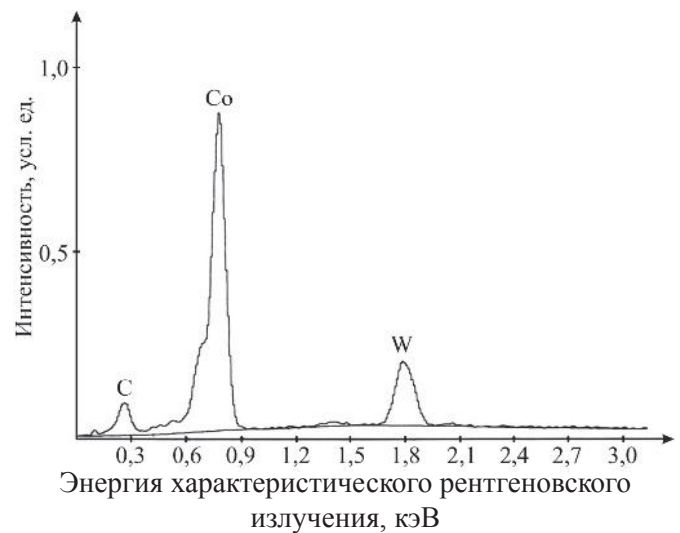
Рис. 1. Микроструктура твердого сплава ВК10КС после закалки в полимере Термовит М

Дополнительное растворение углерода и вольфрама в кобальтовой связующей подтверждают данные энергодисперсионного анализа (рис. 2). Места съемки спектров в кобальтовой связующей обозначены на рис. 1.

Установлено, что в исходных образцах в спеченном состоянии без термической обработки в кобальтовой связке растворено в среднем 10,89 вес. % вольфрама, а после закалки содер-



*a*



*б*

Рис. 2. Элементный состав кобальтовой связующей сплава ВК10КС:

*a* – исходный образец; *б* – после закалки в полимере Термовит М

жание вольфрама увеличивается до 20,18 вес. %. Легирование кобальтовой фазы при закалке отражается в увеличении параметра кристаллической решетки до значения  $a = 3,574 \text{ \AA}$  по сравнению с  $a = 3,552 \text{ \AA}$  в исходном состоянии.

Закалка твердого сплава ВК10КС в водополимерных средах способствует сохранению более высокой концентрации вольфрама и углерода в связующей фазе. По мнению авторов работ [1–3, 14, 15], изменяется и напряженное состояние обеих фаз (кобальтовой связующей и карбидной фазы WC). При медленном охлаждении после нагрева возрастают термические напряжения в кобальтовой фазе, а в случае быстрого охлаждения, как при закалке твердого сплава в полиме-



рах, наоборот, уменьшается за счет образования более легированного вольфрамом твердого раствора и уменьшения в связи с этим разницы в коэффициентах термического расширения WC- и Co-фазы.

Как показали фрактографические исследования, закалка твердого сплава BK10KC в водополимерный раствор уменьшает средний размер упрочняющей фазы до 3 мкм по сравнению с 6,5 мкм в исходном состоянии (рис. 3).

Образцы до и после термической обработки были подвергнуты механическим испытаниям, результаты которых представлены в таблице и на рис. 4. Установлено, что предел прочности при изгибе после закалки в водополимерном растворе увеличился на 10 % по сравнению со спеченным состоянием.

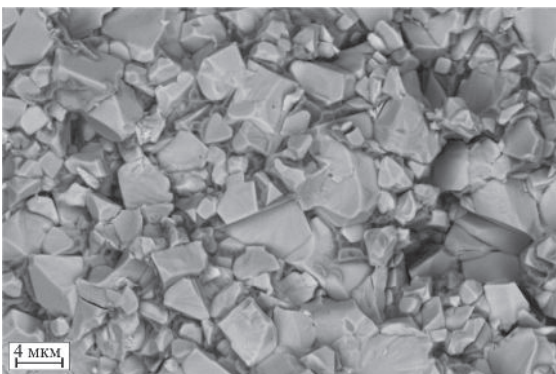
Результаты трибологических испытаний образцов в исходном состоянии и после термообработки показали (см. рис. 4 и таблицу), что глубина лунки изнашивания исходного образца BK10KC составляет 58 мкм, а после закалки в 4 %-м растворе Термовит М – 47,4 мкм, что на 18 % меньше исходного состояния.

Площадь поперечного сечения лунки изнашивания у исходного образца и составляет 12 921 мкм<sup>2</sup>, а после закалки в 4 %-м растворе

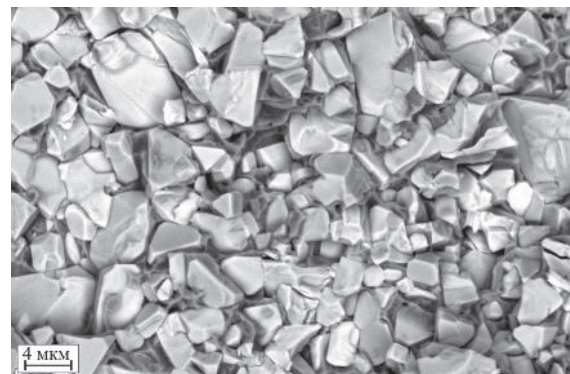
Термовит М – 8494 мкм<sup>2</sup>, т. е. на 35 % меньше площади изнашивания образца в спеченном состоянии. Очевидно, что повышение износостойкости закаленного твердого сплава (см. таблицу) связано с уменьшением величины зерен карбида вольфрама и дополнительным легированием кобальтовой связующей вольфрамом и углеродом.

Таким образом, закалка твердого сплава BK10KC в 4 %-м водополимерном растворе Термовит М положительно скажется на эксплуатационной стойкости инструмента, оснащенного этим материалом. Небольшая стоимость и доступность концентрата полимера Термовит М (14 000 руб/т по сравнению со стоимостью 1 т индустриального масла 25 900...35 000 руб.) позволяет успешно использовать вместо индустриального масла И-20А 4 %-м водорастворимый полимер Термовит М для закалки твердого сплава BK10KC.

Испытанием на шахте «Тагарышская» (Кемеровская область) комбайновых резцов, оснащенных закаленным сплавом BK10KC, выявлено уменьшение выхода из строя рабочей части инструмента по причине разрушения твердого сплава, что значительно сокращает время на замену резцов режущего органа. Зафиксировано увеличение средней скорости проходки



а



б

Рис. 3. Поверхность изломов твердого сплава BK10KC:  
а – исходный образец; б – после закалки в полимере Термовит М

#### Свойства сплава BK10KC

Режим обработки	Твердость, HRA	$\sigma_{изг}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Глубина лунки изнашивания, мкм	Площадь лунки изнашивания, мкм <sup>2</sup>
Спеченное состояние	87,0	2730	58,0	12 921
Закалка в 4 %-м водополимерном растворе Термовит М	87,3	2980	47,4	8494

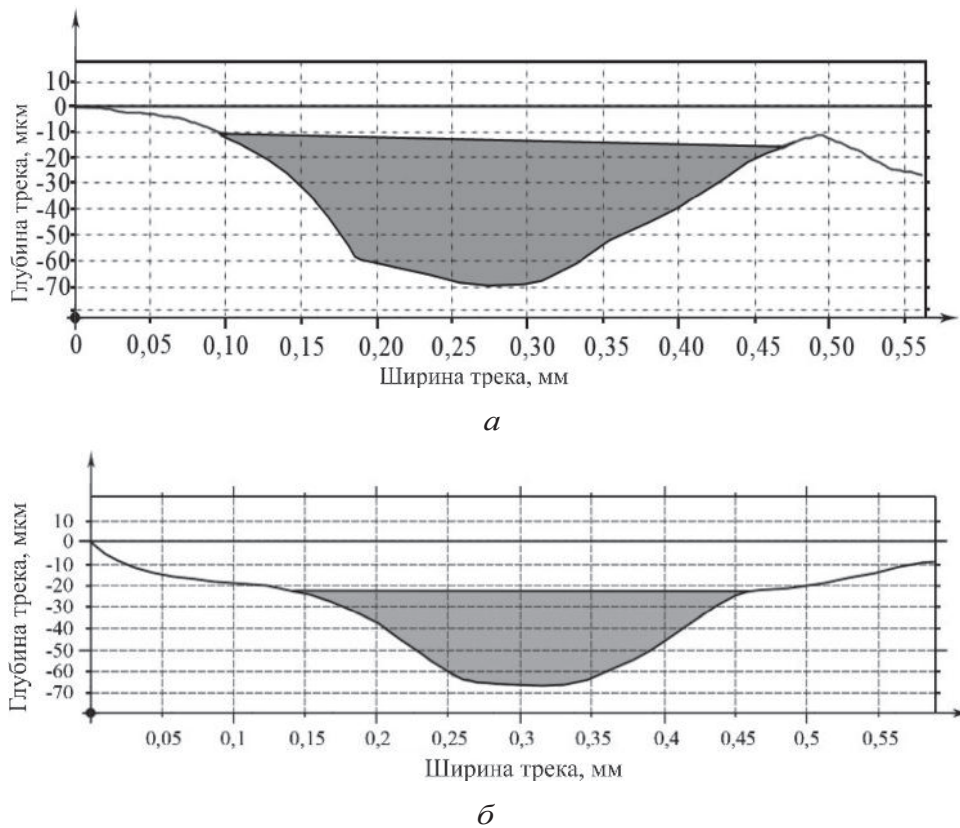


Рис. 4. Профили и площади сечений лунки изнашивания сплава BK10KC (цветом показана площадь лунки изнашивания в поперечном сечении):  
*a* – спеченное состояние; *б* – после закалки в 4,0 %-м водополимерном растворе Термовит М

на 8...10 % и уменьшение запыленности забоя вследствие повышения эффективности работы твердосплавного инструмента. Это приводит к увеличению срока эксплуатации резцов с термоупрочненным твердым сплавом на 30 %, при этом достигается также повышение производительности труда на один погонный метр проходки и экономия дефицитных материалов.

### Выводы

1. При нагреве твердого сплава BK10KC под закалку до 1150 °С происходит частичное растворение карбида вольфрама WC. При ускоренном охлаждении в 4 %-м водополимерном растворе Термовит М фиксируется высокотемпературное состояние со средним размером частиц карбида вольфрама 3 мкм, тогда как в исходном состоянии размер составлял 6,5 мкм.

2. При закалке происходит дополнительное растворение вольфрама и углерода в кобальтовой связующей, что приводит к увеличению параметра ее кристаллической решетки до

$a = 3,574 \text{ \AA}$  по сравнению с  $a = 3,552 \text{ \AA}$  в исходном состоянии.

3. Закалка вольфрамокобальтового твердого сплава BK10KC приводит к увеличению предела прочности при изгибе на 10 %, уменьшению площади лунки изнашивания в поперечном сечении при трибологических испытаниях на 35 % по сравнению со спеченным состоянием.

### Список литературы

1. Лошак М.Г., Александрова Л.И. Технологические аспекты термообработки твёрдых сплавов в спечённом состоянии // Порошковая металлургия. – 2006. – № 9/10. – С. 115–128.
2. Лошак М.Г. Прочность и долговечность твёрдых сплавов. – Киев: Наукова Думка, 1984. – 328 с.
3. Лошак М.Г., Александрова Л.И. Упрочнение твёрдых сплавов. – Киев: Наукова Думка, 1977. – 147 с.
4. Люты В. Закалочные среды: справочник. – Челябинск: Металлургия, 1990. – 192 с.
5. Темлянец М.В., Осколкова Т.Н. Трещинообразование в процессах нагрева и охлаждения сталей и сплавов. – М.: Флинта: Наука, 2005. – 196 с.

6. *Ежов В.М.* Выбор экологически чистых полимерных водорастворимых закалочных сред взамен минеральных масел // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1991. – № 4. – С. 8–10.

7. *Горюшин В.В.* О применении синтетических закалочных сред в промышленности: (в помощь ИТР промышленных предприятий) // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1991. – № 4. – С. 10–14.

8. Технологические возможности закалки в экологически чистых водополимерных средах / В.Г. Кауфман, М.Б. Гутман, Р.Г. Гальцева, О.И. Макарычев // *Электротехника.* – 1990. – № 10. – С. 44–47.

9. *Тарасова Г.Н., Осколкова Т.Н.* Разработка технологии термической обработки зубьев дисковых пил в водополимерном растворе полимера ПК-2 // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2007. – № 4. – С. 51–53.

10. *Шорохова О.В., Осколкова Т.Н.* Особенности охлаждающей способности водного раствора полимера «Термовит-М» // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2011. – № 8. – С. 56–58.

11. *Шорохова О.В., Осколкова Т.Н.* Новая водополимерная закалочная среда «Термовит-М» // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2011. – № 4. – С. 28–30.

12. Патент 2392342 Российская Федерация, МПК<sup>8</sup> В 22 F 3/24/, С 22 С 29/00. Способ закалки твёрдого сплава на основе карбида вольфрама / Т.Н. Осколкова; ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет». – № 2009116915/02; заявл. 04.05.2009; опубл. 20.06.2010, Бюл. № 17. – 5 с.

13. *Новиков И.И.* Теория термической обработки металлов. – 4-е изд. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.

14. *Idesman A.V., Levitas V.I.* Finite element procedure for solving contact thermoelastoplastic problems at large strains, normal and high pressures // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.* – 1995. – Vol. 126, iss. 1–2. – P. 39–66. – doi: 10.1016/0045-7825(95)00757-R.

15. *Лошак М.Г., Полотняк С.Б., Александрова Л.И.* Численное моделирование напряжённо-деформированного состояния вольфрамовых твердых сплавов после спекания // *Сверхтвёрдые материалы.* – 2005. – № 4. – С. 30–40.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(65), October – December 2014, Pages 36–42

### Research of the structure and properties of the hard alloy VK10KS after hardening in waterpolymeric liquid Termovit M

**Oskolkova T.N.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: oskolkova@kuz.ru

**Bataev A.A.**<sup>2</sup>, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: bataev@adm.nstu.ru

**Bataev V.A.**<sup>2</sup>, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: vabataev@yandex.ru

**Tjurin A.G.**<sup>2</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: tyurin78@mail.ru

**Kozyrev N.A.**<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kozyrev\_na@mtsp.sibsiu.ru

**Fedorov A.A.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: fedorov\_130585@mail.ru

<sup>1</sup> Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

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

#### Abstract

The results of research of WC-Co hard alloy VK10KS after hardening from 1150 °C in waterpolymeric liquid Termovit M with concentration of 4 % under the temperature of 40 °C are considered. The changes in the structure of the alloy which are connected with the partial solution of WC during heating before hardening and, therefore, reducing its sizes from 5...8 in the initial state up to 2...4 after heat treatment are discovered. The solution of WC leads to the additional alloying of Co phase by C and W. In the initial samples in sintered state the average amount of dissolved tungsten is 10.89 %, but after hardening its concentration is increased up to 20.18 %. All above mentioned changes in the structure of the hard alloy after hardening lead to the increase of its modulus of rupture in bending up to 10 %, and decrease the area of friction up to 35 % in comparison with the sintered state when tribologic testing was conducted.

#### Keywords:

Hard alloy, hardening, waterpolymeric liquids, industrial oil, microstructure, antifricition, Co phase, hardness, modulus of rupture in bending.

## References

1. Loshak M.G., Aleksandrova L.I. Tekhnologicheskie aspekty termoobrabotki tverdykh splavov v spechenom sostoyanii [Technological aspects of heat treatment of hard alloys in the sintered state]. *Poroshkovaya metallurgiya – Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2006, no. 9-10 (451), pp. 115–127. (In Russian)
2. Loshak M.G. *Prochnost' i dolgovechnost' tverdykh splavov* [Strength and durability of hard alloys]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1984. 328 p.
3. Loshak M.G., Aleksandrova L.I. *Uprochnenie tverdykh splavov* [Hardening hard alloys]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1977. 147 p.
4. Luty W. *Chłodziwa hartownicze* [Quenching Fluids]. Warsaw, Naukowo-Techniczne Publ., 1986. 210 p. (Russ. ed.: Lyuty V. *Zakalochnye sredy: Spravochnik* [Quenching Fluids: A Handbook]. Chelyabinsk, Metallurgiya Publ., 1990. 192 p.).
5. Temlyantsev M.V., Oskolkova T.N. *Treshchinoobrazovanie v protsessakh nagreva i okhlazhdeniya staley i splavov* [Cracking in the processes of heating and cooling of steels and alloys]. Moscow, Flinta Publ., Nauka Publ., 2005. 196 p.
6. Ezhov V.M. Vybor ekologicheskii chistykh polimernykh vodorastvorimykh zakalochnykh sred vzamen mineral'nykh masel [Selection of ecologically clean water-soluble polymer quenchants in place of mineral oils]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 1991, no. 4, pp. 8–10. (In Russian)
7. Goryushin V.V. O primenenii sinteticheskikh zakalochnykh sred v promyshlennosti (V pomoshch' ITR promyshlennykh predpriyatii) [The use of synthetic quenchants in industry (as an aid to engineering and technical personnel in industrial plants)]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 1991, no. 4, pp. 10–14. (In Russian)
8. Kaufman V.G., Gutman M.B., Gal'tseva R.G., Makarychev O.I. Tekhnologicheskie vozmozhnosti zakalki v ekologicheskii chistykh vodopolimernykh sredakh [Technological capabilities quenching in ecologically clean water-polymeric media]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 1990, no. 10, pp. 44–47.
9. Tarasova G.N., Oskolkova T.N. Razrabotka tekhnologii termicheskoi obrabotki zub'ev diskovykh pil v vodopolimernom rastvore polimera PK-2 [Heat treatment of Disk-Saw teeth in an aqueous solution of PK-2 polymer]. *Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya – Steel in Translation*, 2007, no. 4, pp. 51–53. (In Russian)
10. Shorokhova O.V. Oskolkova T.N. Osobennosti okhlazhdayushchei sposobnosti vodnogo rastvora polimera «Termovit-M» [Features of the cooling ability of an aqueous solution of polymer “Thermovit-M”]. *Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya – Steel in Translation*, 2011, no. 8, pp. 56–58. (In Russian)
11. Shorokhova O.V. Oskolkova T.N. Novaya vodopolimernaya zakalochnaya sreda «Termovit-M» [Thermovit-M water-polymer quenching fluid]. *Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya – Steel in Translation*, 2011, no. 4, pp. 28–30. (In Russian)
12. Oskolkova T.N. *Sposob zakalki tverdogo splava na osnove karbida vol'frama* [A method of quenching hard alloy based on tungsten carbide]. Patent RF, no. 2392342, 2010.
13. Novikov I.I. *Teoriya termicheskoi obrabotki metallov* [The Theory of Heat Treatment of Metals]. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 480 p.
14. Idesman A.V., Levitas V.I. Finite element procedure for solving contact thermoelastoplastic problems at large strains, normal and high pressures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1995, vol. 126, iss. 1-2, pp. 39–66. doi: 10.1016/0045-7825(95)00757-R
15. Loshak M.G., Polotnyak S.B., Aleksandrova L.I. Chislennoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya vol'framovykh tverdykh splavov posle spekaniya [Numerical modeling of stressed-strained state of as-sintered tungsten hard alloys]. *Sverkhtverdye materialy – Journal of Superhard Materials*, 2005, no. 4, pp. 30–40. (In Russian)

## Funding

The work was done under the project part of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Public contract no. 11.1531.2014/k)

Received 02 September 2014

Revised 23 October 2014

Accepted 05 November 2014

# КОНТАКТНАЯ ВЫНОСЛИВОСТЬ NiCrBSi ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ГАЗОПОРОШКОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ\*

*Р.А. САВРАЙ, канд. техн. наук*  
*А.В. МАКАРОВ, доктор техн. наук, с.н.с.*  
*Н.Н. СОБОЛЕВА, м.н.с.*  
*И.Ю. МАЛЫГИНА, канд. техн. наук*  
*А.Л. ОСИНЦЕВА, канд. техн. наук, с.н.с.*  
(ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург)

Поступила: 02 ноября 2014  
Рецензирование: 10 ноября 2014  
Принята к печати: 15 ноября 2014

**Соболева Н.Н.** – 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34,  
Институт машиноведения УрО РАН,  
e-mail: natashasoboleva@list.ru

Исследована контактная выносливость NiCrBSi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки из порошков с различным содержанием хрома, бора, углерода (ПГ-CP2, масс. %: 14,8 Cr – 2,1 В – 0,48 С; ПГ-10Н-01, масс. %: 18,2 Cr – 3,3 В – 0,92 С) и добавкой карбида титана (ПГ-CP2 + 25 масс. % TiC). Средняя микротвердость составила 520 HV у покрытия ПГ-CP2, 720 HV у покрытия ПГ-10Н-01 и 770 HV у покрытия TiC – ПГ-CP2. Испытания на контактную усталость проводили на сервогидравлической установке Instron 8801 по схеме пульсирующего неударного контакта «шар-плоскость» с изменением нагрузки в цикле по синусоидальному закону. Установлено, что наибольшей способностью сопротивляться контактному воздействию в условиях повторяющегося упругопластического деформирования при механическом неударном контактом нагружении обладает покрытие ПГ-10Н-01 с повышенным содержанием хрома, бора и углерода по сравнению с ПГ-CP2, а наименьшей – композиционное покрытие ПГ-CP2 с добавкой 25 масс. % карбида титана TiC. Исследование пятен контакта методом электронной сканирующей микроскопии показало, что основным механизмом разрушения при контактно-усталостном нагружении всех исследованных покрытий является трещинообразование.

**Ключевые слова:** лазерная наплавка, покрытия NiCrBSi, карбид TiC, структура, микротвердость, контактная усталость.

## Введение

Нанесение покрытий методом газопорошковой лазерной наплавки, когда тонкий поверхностный слой основного металла оплавляется лазерным лучом совместно с присадочным материалом [1], является современным способом упрочнения, повышения износостойкости, а также восстановления изношенных поверхностей

деталей машин. В этой связи достаточно широкое применение находят покрытия на хромоникелевой основе, в частности, сплавы системы NiCrBSi [2, 3], которые наряду с отличными технологическими свойствами [4] имеют хорошие характеристики износостойкости, коррозионной стойкости и теплостойкости [2, 5, 6]. Кроме того, повышенное содержание углерода, хрома и бора в исходном порошке системы NiCrBSi способ-

\* Работа выполнена при частичной поддержке программы фундаментальных исследований РАН, проект № 12-Т-1-1010 и гранта РФФИ № 13-01-00732\_а. Исследования проведены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

стствует формированию при наплавке покрытий с большей твердостью и износостойкостью в условиях абразивного и адгезионного изнашивания [7–10].

Известно, что одним из резервов дальнейшего повышения износостойкости NiCrBSi наплавки является создание на их основе композиционных покрытий при введении в состав порошков различных добавок. В качестве упрочняющих фаз таких покрытий может быть использован карбид титана TiC, обладающий высокими значениями твердости, модуля упругости, температуры плавления, а также термической и химической стабильностью [6, 11–13]. Наши исследования показали возможность формирования композиционных покрытий TiC – NiCrBSi с повышенной твердостью и абразивной износостойкостью, когда в процессе газопорошковой лазерной наплавки в наплавляемый NiCrBSi порошок марки ПГ-CP2 добавляется порошок карбида титана TiC в количестве 15 и 25 мас. % [14].

Наряду с износостойкостью важной характеристикой, определяющей качество многих машиностроительных материалов и покрытий, является способность материала выдерживать контактные нагрузки [15], которую, как правило, оценивают по характеру разрушения после однократного или повторяющегося (циклического) нагружения поверхности инденторами различной формы [15–19]. Однократное нагружение не всегда позволяет адекватно оценить стойкость материала к внешнему контактному воздействию, поскольку не учитывает процессы усталостной деградации [17, 18].

В литературе имеются лишь отдельные сведения о проведении циклического нагружения NiCrBSi покрытий [15] и отсутствуют данные о влиянии химического и фазового состава порошков на контактную усталость таких покрытий. Целью настоящей работы явилось исследование контактной выносливости NiCrBSi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной

наплавки из порошков с различным содержанием хрома, бора, углерода и добавками карбида титана TiC.

### Методика экспериментального исследования

В качестве материалов для покрытий были использованы порошки сплавов системы NiCrBSi гранулометрического состава 40...160 мкм – ПГ-CP2 и ПГ-10Н-01 (см. таблицу). Для исследования покрытия с добавкой карбида титана использовалась порошковая смесь, полученная перемешиванием двух порошков: порошка ПГ-CP2 и порошка TiC гранулометрического состава 50...100 мкм в количестве 25 масс. %.

Наплавку порошков на пластины из стали Ст.3 проводили непрерывным CO<sub>2</sub>-лазером при мощности излучения 1,4...1,6 кВт, скорости 160...200 мм/мин, расходе порошка 2,9...4,9 г/мин, размере лазерного пятна на поверхности 6×1,5 мм. Порошковая смесь транспортировалась в зону наплавки инертным газом – аргоном при давлении 0,5 атм. Для уменьшения поверхностных напряжений наплавка осуществлялась в два прохода путем наложения одного слоя на другой. Толщина покрытий составила 0,6...1,7 мм. Для устранения волнистости наплавленная поверхность подвергалась шлифованию с интенсивным охлаждением.

Механические испытания на контактную усталость проводили на сервогидравлической установке Instron 8801 с использованием специальной оснастки оригинальной конструкции по схеме пульсирующего неударного контакта «шар-плоскость» с изменением нагрузки в цикле по периодическому (синусоидальному) закону, диаметром стального шара 12,7 мм, предварительной нагрузкой  $P_0 = 0,1$  кН, максимальной нагрузкой  $P_{max} = 8,7$  кН, частотой нагружения  $f = 35$  Гц на базе  $N = 10^6$  циклов нагружения (рис. 1).

Химический состав исследуемых покрытий

Марка порошка	Содержание элементов, масс. %						
	C	Cr	Ni	Fe	Si	B	TiC
ПГ-CP2	0,48	14,8	Осн.	2,6	2,9	2,1	–
ПГ-10Н-01	0,92	18,2	Осн.	3,4	4,2	3,3	–
TiC – ПГ-CP2	0,36	11,1	Осн.	2,0	2,2	1,6	25

Структуру и фазовый состав покрытий, а также поверхности после механических испытаний изучали с применением сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA II XMU с системами рентгеновского волнодисперсионного микроанализа INCA WAVE 700 и энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450.

Для измерения микротвердости покрытий применяли микротвердомеры Leica VMHT и Wilson & Wolpert 402 MVD при нагрузке на индентор 0,98 Н и времени нагружения 15 с. Трехмерные изображения пятен контакта получали с помощью оптического профилометра Wyko NT-1100.

### Результаты и обсуждение

Общий вид хромоникелевого покрытия, сформировавшегося на поверхности стальной пластины при газопорошковой лазерной наплавке, приведен на рис. 2. Покрытия по всей толщине характеризуются достаточно равномерным распределением структурных составляющих [8–10, 14]. По данным рентгеноструктурного [20] и микрорентгеноспектрального методов анализа (рис. 3), металлическую основу всех исследованных покрытий составляет  $\gamma$ -твердый раствор на основе Ni и эвтектика, состоящая из  $\gamma$  и

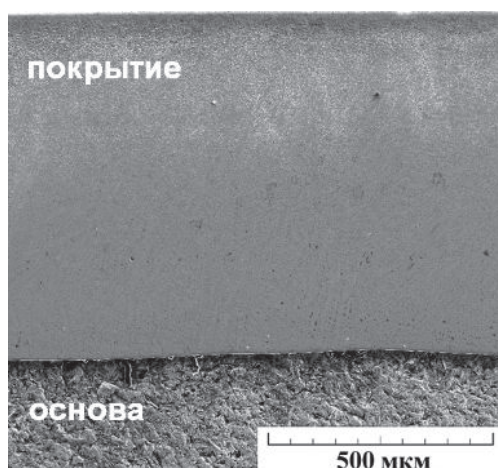


Рис. 2. Общий вид покрытия ПГ-СР2

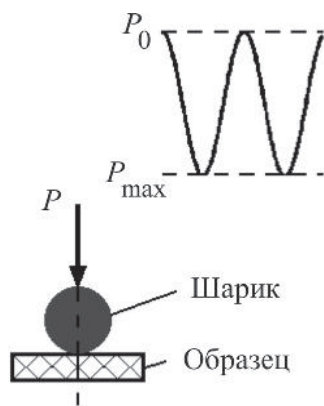


Рис. 1. Схема механических испытаний на контактную усталость

фазы  $\text{Ni}_3\text{B}$ , являющейся результатом взаимодействия между В и Ni в условиях быстрого нагрева и охлаждения [21].

Средняя микротвердость покрытия ПГ-СР2 составляет  $520 \pm 10$  HV. Повышение содержания углерода, бора и хрома приводит к повышению средней микротвердости в покрытии ПГ-10Н-01 до значений  $720 \pm 30$  HV. Добавление частиц карбида титана в количестве 25 % масс. способствует эффективному упрочнению покрытия ПГ-СР2 до уровня  $770 \pm 60$  HV [14]. Упрочняющей фазой покрытия ПГ-СР2 является карбид  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (микротвердостью  $1000 \dots 1150$  HV) (рис. 3, а). Более легированное углеродом, бором и хромом покрытие ПГ-10Н-01 содержит в качестве упрочняющих фаз борид  $\text{CrB}$  ( $1950 \dots 2400$  HV) и карбид  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  ( $1650 \dots 1800$  HV) (рис. 3, б). Формирование карбидов с разными стехиометрическими соотношениями объясняется различным количеством хрома и углерода в составе наплавляемых порошков: с увеличением отношения Cr/C карбид  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  формируется легче, чем карбид  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  [22]. При добавлении 25 масс. % TiC в состав порошка ПГ-СР2 при наплавке формируется композиционное покрытие [14], в котором наряду с дисперсными карбоборидами  $(\text{Cr}, \text{Ni})_{23}(\text{C}, \text{B})_6$  и  $(\text{Ti}, \text{Cr})(\text{C}, \text{B})$  присутствуют крупные включения карбидов титана TiC (микротвердостью  $2500 \dots 2900$  HV) (рис. 3, в).

Результаты контактно-усталостных испытаний исследованных покрытий представлены на рис. 4 и 5. В качестве критерия для оценки стойкости материалов в условиях циклического воздействия индентора используется изменение размера пятна контакта на поверхности покрытия в зависимости от числа циклов нагружения [15, 19, 23]. Из данных, приведенных на рис. 4, видно, что диаметр пятна контакта после  $10^4$  циклов нагружения у покрытия ПГ-СР2 несколько больше, чем у покрытия ПГ-10Н-01. При этом при испытаниях на базе  $10^6$  циклов с ростом числа циклов нагружения у покрытия ПГ-СР2 наблюдается более существенное увеличение размера контактных повреждений, чем у покрытия ПГ-10Н-01, где имеет место лишь незначительный рост диаметра пятна контакта (см. рис. 4). По-видимому, это обусловлено более высокой твердостью покрытия ПГ-10Н-01 ( $720 \pm 30$  HV) по сравнению с менее легированным покрытием ПГ-СР2 ( $520 \pm 10$  HV).

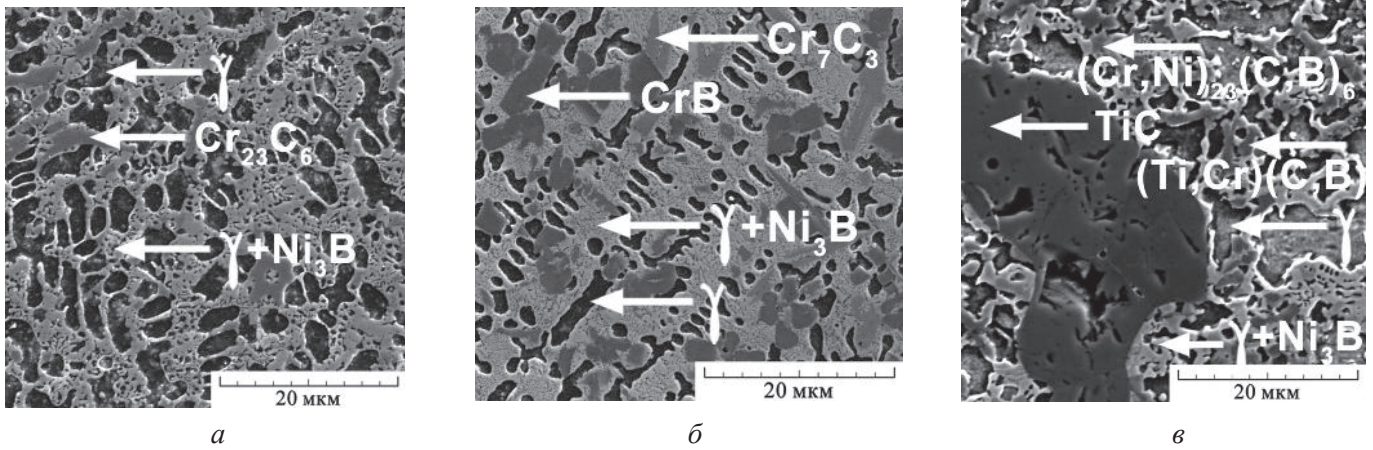


Рис. 3. Микроструктура покрытий после лазерной наплавки:

*a* – покрытие ПГ-СР2; *б* – покрытие ПГ-10Н-01; *в* – покрытие на основе ПГ-СР2 с добавкой TiC в количестве 25 масс. %

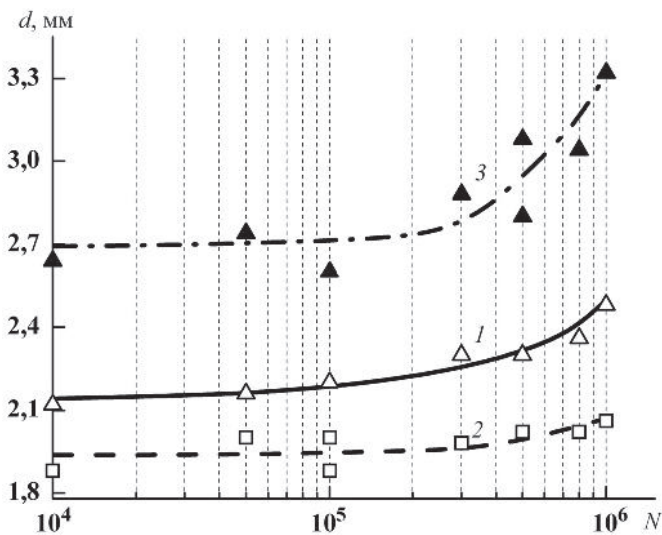


Рис. 4. Влияние числа циклов нагружения  $N$  на изменение диаметра пятна контакта  $d$  при контактно-усталостных испытаниях исследованных покрытий: 1 – покрытие ПГ-СР2; 2 – покрытие ПГ-10Н-01; 3 – покрытие на основе ПГ-СР2 с добавкой TiC в количестве 25 масс. %

Композиционное покрытие ПГ-СР2 с добавкой TiC, обладающее повышенной средней микротвердостью ( $770 \pm 60$  HV) по сравнению с покрытиями ПГ-СР2 и ПГ-10Н-01, характеризуется наибольшим диаметром пятна контакта после  $10^4$  циклов нагружения и значительным увеличением пятна контакта при  $3 \times 10^5$  циклов нагружения (см. рис. 4). Это может быть обусловлено влиянием особенностей разрушения карбидов на характеристики контактной усталости. Известно [17], что химический состав и тип карбидов оказывают сильное влияние на контактную стойкость и трещинообразование материалов с карбидным упрочнением. Кроме

того, для повышения контактно-усталостной прочности сталей с покрытиями благоприятным является наличие более дисперсных и плотных карбидов, равномерно распределенных в матрице [24]. Из рис. 3, *в* следует, что карбиды TiC в композиционном покрытии значительно более крупные, чем карбиды хрома разных стехиометрических составов в покрытиях ПГ-СР2 и ПГ-10Н-01. Это приводит к снижению контактной выносливости композиционного покрытия TiC – ПГ-СР2.

Электронно-микроскопическое исследование и профилометрия пятен контакта (рис. 5) показало, что в процессе контактно-усталостного нагружения исследованных покрытий развиваются процессы трещинообразования, характеризующиеся возникновением многочисленных кольцевых и радиальных трещин. Кольцевые трещины (указаны стрелками на рис. 5), возникающие на поверхности покрытия в зоне действия максимальных растягивающих радиальных напряжений, способствуют снятию остаточных напряжений внутри покрытия [19] и когезионному разрушению (скалыванию покрытия у края лунки, рис. 5, *б*, *з*). У покрытий ПГ-СР2 и TiC – ПГ-СР2 образование кольцевых трещин наблюдается уже после  $10^4$  циклов нагружения; при числе циклов  $3 \times 10^5$  кольцевые трещины уже полностью сформированы и при дальнейшем нагружении наблюдается резкий рост диаметра пятна контакта (см. рис. 4). У покрытия ПГ-10Н-01, напротив, при  $3 \times 10^5$  циклов нагружения наблюдается только начальная стадия образования кольцевых трещин. Слабое развитие кольцевых трещин у покрытия ПГ-10Н-01



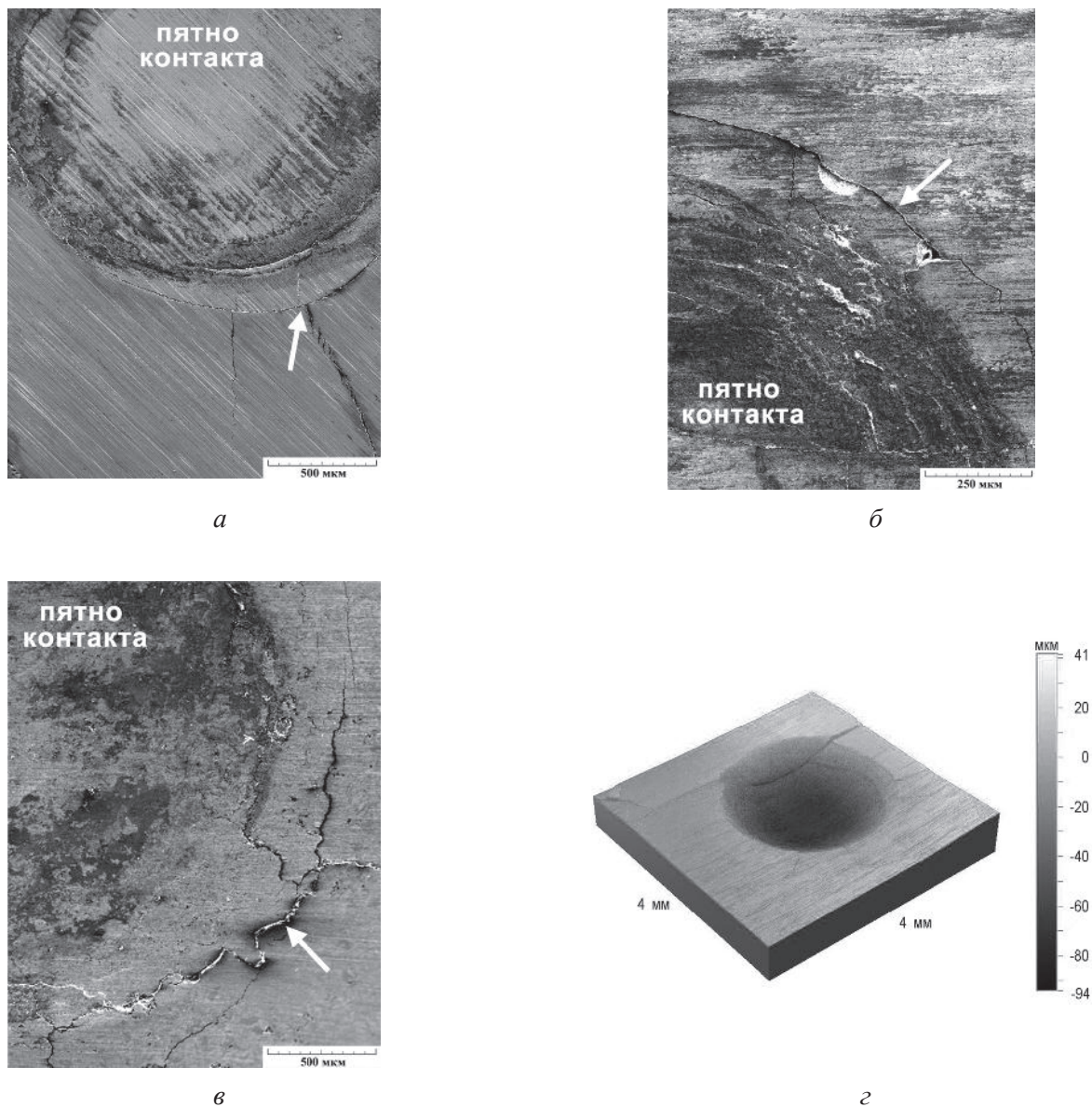


Рис. 5. Пятна контакта после контактно-усталостных испытаний с числом циклов нагружения  $N = 10^6$  исследованных покрытий:

*a* – покрытие ПГ-СР2 ; *б* – покрытие ПГ-10Н-01; *в* – покрытие на основе ПГ-СР2 с добавкой TiC в количестве 25 масс. %; *г* – покрытие ПГ-СР2 (трехмерное изображение); *а-в* – электронная сканирующая микроскопия; *г* – оптическая профилометрия

обуславливает незначительный рост диаметра пятна контакта даже при  $10^6$  циклов нагружения (см. рис. 4).

### Выводы

Исследовано влияние состава NiCrBSi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки, на сопротивление контактно-усталостному разрушению при неударном циклическом нагружении по схеме контакта «шар-плоскость». Установлено, что повышенное содержание хрома, бора и углерода в покры-

тии ПГ-10Н-01 со средним уровнем микротвердости  $720 \pm 30$  HV обеспечивает рост контактной выносливости по сравнению с менее легированным и твердым покрытием ПГ-СР2 (микротвердость  $520 \pm 10$  HV). Композиционное покрытие NiCrBSi-TiC, полученное при добавлении 25 масс. % карбида титана TiC в состав порошка ПГ-СР2, несмотря на максимальный средний уровень микротвердости ( $770 \pm 60$  HV), обладает наименьшей стойкостью в условиях контактно-усталостного нагружения вследствие наличия в покрытии крупных карбидов TiC, способствующих ускоренному трещинообразованию при

пульсирующем механическом контакте. Основным механизмом разрушения всех исследованных покрытий является трещинообразование, характеризующееся возникновением кольцевых и радиальных трещин с последующим когезионным скалыванием покрытия у края лунки.

### Список литературы

1. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки: учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1987. – 191 с.
2. Abrasive wear behavior of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings / C. Navas, R. Colaco, J. de Damborenea, R. Vilar // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Vol. 200, iss. 24. – P. 6854–6862. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.10.032.
3. Wear behaviour of laser clad NiCrBSi coating / E. Fernández, M. Cadenas, R. González, C. Navas, R. Fernández, J. de Damborenea // *Wear*. – 2005. – Vol. 259, iss. 7-12. – P. 870–875. – doi: 10.1016/j.wear.2005.02.063.
4. Katsich C., Badisch E. Effect of carbide degradation in a Ni-based hardfacing under abrasive and combined impact/abrasive conditions // *Surface and Coatings Technology*. – 2011. – Vol. 206, iss. 6. – P. 1062–1068. doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.07.064.
5. Microstructural aspects of plasma transferred arc surfaced Ni-based hardfacing alloy / K. Gurumoorthy, M. Kamaraj, K. Prasad Rao, Rao A. Sambasiva, S. Venugopal // *Material Science and Engineering: A*. – 2007. – Vol. 456, iss. 1-2. – P. 11–19. – doi: 10.1016/j.msea.2.
6. Tribological properties of TiC particles reinforced Ni-based alloy composite coatings / B. Cai, Y.-F. Tan, L. He, H. Tan, L. Gao // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2013. – Vol. 23, iss. 6. – P. 1681–1688. – doi: 10.1016/S1003-6326(13)62648-5.
7. Liyanage T., Fisher G., Gerlich A.P. Influence of alloy chemistry on microstructure and properties in NiCrBSi overlay coatings deposited by plasma transferred arc welding (PTAW) // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205, iss. 3. – P. 759–765. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.07.095.
8. Влияние химического состава на трибологические свойства хромоникелевых покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки / А.В. Макаров, Р.А. Саврай, А.Л. Осинцева, И.Ю. Малыгина // *Известия Челябинского научного центра*. – 2009. – № 2 (44). – С. 28–33.
9. Вихретоковый контроль твердости, износостойкости и толщины покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки / А.В. Макаров, Э.С. Горкунов, И.Ю. Малыгина, Л.Х. Коган, Р.А. Саврай, А.Л. Осинцева // *Дефектоскопия*. – 2009. – № 11. – С. 68–78.
10. Влияние микроструктуры и фазового состава на трибологические свойства NiCrBSi лазерных покрытий / Н.Н. Соболева, И.Ю. Малыгина, А.Л. Осинцева, Н.А. Поздеева // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2011. – Т. 13, № 4 (3). – С. 869–873.
11. Characterisation of TiC–NiMo reinforced Ni-based hardfacing / A. Zikin, E. Badisch, I. Hussainova, C. Tomastik, H. Danninger // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 236. – P. 36–44. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.02.027.
12. Microstructure and wear properties of TiC/FeCrBSi surface composite coating prepared by laser cladding / X.H. Wang, M. Zhang, X.M. Liu, S.Y. Qu, Z.D. Zou // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202, iss. 15. – P. 3600–3606. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.12.039.
13. TiC reinforced composite coating produced by powder feeding laser cladding / S. Yang, W.-J. Liu, M.-L. Zhong, Z.-J. Wang // *Materials Letters*. – 2004. – Vol. 58, iss. 24. – P. 2958–2962. – doi: 10.1016/j.matlet.2004.03.051.
14. Формирование композиционного покрытия NiCrBSi – TiC с повышенной абразивной износостойкостью методом газопорошковой лазерной наплавки / А.В. Макаров, Н.Н. Соболева, И.Ю. Малыгина, А.Л. Осинцева // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2013. – № 11 (107). – С. 38–44.
15. Стойкость упрочненных материалов в условиях контактного нагружения / Л.И. Тушинский, В.А. Батаев, В.М. Потапов, А.А. Батаев, А.П. Тимофеев // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1988. – № 5. – С. 36–38.
16. Yonezu A., Xu B., Chen X. An experimental methodology for characterizing fracture of hard thin films under cyclic contact loading // *Thin Solid Films*. – 2010. – Vol. 518, iss. 8. – P. 2082–2089. – doi: 10.1016/j.tsf.2009.07.199.
17. Influence of substrate microstructure on the contact fatigue strength of coated cold-work tool steels / G. Ramírez, A. Mestra, B. Casas, I. Valls, R. Martínez, R. Bueno, A. Góez, A. Mateo, L. Llanes // *Surface and Coatings Technology*. – 2012. – Vol. 206, iss. 13. – P. 3069–3081. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.12.012.
18. Contact fatigue behavior of PVD-coated steel / G. Ramírez, E. Tarrés, B. Casas, I. Valls, R. Martínez, L. Llanes // *Plasma Processes and Polymers*. – 2009. – Vol. 6, iss. Supplement 1. – P. S588–S591. – doi: 10.1002/ppap.200931501.
19. Contact fatigue behavior of PVD-coated hardmetals / E. Tarrés, G. Ramírez, Y. Gaillard, E. Jiménez-Piqué, L. Llanes // *International Journal of*

Refractory Metals and Hard Materials. – 2009. – Vol. 27, iss. 2. – P. 323–331. – doi: 10.1016/j.ijrmhm.2008.05.003.

20. *Соболева Н.Н., Макаров А.В., Малыгина И.Ю.* Упрочняющая фрикционная обработка NiCrBSi лазерного покрытия // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2013. – № 4 (61). – С. 79–85.

21. *Dawei Z., Li T., Lei T.C.* Laser cladding of Ni-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/(Ni+Cr) composite coating // *Surface and Coatings Technology*. – 1988. – Vol. 110, 1-2. – P. 81–85. – doi: 10.1016/S0257-8972(98)00675-6.

22. Comparison of laser-clad and furnace-melted Ni-based alloy microstructures / Q. Li, D. Zhang, T. Lei, Ch. Chen, W. Chen // *Surface and Coatings Technology*. –

2001. – Vol. 137, iss. 2-3. – P. 122–135. – doi: 10.1016/S0257-8972(00)00732-5.

23. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovski, D.S. Krivizhenko, A.A. Losinskaya, O.G. Lenivtseva // *Applied Surface Science*. – 2013. – Vol. 284. – P. 472–481. – doi: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121.

24. Fatigue susceptibility under contact loading of hardmetals coated with ceramic films / L. Llanes, E. Tarés, G. Ramírez, C.A. Botero, E. Jiménez-Piqué // *Procedia Engineering*. – 2010. – Vol. 2, iss. 1. – P. 299–308. – doi: 10.1016/j.proeng.2010.03.033.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(65), October – December 2014, Pages 43–51

### The contact endurance of NiCrBSi coatings obtained by gas powder laser cladding

**Savrai R.A.**, Ph.D. (Engineering), e-mail: ras@imach.uran.ru

**Makarov A.V.**, D.Sc. (Engineering), Senior Researcher, e-mail: avm@imp.uran.ru

**Soboleva N.N.**, Junior Researcher, e-mail: natashasoboleva@list.ru

**Malygina I.Yu.**, Ph.D. (Engineering), e-mail: malygina@imach.uran.ru

**Osintseva A.L.**, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, e-mail: osintseva@imach.uran.ru

Institute of Engineering Science Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya str., Yekaterinburg, 630049, Russian Federation

#### Abstract

The contact endurance of NiCrBSi coatings obtained by gas powder laser cladding of the powders with various chrome, carbon and boron content (PG-SR2, wt. %: 14.8 Cr – 2.1 B – 0.48 C; PG-10N-01, wt. %: 18.2 Cr – 3.3 B – 0.92 C) and TiC addition (PG-SR2 + 25 wt. % TiC) is investigated. The average microhardness was 520 HV for PG-SR coating, 720 HV for PG-10N-01 coating and 770 HV for TiC – PG-SR2 coating. Tests on the contact fatigue are carried out using a servohydraulic testing machine (Instron 8801) circuit-wise pulsating non-impact contact «ball-plane» scheme with the load variation during a cycle according to a sinusoidal law. The maximum resistance to a contact impact during repetitive elastic-plastic deformation on mechanical non-impact contact loading is determined for PG-10N-01 coating with increased chrome, carbon and boron content in comparison with PG-SP2, the minimal one was for composite PG-SR2 coating with addition 25 wt. % TiC particles. The examination of the contact spots using scanning electron microscopy shows that the main fracture mechanism of every investigated coating under contact fatigue loading is cracking.

#### Keywords:

laser cladding, NiCrBSi coatings, TiC titanium carbide, structure, microhardness, contact fatigue.

#### References

1. Grigor'yants A.G., Safonov A.N. *Lazernaya tekhnika i tekhnologiya. Kn. 3: Metody poverkhnostnoi lazernoi obrabotki* [Laser equipment and technology. Vol. 3: Methods of surface laser treatment]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 191 p.

2. Navas C., Colaco R., de Damborenea J., Vilar R. Abrasive wear behavior of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 200, iss. 24, pp. 6854–6862. doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.10.032
3. Fernández E., Cadenas M., González R., Navas C., Fernández R., de Damborenea J. Wear behaviour of laser clad NiCrBSi coating. *Wear*, 2005, vol. 259, iss. 7-12, pp. 870–875. doi: 10.1016/j.wear.2005.02.063
4. Katsich C., Badisch E. Effect of carbide degradation in a Ni-based hardfacing under abrasive and combined impact/abrasive conditions. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 206, iss. 6, pp. 1062–1068. doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.07.064
5. Gurumoorthy K., Kamaraj M., Prasad Rao K., Sambasiva Rao A., Venugopal S. Microstructural aspects of plasma transferred arc surfaced Ni-based hardfacing alloy. *Material Science and Engineering: A*, 2007, vol. 456, iss. 1-2, pp. 11–19. doi: 10.1016/j.msea.2006.12.121
6. Cai B., Tan Y.-f., He L., Tan H., Gao L. Tribological properties of TiC particles reinforced Ni-based alloy composite coatings. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, vol. 23, iss. 6, pp. 1681–1688. doi: 10.1016/S1003-6326(13)62648-5
7. Liyanage T., Fisher G., Gerlich A.P. Influence of alloy chemistry on microstructure and properties in NiCrBSi overlay coatings deposited by plasma transferred arc welding (PTAW). *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 205, iss. 3, pp. 759–765. doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.07.095
8. Makarov A.V., Savrai R.A., Osintseva A.L., Malygina I.Yu. Vliyanie khimicheskogo sostava na tribologicheskie svoistva khromonikelevykh pokrytii, poluchennykh metodom gazoporoshkovoi lazernoi naplavki [Effect of chemical composition on the tribological properties of nickel-chromium coatings produced by gas-powder laser cladding]. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra – Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center*, 2009, no. 2 (44), pp. 28–33.
9. Makarov A.V., Gorkunov E.S., Malygina I.Yu., Kogan L.Kh., Savrai R.A., Osintseva A.L. Vikhretokovyi kontrol' tverdosti, iznosostoikosti i tolshchiny pokrytii, poluchennykh metodom gazoporoshkovoi lazernoi naplavki [Eddy-current testing of the hardness, wear resistance, and thickness of coatings prepared by gas-powder laser cladding]. *Defektoskopiya – Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2009, no. 11, pp. 68–78. (In Russian)
10. Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Osintseva A.L., Pozdeeva N.A. Vliyanie mikrostruktury i fazovogo sostava na tribologicheskie svoistva NiCrBSi lazernykh pokrytii [The influence of the microstructure and phase composition on tribological performances of NiCrBSi laser coatings]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi Akademii Nauk – Proceedings of the Samara Scientific Center of the RAS*, 2011, vol. 13, no. 4 (3), pp. 869–873.
11. Zikin A., Badisch E., Hussainova I., Tomastik C., Danninger H. Characterisation of TiC–NiMo reinforced Ni-based hardfacing. *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 236, pp. 36–44. doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.02.027
12. Wang X.H., Zhang M., Liu X.M., Qu S.Y., Zou Z.D. Microstructure and wear properties of TiC/FeCrBSi surface composite coating prepared by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 2008, vol. 202, iss. 15, pp. 3600–3606. doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.12.039
13. Yang S., Liu W.-j., Zhong M.-l., Wang Z.-j. TiC reinforced composite coating produced by powder feeding laser cladding. *Materials Letters*, 2004, vol. 58, iss. 24, pp. 2958–2962. doi: 10.1016/j.matlet.2004.03.051
14. Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Osintseva A.L. Formirovanie kompozitsionnogo pokrytiya NiCrBSi – TiC s povyshennoi abrazivnoi iznosostoikost'yu metodom gazoporoshkovoi lazernoi naplavki [The formation of NiCrBSi–TiC composite coating with increased abrasive wear resistance by gas powder laser cladding]. *Uprochnyayushchie tekhnologii I pokrytiya – Hardening technology and coatings*, 2013, no. 11 (107), pp. 38–44.
15. Tushinskii L.I., Bataev V.A., Potapov V.M., Bataev A.A., Timofeev A.P. Stoikost' uprochnennykh materialov v usloviyakh kontaktnogo nagruzheniya [Life of hardened materials under the conditions of contact load]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 1988, no. 5, pp. 36–38. (In Russian)
16. Yonezu A., Xu B., Chen X. An experimental methodology for characterizing fracture of hard thin films under cyclic contact loading. *Thin Solid Films*, 2010, vol. 518, iss. 8, pp. 2082–2089. doi: 10.1016/j.tsf.2009.07.199
17. Ramírez G., Mestra A., Casas B., Valls I., Martínez R., Bueno R., Góez A., Mateo A., Llanes L. Influence of substrate microstructure on the contact fatigue strength of coated cold-work tool steels. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 206, iss. 13, pp. 3069–3081. doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.12.012
18. Ramírez G., Tarrés E., Casas B., Valls I., Martínez R., Llanes L. Contact Fatigue Behavior of PVD-Coated Steel. *Plasma Processes and Polymers*, 2009, vol. 6, iss. Supplement 1, pp. S588–S591. doi: 10.1002/ppap.200931501
19. Tarrés E., Ramírez G., Gaillard Y., Jiménez-Piqué E., Llanes L. Contact fatigue behavior of PVD-coated hardmetals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2009, vol. 27, iss. 2, pp. 323–331. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2008.05.003

20. Soboleva N.N., Makarov A.V., Malygina I.Yu. Uprochnyayushchaya friktsionnaya obrabotka NiCrBSi lazernogo pokrytiya [Hardening frictional treatment of NiCrBSi laser clad coating]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 4 (61), pp. 79–85.

21. Dawei Z., Li T., Lei T.C. Laser cladding of Ni–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/(Ni+Cr) composite coating. *Surface and Coatings Technology*, 1988, vol. 110, iss. 1-2, pp. 81–85. doi: 10.1016/S0257-8972(98)00675-6

22. Li Q., Zhang D., Lei T., Chen Ch., Chen W. Comparison of laser-clad and furnace-melted Ni-based alloy microstructures. *Surface and Coatings Technology*, 2001, vol. 137, iss. 2-3, pp. 122–135. doi: 10.1016/S0257-8972(00)00732-5

23. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovski M.G., Krivizhenko D.S., Losinskaya A.A., Lenivtseva O.G. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 284, pp. 472–481. doi: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121

24. Llanes L., Tarrés E., Ramírez G., Botero C.A., Jiménez-Piqué E. Fatigue susceptibility under contact loading of hardmetals coated with ceramic films. *Procedia Engineering*, 2010, vol. 2, iss. 1, pp. 299–308. doi: 10.1016/j.proeng.2010.03.033

### Funding

The reported study was partly supported by fundamental research RAS project No. 12-T-1-1010 and RFBR, research project No. 13-01-00732\_a. Study was carried out on the equipment of the Collective center “Plastometria”, Institute of Engineering Science, Ural Branch of Russian Academy of Sciences.

Received 02 November 2014

Revised 10 November 2014

Accepted 15 November 2014

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНОГО ОБРЫВА ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*А.Е. БУЗЮРКИН<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук  
И.Л. ГЛАДКИЙ<sup>2</sup>, канд. техн. наук  
Е.И. КРАУС<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук  
(<sup>1</sup>ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск,  
<sup>2</sup>ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь)*

Поступила 01 сентября 2014  
Рецензирование 19 сентября 2014  
Принята к печати 25 сентября 2014

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

Одним из критериев оценки надежности корпусов авиационных газотурбинных двигателей является их способность к удержанию оборвавшихся элементов ротора, и в первую очередь лопаток вентилятора.

В работе представлены результаты численного моделирования процессов деформирования и разрушения корпуса вентилятора газотурбинного авиадвигателя при высокоскоростном соударении с лопаткой вентилятора при ее аварийном обрыве. Верифицированы значения параметров модели Джонсона-Кука, описывающих поведение сплавов ВТ6, ОТ4 и ОТ4-0. Сравнение с экспериментальными данными показывает хорошее соответствие по остаточным скоростям вылета оборвавшейся лопатки и формам пробитых отверстий.

Показано, что в зависимости от материала корпуса, его толщины и скорости обрыва лопатки существует возможность либо пробития корпуса оборвавшейся лопаткой и ее вылет за его пределы, либо локализация оборвавшейся лопатки внутри корпуса.

**Ключевые слова:** деформация, разрушение, скорость деформации, пластичность, LS-DYNA, модель Джонсона-Кука.

## Введение

Одной из основных задач, которая ставится при проектировании современных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), является проблема обеспечения непробиваемости корпусов оторвавшимися фрагментами ротора.

Разрушение лопаток вентилятора может быть вызвано различными как внутренними, так и внешними причинами. Среди основных причин можно выделить такие, как многоцикловая усталость, дефекты в материале, нежелательные остаточные напряжения, повреждения от воздействия попадающих в тракт двигателя посторонних предметов, а также множество других факторов [1–3].

Разрушение лопатки и ее обрыв может приводить к различным опасным явлениям, таким

как вылет за пределы корпуса двигателя нелокализованных фрагментов лопатки, повреждению двигателя вследствие возникновения дисбаланса ротора и прочих разрушений, вызванных попаданием в тракт двигателя осколков лопатки. Наиболее опасные из таких явлений – пробивание корпуса двигателя фрагментами, обладающими высокой кинетической энергией. В результате этого может быть поврежден не только двигатель, но и все воздушное судно. Поэтому нормативные технические документы по авиационным двигателям содержат требование об обязательной локализации в корпусах двигателя фрагментов, образующихся при разрушении рабочих лопаток турбомашин [4–6].

Обеспечение и экспериментальное подтверждение соответствия этому требованию связаны с большими затратами времени и средств, поэтому

встает вопрос об использовании численных методов для моделирования. Значительное количество работ посвящено разработке подходов к расчетной оценке непробиваемости корпусов на основе использования эмпирических соотношений или современных программных комплексов [7–9]. Тем не менее известные в настоящее время методы решения этой задачи не позволяют надежно прогнозировать результат взаимодействия оторвавшегося фрагмента с корпусом. Это обстоятельство обусловлено сложностью и многообразием термомеханических процессов, происходящих при указанном взаимодействии, а также сложностью конструктивных решений и разнообразием применяемых материалов.

В настоящее время разработка надежных и точных методов оценки непробиваемости является одним из приоритетных направлений в мировом авиационном двигателестроении. Основой для построения этих методов является объединение экспериментальных методов исследования и технологий 3D компьютерного моделирования. Пакеты прикладных программ могут быть использованы для моделирования поведения материалов при динамическом нагружении. Эти приложения требуют знаний сложных моделей поведения материала, параметры которых зависят от напряженного состояния, скорости деформации и температуры. Для оснащения моделей поведения и критериев разрушения нужны параметрами и константами требуется обширная база по динамическим свойствам материалов. Кроме того, для проверки адекватности применяемых моделей необходимы разработка и проведение некоторых «модельных» натуральных экспериментов.

Целью настоящей работы является численное моделирование процессов деформирования и разрушения корпуса вентилятора газотурбинного авиадвигателя при высокоскоростном соударении с лопаткой вентилятора для оценки параметров материала корпуса. В качестве «инструмента» численного моделирования используется пакет прикладных программ LS-DYNA.

## 1. Экспериментальное исследование аварийного обрыва лопаток вентилятора ГТД

В ОАО «Авиадвигатель» создана экспериментальная установка [10] по определению характеристик диссипации энергии материалов и конструкций корпуса вентилятора и проведены сравнительные испытания кольцевых образцов корпуса вентилятора при обрыве лопатки вентилятора.

Корпуса вентиляторов выполняются из титановых сплавов ВТ6, ОТ4 и ОТ4-0 и имеют следующие геометрические параметры: диаметр 636 мм, толщина стенок 2...8 мм.

В эксперименте в качестве ударяющего фрагмента вместо реальной лопатки вентилятора



Рис. 1. Имитатор лопатки

использовался конический имитатор лопатки из титанового сплава ВТ8М с аналогичными массовыми характеристиками (рис. 1). Имитатор лопатки имеет следующие параметры: масса

168 г, радиус центра тяжести 199,3 мм, диаметр периферийного сечения 15 мм, диаметр «комлевой» части 30 мм, длина 90 мм.

Экспериментальные данные по результатам испытаний кольцевых образцов корпуса вентилятора при обрыве лопатки вентилятора приведены в табл. 1. Проведено пять экспериментов для разных материалов корпуса вентилятора с различной толщиной стенок корпуса и начальными скоростями вращения имитатора лопатки вентилятора.

Таблица 1

Результаты испытаний кольцевых образцов корпуса вентилятора

Сплав	Заданная толщина стенки корпуса, мм	Начальная частота вращения, об/мин	Остаточная скорость, м/с	Начальная кинетическая энергия, кДж
ВТ6	5	14 720	69	8,08
ОТ4	2	11 800	202	5,19
ОТ4	6	11 800	0	5,19
ОТ4	8	11 800	0	5,19
ОТ4-0	6	14 980	0	8,37

В каждом эксперименте имитатор лопатки после обрыва осуществлял радиальный удар по корпусу вентилятора. При этом был возможен как дальнейший вылет имитатора за пределы корпуса, так и его локализация внутри корпуса вентилятора. В дальнейшем пробиванием корпуса будем называть вылет имитатора наружу.

## 2. Численное исследование модельных испытаний кольцевых образцов корпуса вентилятора

Численное моделирование процессов деформирования и разрушения корпуса вентилятора авиадвигателя при высокоскоростном соударении с имитатором лопатки вентилятора осуществлялось с помощью конечно-элементного комплекса LS-DYNA [11]. Задача решалась в трехмерном случае в лагранжевой постановке. Геометрическая модель, соответствующая эксперименту, приведена на рис. 2.

Для описания поведения исследуемых титановых сплавов применялась модель \*MAT\_JOHNSON\_COOK, использующая соотношения Джонсона-Кука [12, 13] с уравнением состояния в форме Ми-Грюнайзена [14]. Опыт создания уравнения состояния [15,16] показал, что несогласованность упругих констант приводит к нефизическому поведению материала при ударном нагружении. Поэтому было проведено согласование упругих постоянных исследуемых материалов между собой и уравнением состояния. Значения параметров материалов [17], параме-

тров модели Джонсона-Кука  $A, B, n, C, m$ , модели разрушения  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$  [18] и коэффициенты уравнения состояния, согласованные с [19] и использованные в расчетах, представлены в табл. 2.

Поведение материала имитатора лопатки при взаимодействии с корпусом описывалось с помощью модели \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY.

Полученные в расчетах значения остаточной скорости имитатора лопатки и величины относительной погрешности по остаточной скорости приведены в табл. 3.

На рис. 3 представлены результаты эксперимента и численного моделирования взаимодействия имитатора лопатки с корпусом вентилятора, толщиной 5 мм из высокопрочного титанового сплава ВТ6. Корпус вентилятора был пробит боковой поверхностью имитатора лопатки с остаточной скоростью 70,7 м/с. Относительная погрешность по сравнению с экспериментально измеренной остаточной скоростью не превышает 3 %. Следов пластической деформации около места излома практически не наблюдается. Форма отверстия, пробитая имитатором лопатки, в корпусе хорошо согласуется с экспериментом. В этом случае происходит гашение 95 % начальной кинетической энергии имитатора лопатки.

Рассмотрим более детально динамику процесса пробития имитатором корпуса вентилятора. После обрыва имитатор осуществляет радиальный удар тонким концом по корпусу вентиля-

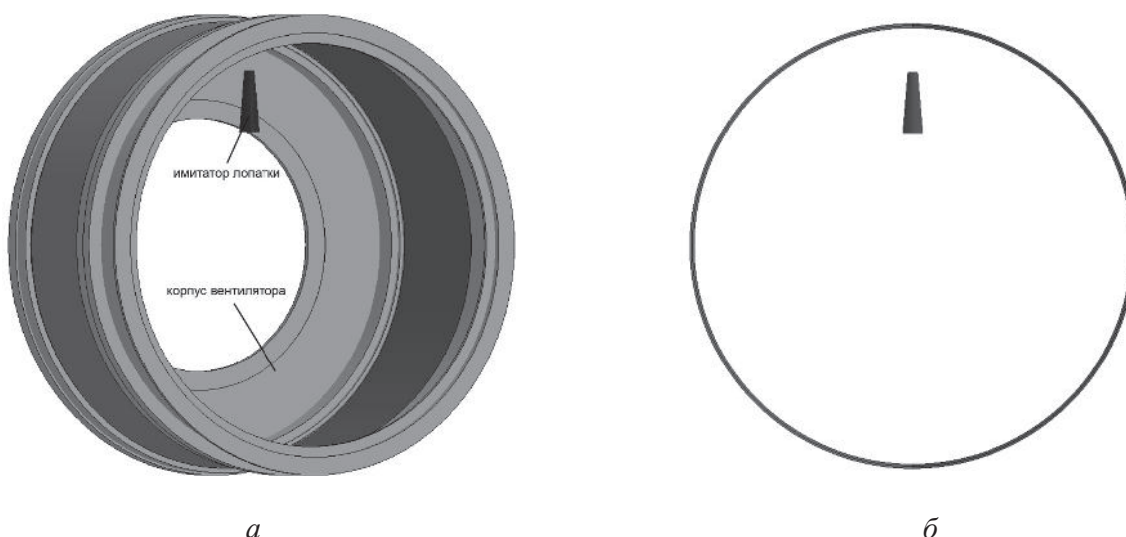


Рис. 2. Геометрическая модель (а) и положение имитатора лопатки в момент обрыва (б)



Таблица 2

## Значения параметров сплавов

Параметр	Сплав			
	BT6	OT4	OT4-0	BT8M
Плотность, $\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	4,43	4,55	4,55	4,516
Модуль объемного сжатия, $K_s$ , МПа	116,0	116,0	116,0	–
Модуль сдвига, $G$ , ГПа	38,0	38,0	38,0	–
Модуль Юнга, $E$ , ГПа	114,5	114,5	114,5	120,0
Коэффициент Пуассона, $\nu$	0,345	0,345	0,345	0,3
$A$ , МПа	900,0	600,0	500,0	–
$B$ , Мпа	509,75	528,0	353,9	–
$n$	0,506	0,386	0,508	–
$C$	0,03	0,03	0,03	–
$m$	0,0	0,0	0,0	–
$D_1$	–0,81	–0,995	–1,157	–
$D_2$	1,18	1,45	1,685	–
$D_3$	–0,15	–0,1	–0,083	–
$D_4$	–0,02	–0,02	0,024	–
$D_5$	0,0	0,0	0,0	–
Объемная скорость звука, $C_0$ , км/с	5,12	5,12	5,12	–
Коэффициент наклона ударной адиабаты, $S$	1,028	1,028	1,028	–
Коэффициент Грюнайзена, $\gamma_0$	1,23	1,23	1,23	–

Таблица 3

## Расчетные значения

Сплав	Заданная толщина стенки корпуса, мм	Остаточная скорость, м/с	Относительная погрешность по остаточной скорости, %
BT6	5	70,7	2,46
OT4	2	206	1,9
OT4	6	0	0
OT4	8	0	0
OT4-0	6	0	–

тора (рис. 4, а), затем из-за торможения поворачивает на небольшой угол и пробивает корпус «комлевой» частью с последующим вылетом за его пределы (рис. 4, б).

Для титанового сплава средней прочности OT4 представлены три эксперимента с различной толщиной стенки корпуса вентилятора. Начальная скорость обрыва имитатора лопатки не менялась. Корпус с толщиной стенки 2 мм (рис. 5) имитатор пробил с остаточной скоростью 206 м/с. Относительная погрешность по

остаточной скорости имитатора в сравнении с экспериментом составила 2 %. При этом гасится всего 31,5 % начальной кинетической энергии удара. Наблюдается хорошее соответствие формы отверстий в расчете и эксперименте.

В корпусе с толщиной стенки 6 мм из титанового сплава OT4 (рис. 6) имитатор лопатки тонким концом пробил отверстие, развернулся боковой поверхностью к корпусу, а затем был локализован. В данном случае пробития корпуса не произошло. В эксперименте в месте удара

«комлевым» сечением образована сквозная трещина в корпусе. В расчетах наблюдается небольшая выпуклость в месте удара «комлевого» сечения, что, по всей видимости, связано с завышенным пластическим коэффициентом в модели Джонсона-Кука.

В корпусе с толщиной стенки 8 мм из титанового сплава ОТ4 (рис. 7) имитатором лопатки

было пробито отверстие значительно меньшего размера, чем на образце, толщиной 6 мм, и при ударе «комлевой» частью имитатора сквозной трещины в корпусе не образовалось. Имитатор локализован в корпусе вентилятора.

В корпусе толщиной 6 мм из титанового сплава повышенной пластичности ОТ4-0 имитатором лопатки после обрыва при ударе

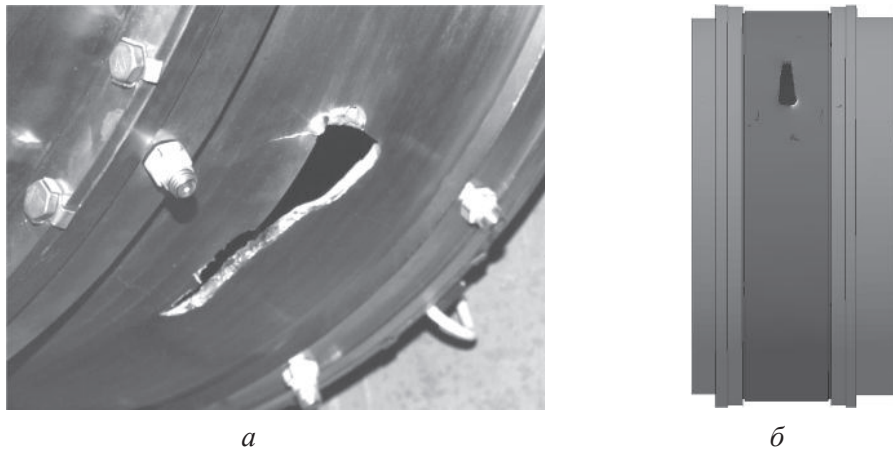


Рис. 3. Результаты эксперимента (а) и расчетов (б) для ВТ6. Толщина стенки корпуса 5 мм

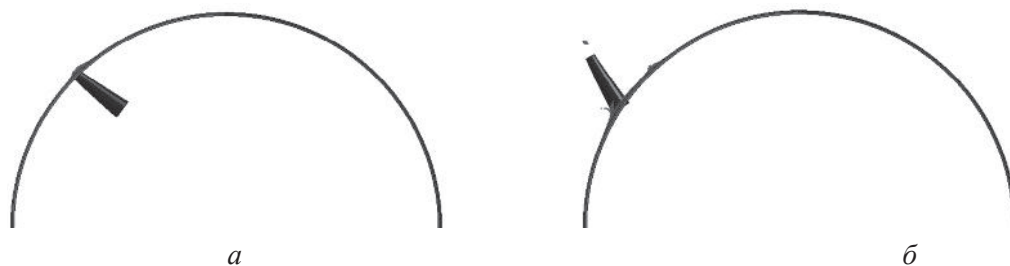


Рис. 4. Положение имитатора лопатки. Сплав ВТ6. Толщина стенки корпуса 5 мм:  
а – удар в корпус; б – вылет имитатора



Рис. 5. Результаты эксперимента (а) и расчетов (б) для ОТ4. Толщина стенки корпуса 2 мм

тонким концом было пробито отверстие в корпусе (рис. 8, *а*). После торможения имитатор развернулся к образцу боковой поверхностью, произвел удар тяжелой «комлевой» частью (рис. 8, *б*) и был локализован корпусом, испытавшим значительную пластическую деформацию. Наблюдается качественное соответствие фор-

мы отверстий в расчете и эксперименте (рис. 9). Однако, по всей видимости, в расчете материал имеет завышенную пластичность, поскольку при ударе толстым концом имитатор пробивает в корпусе трещину, которой не наблюдается в результате численного моделирования.

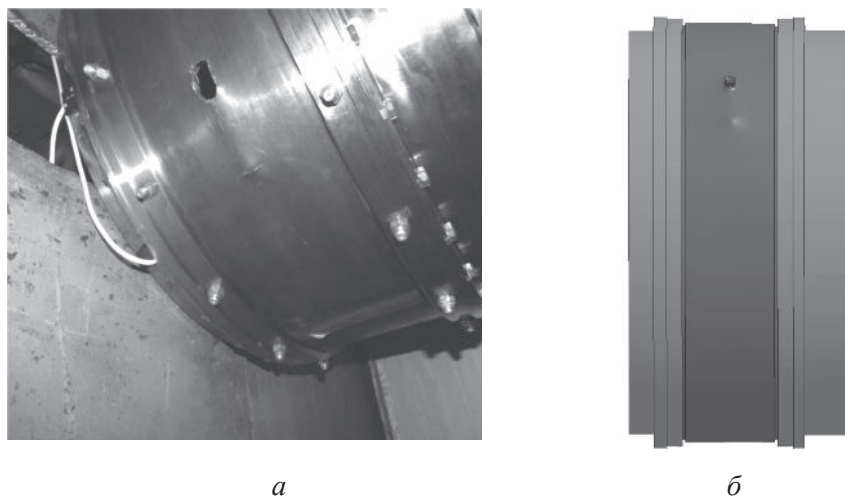


Рис. 6. Результаты эксперимента (*а*) и расчетов (*б*) для ОТ4. Толщина стенки корпуса 6 мм

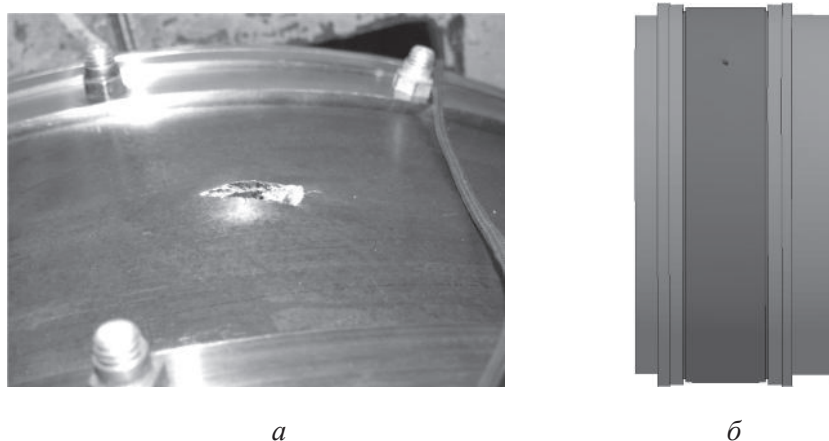


Рис. 7. Результаты эксперимента (*а*) и расчетов (*б*) для ОТ4. Толщина стенки корпуса 8 мм



Рис. 8. Положение имитатора лопатки. Сплав – ОТ4-0. Толщина стенки корпуса 6 мм:  
*а* – удар в корпус; *б* – локализация имитатора после удара

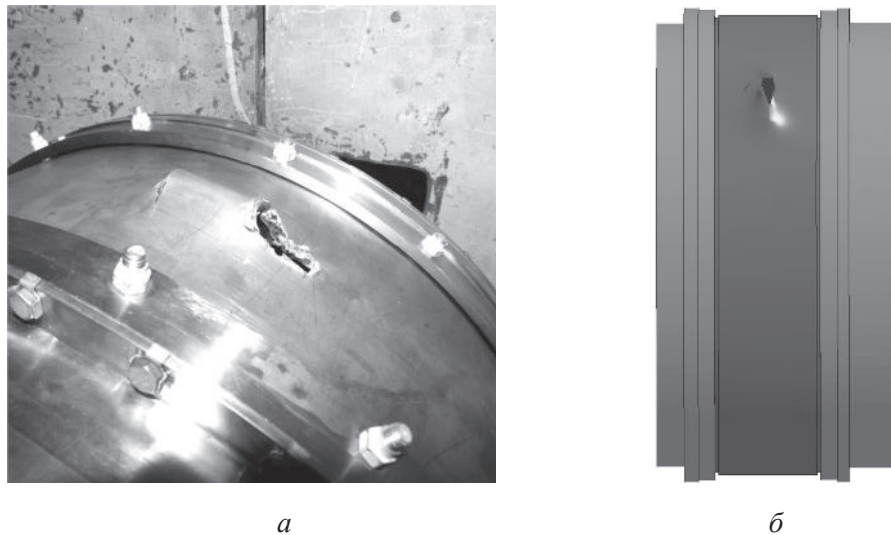


Рис. 9. Результаты эксперимента (а) и расчетов (б) для ОТ4-0. Толщина стенки корпуса 6 мм

### Выводы

В работе проведено численное моделирование процессов деформирования и разрушения корпуса вентилятора газотурбинного авиадвигателя при высокоскоростном соударении с имитатором лопатки вентилятора в пакете LS-DYNA.

Верифицированы значения параметров модели Джонсона-Кука, описывающих поведение сплавов ВТ6, ОТ4 и ОТ4-0. Результаты численного моделирования с использованием полученных значений находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными.

Показано, что корпуса вентиляторов, изготовленные из сплава ВТ6 с толщиной стенки 5 мм и сплава ОТ4 с толщиной стенки 2 мм пробиваются оборвавшейся лопаткой вентилятора при заданной скорости обрыва лопатки, что может привести к катастрофическим последствиям. Корпуса вентиляторов, изготовленных из сплава ОТ4 (толщина стенки корпуса 6 и 8 мм) и сплава ОТ4-0 с толщиной стенки 6 мм успешно локализируют оборвавшуюся лопатку при заданной скорости обрыва.

### Список литературы

1. Акимов В.М. Основы надежности газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.
2. Конструкционная прочность материалов и деталей ГТД / И.А. Биргер, Б.Ф. Балашов, Р.А. Дульнев. – М.: Машиностроение, 1981. – 222 с.
3. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.

4. Federal Aviation Administration. Airworthiness Standards: Aircraft Engine Standards for Engine Life-Limited Parts. 14 CFR. Part 33.70. Amdt. 33-22, 72 FR 50860, 2007.

5. European Aviation Safety Agency. Certification Specifications for Engines. CS-E. – 150 p.

6. Нормы прочности авиационных газотурбинных двигателей гражданской авиации / под ред. Ю.А. Ножницкого. – 6-е изд. – М.: ГНЦ РФ ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2004. – 260 с.

7. Каримбаев Т.Д., Луппов А.А. Исследование кинематики взаимодействия оборвавшейся лопатки вентилятора с деталями и узлами тракта ГТД методом конечных элементов в пакете LS-DYNA // Новые технологические процессы и надежность ГТД. – 2008. – Вып. 8. – С. 85–96.

8. Гладкий И.Л. Исследование последовательности обрыва лопаток ГТД методом конечных элементов // Вестник ПГТУ. Динамика и прочность машин. – 2003. – № 4. – С. 125–130.

9. Численное моделирование обрыва лопатки вентилятора / Ю.Н. Шмотин, А.А. Рябов, Д.В. Габов, С.С. Куканов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 9 (25). – С. 63–67.

10. Гладкий И.Л., Березин Р.И. Экспериментальное определение стойкости к ударному воздействию материалов, применяющихся в корпусах вентиляторов газотурбинных двигателей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 4-5. – С. 1359–1362.

11. LS-DYNA: Keyword User's Manual: vol. 1, 2: version R7.0. – Livermore, California: LSTC, 2013.

12. Johnson G.R., Cook W.H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures // Proceedings

of Seventh International Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, 19–21 April 1983. – Hague, 1983. – P. 541–547.

13. *Johnson G.R., Cook W.H.* Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1985. – Vol. 21, iss. 1. – P. 31–48. – doi: 10.1016/0013-7944(85)90052-9

14. *Hallquist J.O.* LS-DYNA: Theoretical manual. – Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 1998. – 498 p.

15. *Kraus E.I., Shabalin I.I.* Impact loading of a space nuclear powerplant // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2013. – Vol. 24. – P. 138–150. – doi: 10.3221/IGF-ESIS.24.15

16. *Краус Е.И., Фомин В.М., Шабалин И.И.* Определение модуля сдвига за фронтом сильной ударной волны // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математическое моделиро-*

вание и программирование». – 2014. – Т. 7, № 1. – С. 49–61. – doi: 10.14529/mmp140105.

17. *Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С.* Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. – М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.

18. *Бузюркин А.Е., Гладкий И.Л., Краус Е.И.* Применение численного моделирования для определения и верификации параметров модели Джонсона-Кука при высокоскоростном деформировании титановых сплавов // *Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций: сборник материалов III Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Ю.Н. Работнова, 26–30 мая 2014 г.* – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – С. 17.

19. *Steinberg D.J.* Equation of State and Strength Properties of Selected Materials: Report N UCRL-MA-106439. Change 1 / University of California, Lawrence Livermore National Laboratories. – Livermore, 1996. – 69 p.

## OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(65), October – December 2014, Pages 52–60

### Numerical simulation of gas turbine engines fan blades emergency breakage

**Buzurkin A.E.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Physics and Mathematics), e-mail: buzjura@itam.nsc.ru

**Gladkiy I.L.**<sup>2</sup>, Ph.D. (Engineering), e-mail: dersu123@gmail.com

**Kraus E.I.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Physics and Mathematics), e-mail: kraus@itam.nsc.ru

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

<sup>2</sup>OJSC “Aviadvigatel”, 93 Komsomolski prospect, Perm, GSP, 614990, Russian Federation

#### Abstract

One of the criteria for evaluating the reliability of the aviation gas turbine engine housing is their ability to retain broken elements of the rotors and, primarily, the fan blades.

The paper presents the results of numerical simulation of deformation and fracture of the aviation gas turbine engine housing after a high-speed collision with a fan blade at its emergency breakage. Parameters of Johnson-Cook model, describing the behavior of alloys VT6, OT4 and OT4-0, is verified. Comparison with experimental data showed a good agreement for the flying residual velocity of the broken blade and forms of punched holes.

It is shown that depending on the housing material, its thickness and blade breakage velocity, there is a possibility of penetration of the housing by a broken blade and its departure beyond or localization of the broken blade inside the housing.

#### Keywords:

deformation, fracture, strain rate, plasticity, LS-DYNA, Johnson-Cook model.

#### References

1. Akimov B.M. *Osnovy nadezhnosti gazoturbinnnykh dvigatelei* [Fundamentals of reliability of gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 207 p.

2. Birger I.A., Balashov B.F., Dul'nev R.A. *Konstruktсионnaya prochnost' materialov i detalei GTD* [The structural strength of materials and components of gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 222 p.
3. Petukhov A.N. *Soprotivlenie ustalosti detalei GTD* [Fatigue resistance of gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 240 p.
4. Federal Aviation Administration. Airworthiness Standards: Aircraft Engine Standards for Engine Life-Limited Parts. 14 CFR. Part 33.70. Amdt. 33-22, 72 FR 50860, 2007.
5. European Aviation Safety Agency. Certification Specifications for Engines. CS-E. 2010. 166 p.
6. Nozhnitskii Yu.A. *Normy prochnosti aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei grazhdanskoi aviatsii. 6-e izd.* [Norms strength of aircraft gas turbine engines of civil aviation. 6<sup>th</sup> ed.]. Moscow, CIAM Publ., 2004. 260 p.
7. Karimbaev T.D., Luppov A.A. Issledovanie kinematiki vzaimodeistviya oborvavsheysya lopatki ventilyatora s detalyami i uzlami trakta GTD metodom konechnykh elementov v pakete LS-DYNA [Study the kinematics of the interaction of the fan blades to cut short parts and assemblies tract GTD method of finite element package LS-DYNA]. *Novye tekhnologicheskie protsessy i nadezhnost' GTD – New processes and reliability of gas turbine engines*, 2008, iss. 8, pp. 85–96.
8. Gladkii I.L. Issledovanie posledovatel'nosti obryva lopatok GTD metodom konechnykh elementov [Studies have consistently break of gas turbine engines blades by finite element method]. *Vestnik PGTU. Dinamika i prochnost' mashin – Bulletin Perm State Technical University. Dynamics and strength of machines*, 2003, no. 4, pp. 125–130.
9. Shmotin Yu.N., Ryabov A.A., Gabov D.V., Kukanov S.S. Chislennoe modelirovanie obryva lopatki ventilyatora [Numerical simulation of breakage the fan blade]. *Aviatsionnaya i kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace Engineering and Technology*, 2005, no. 9 (25), pp. 63–67.
10. Gladkiy I.L., Berezin R.I. Eksperimental'noe opredelenie stoikosti k udarnomu vozdeistviyu materialov, primenyayushchikhsya v korpusakh ventilyatorov gazoturbinnnykh dvigatelei [Experimental determination of durability to shock impact of materials, which were applied in fans cases of gas-turbine engines]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk – Bulletin Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 4-5, pp. 1359–1362.
11. LS-DYNA Keyword User's Manual, LSTC, Version R7.0. Livermore, CA. vol. I-II, 2013.
12. Johnson G.R., Cook W.H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains. High Strain Rates and High Temperatures. *The International Symposium on Ballistics*, 1983, pp. 541–547.
13. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, vol. 21, iss. 1, pp. 31–48. doi: 10.1016/0013-7944(85)90052-9
14. Hallquist J.O. LS-DYNA: Theoretical manual. Livermore, California, Livermore Software Technology Corporation, 1998. 498 p.
15. Kraus E.I., Shabalin I.I. Impact loading of a space nuclear powerplant. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2013, vol. 24, pp. 138–150. doi: 10.3221/IGF-ESIS.24.15
16. Kraus E.I., Fomin V.M., Shabalin I.I. Opredelenie modulya sdviga za frontom sil'noi udarnoi volny [Calculation of Shear Modulus Behind Shock Wave]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye" – Bulletin of the South Ural State University. Series "Mathematical Modelling, Programming & Computer Software"*, 2014, vol. 7, no. 1, pp. 49–61. doi: 10.14529/mmp140105
17. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoistva: Spravochnik* [Titanium Alloys. Composition, Structure, Properties. Reference book]. Moscow, VILS-MATI, 2009. 520 p.
18. Buzyurkin A.E., Gladkii I.L., Kraus E.I. [Application of numerical simulation to determine the parameters of the model and verification Johnson-Cook at high-speed deformation of titanium alloys]. *Sbornik materialov III Vserossiiskoi konferentsii "Deformirovanie i razrushenie strukturno-neodnorodnykh sred i konstruktсии" posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika Yu.N. Rabotnova* [Proceeding of the 3<sup>rd</sup> National Conference "Deformation and fracture of structurally inhomogeneous medium and constructions" on the 100th anniversary of the birth of Academician Yu.N. Rabotnova]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2014, p. 17.
19. Steinberg D.J. Equation of State and Strength Properties of Selected Materials. Livermore, Lawrence Livermore National Laboratories, UCRL-MA-106439, 1996.

Received 01 September 2014

Revised 19 September 2014

Accepted 25 September 2014

# ОЦЕНКА СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ

*М.Г. ПЕТРОВ, канд. техн. наук  
(ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина»,  
г. Новосибирск)*

Поступила 03 сентября 2014  
Рецензирование 18 сентября 2014  
Принята к печати 25 сентября 2014

**Петров М.Г** – 630051, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21,  
ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина»,  
e-mail: markp@risp.ru

Исследована кинетика разрушения однонаправленного стеклопластика при циклическом продольном изгибе. В процессе разрушения структурное состояние композита определяется по изменениям его жесткости и неупругости. Изменения жесткости свидетельствуют о появляющихся повреждениях как на стадии расслоения композита, так и во время разрыва волокон. Амплитудная зависимость неупругости связана с распределением внутренних напряжений по объему материала. Она характеризует состояние структуры материала по мере развития в нем повреждений. По изменениям этих характеристик делается вывод о стадиях процесса разрушения композита и возможностях прогнозирования его долговечности.

**Ключевые слова:** композиционный материал, продольный изгиб, жесткость, неупругие деформации, разрушение, долговечность.

## Введение

Любой материал является структурно-неоднородной средой. Структурное состояние материала можно количественно отобразить в виде поля внутренних напряжений. При нагружении материала в результате высоких внутренних напряжений, возникающих в структуре материала под нагрузкой, происходят локальные пластические деформации, в результате которых появляется неупругость. Амплитудная зависимость неупругости связана, таким образом, с неоднородностью структуры материала и тем самым является характеристикой его структурного состояния.

В композиционных материалах (КМ), как и в металлических сплавах или полимерах, наблюдаются те же типы неупругих деформаций. При малых амплитудах нагружения всегда присутствует неупругость релаксационного типа, проявляющаяся в виде отставания деформации

от напряжений во времени и связанная с вязким течением материала в локальных объемах. При увеличении амплитуды нагружения появляется гистерезисный тип неупругости, вызванный пластическим течением в локальных объемах твердого тела. Каждый тип неупругости имеет свои амплитудные, частотные и температурные зависимости, по которым можно установить их природу. На рис. 1–3 приведены амплитудные зависимости раскрытия петли неупругости для стали, полиметилметакрилата (ПММА) и боропластика, иллюстрирующие сходство этих характеристик у материалов различного вида.

Вязкое и пластическое течения отличаются тем, что энергия активации процесса в первом случае не зависит [1], а во втором зависит [2] от напряжений. Каждый тип неупругости может быть воспроизведен в расчетах соответствующими реологическими моделями, содержащими соответственно тела вязкого или пластического течения [1, 3].

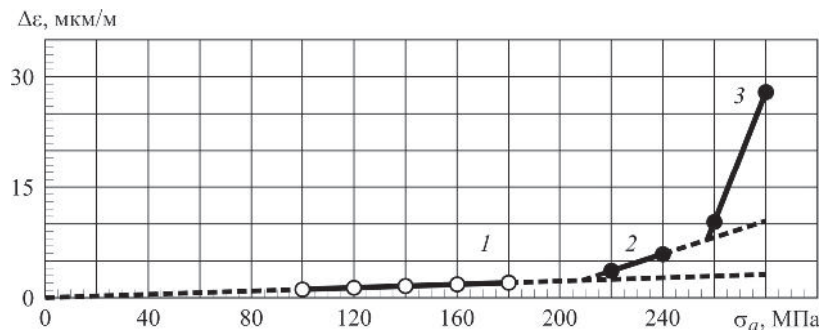


Рис. 1. Амплитудная зависимость раскрытия петли неупругости стали 09Г2С, вычисленная по тепловому эффекту циклического деформирования:

1 – при неупругости релаксационного типа; 2, 3 – при добавлении неупругих деформаций, связанных с локальным пластическим течением

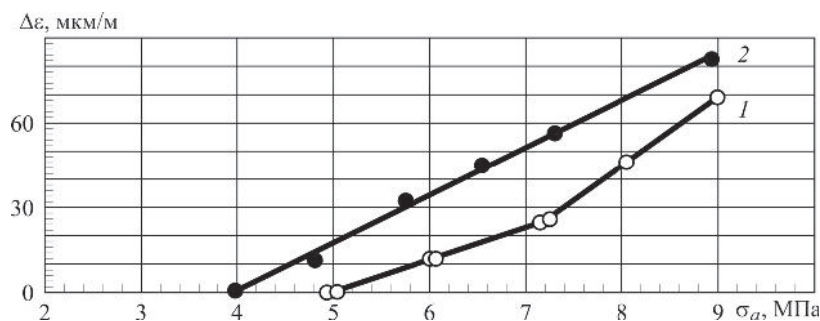


Рис. 2. Амплитудная зависимость гистерезисной части раскрытия петли неупругости ПММА, вычисленная по тепловому эффекту циклического деформирования:

1 – в исходном состоянии материала; 2 – после термомеханического нагружения при испытаниях изделия

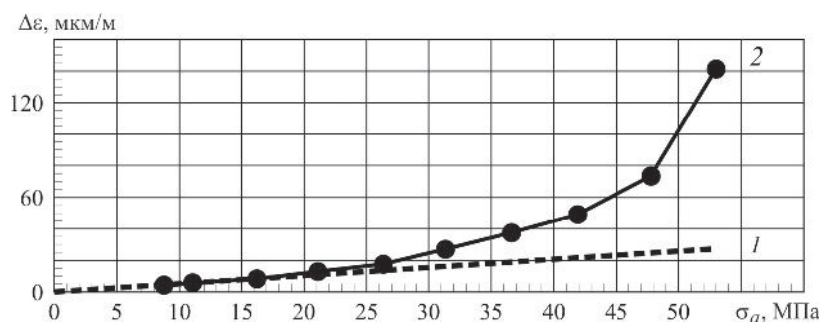


Рис. 3. Амплитудная зависимость раскрытия петли неупругости боропластика:

1 – при неупругости релаксационного типа; 2 – при добавлении неупругих деформаций гистерезисного типа

В процессе разрушения материала неупругие деформации изменяются, так как развивающиеся повреждения становятся объектами его структуры. Величина этих изменений зависит от концентрации и вида повреждений, что, в свою очередь, связано с величиной напряжений,

температурой, длительностью и характером нагружения. Кроме того, и исходная структура материала в зависимости от условий нагружения может претерпевать изменения. Например, пластическая деформация приводит к увеличению неупругости обоих типов при тех же амплитудах



напряжений и снижению амплитуды появления пластического гистерезиса (сталь 30Х, [4]). Такая же картина наблюдается и у ПММА после термомеханического нагружения (рис. 2). Это снижение свидетельствует об увеличении внутренних напряжений, от которых возникают микропластические деформации, приводящие к усталостному разрушению [5, 6]. Появление повреждений снижает и жесткость материала, по изменению которой можно судить об их накоплении [7]. При усталостном же разрушении, когда концентрация повреждений не столь велика, изменение неупругих деформаций, например металлических сплавов, в результате приобретаемых повреждений трудно отделить от других причин [8]. В этом случае, а также во всех других, когда требуется разделить изменение структурного состояния материала и долю израсходованного материалом ресурса долговечности, только с помощью испытаний на остаточную долговечность со специальной процедурой обработки полученных данных можно получить однозначную оценку произошедших изменений [7].

Разрушение КМ как конструкции, состоящей из различных материалов и дополнительно характеризующейся прочностными свойствами адгезионных контактов между ними, имеет свои особенности. В процессе разрушения в нем сначала появляются расслоения, а позднее – разрывы волокон [9]. Это заметно изменяет жесткость КМ и величину его неупругих деформаций. Кроме увеличения раскрытия петель неупругости наблюдаются также их искривления, не симметричные относительно средних значений напряжений. Искривления тем больше, чем меньше уровень напряжений. Анализ кинетики деформирования свидетельствует об участии сил трения при относительных перемещениях разорванных пучков волокон. Степень поврежденности КМ как переход в некоторое другое структурное состояние можно, таким образом, оценивать по изменению его неупругих характеристик, а долговечность – по скорости изменения жесткости, связанной с началом разрывов волокон.

### Методика экспериментального исследования

Изменение структурного состояния КМ в процессе разрушения в большей мере обнаруживает себя при изгибных деформациях или дефор-

мациях кручения, поскольку в этом случае свойства связующего и его адгезионного контакта с волокном играют основную роль. Такие схемы нагружения КМ предпочтительны для процедур диагностики их поврежденности. Поэтому для экспериментального исследования был выбран метод продольного изгиба, при котором небольшими усилиями можно получить значительную величину изгибающего момента, не создавая контактных напряжений в зонах его разрушения. Усилия и перемещения при этом могут быть измерены с весьма малыми погрешностями. А имея теоретическое решение задачи продольного изгиба упругого стержня [10] и сопоставляя с ним экспериментальные данные реального КМ, можно анализировать кинетику его разрушения.

Проведены испытания стержней однонаправленного стеклопластика диаметром 5,5 (длина 350 мм) и 7,5 мм (длина 400 мм) циклическим продольным изгибом на машине MTS-10. Стержни устанавливались на шарнирные опоры, оси поворота которых совпадали с торцевыми поверхностями стержней. Для измерения сил на неподвижный захват испытательной машины устанавливался датчик силы, откалиброванный образцовыми грузами в диапазоне 0...100 кгс. Подвижный захват крепился к штоку гидроцилиндра испытательной машины. Нагружение осуществлялось по перемещению с погрешностью 0,01 мм.

Испытания проводились при постоянном среднем значении перемещения подвижной опоры относительно неподвижной и нескольких значениях амплитуды перемещения с частотой 1 Гц. Во время испытаний измерялись максимальные и минимальные значения силы сжатия стержней, величина которой пропорциональна их усредненной изгибной жесткости. Неупругие деформации периодически оценивались по наибольшей разности между значениями сил в цикле нагружение – разгрузка. Измерение неупругости проводилось при постоянном минимальном значении перемещения 2 мм на частоте 0,1 Гц, чтобы избежать динамических эффектов.

### Результаты и обсуждение

Пробные испытания стержней  $\varnothing 7,5 \times 400$  мм показали, что изменение жесткости в процессе наработки циклическим изгибом имеет харак-

терные периоды. Исследования были продолжены, и на рис. 4 в качестве примера показаны изменения усилия сжатия стержней, нагружаемых по перемещению при относительном сближении их концов  $30 \pm 25$  мм.

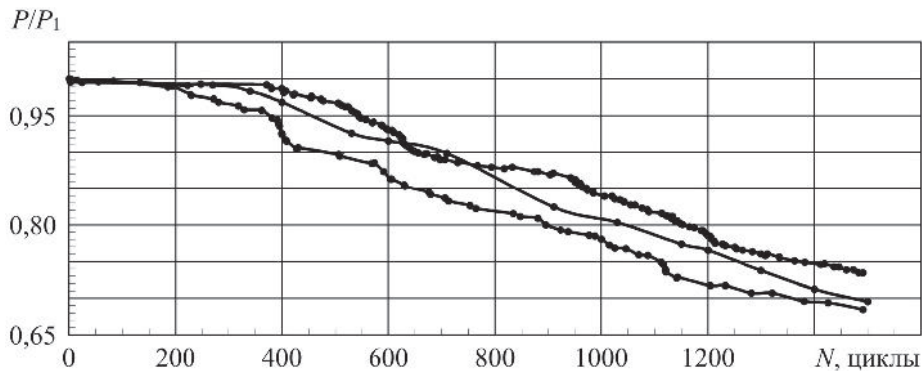


Рис. 4. Изменение максимального усилия сжатия стержней  $\varnothing 7,5 \times 400$  мм относительно первого цикла при нагружении их продольным изгибом с постоянным размахом перемещений  $\Delta h = 30 \pm 25$  мм (частота 1 Гц)

В начальный период нагружения наблюдается медленное падение жесткости. У отдельных образцов она может на некоторое время даже несколько возрасти. Далее следует более быстрое падение жесткости, индивидуально проявляющееся у каждого образца. Такое поведение КМ согласуется с данными исследования кинетики разрушения композита – полагают, что начальный период разрушения связан с накоплением расслоений [9]. Для однонаправленного стеклопластика это не вызывает существенных изменений демпфирующих характеристик, так как повреждения ориентированы вдоль действующих напряжений. Измерения же раскрытия петли неупругости, проведенные после каждого резкого изменения жесткости образца, показывают очередную прирост неупругих деформаций.

Для образцов  $\varnothing 5,5 \times 350$  мм были получены и проанализированы амплитудные зависимости раскрытия петли неупругости. Испытания проведены со ступенчатым нарастанием размаха перемещений от 6 мм до максимального 48 мм при постоянном минимальном значении перемещения 2 мм. Такой режим выбран потому, что неупругие деформации более выражены

при малых значениях изгибающего момента. Измерения выполнялись в начале испытаний и после наработки 4000 циклов при  $\Delta h = 26 \pm 20$  мм на частоте 1 Гц, когда скорость падения жесткости увеличилась. На рис. 5 показаны полученные зависимости как максимумы разности усилий сжатия при нагружении и разгрузке от максимумов размаха изгибных деформаций, демонстрирующие существенное изменение неупругости в период прогрессирующего разрушения. Изменился и характер амплитудной зависимости неупругости. Для удаления погрешностей измерений, связанных с закреплением стержней, зависимости смещены по оси ординат на величину сил

трения в шарнирных опорах. Все испытания и измерения проведены при температуре  $290 \pm 2$  К. В исходном состоянии наблюдается обычная амплитудная зависимость неупругих деформаций материала с прогрессирующим их нарастанием. Она изменяется незначительно в период от начала нагружения до момента перелома в скорости снижения изгибной жесткости образца. Далее при более быстром снижении жесткости, периодически сопровождающемся резкими (иногда скачкообразными) ее изменениями, происходит увеличение неупругих деформаций образца и изменяется вид их амплитудной зависимости. При больших амплитудах нагружения неупругость практически не изменяется. Причиной этого, по-видимому, являются силы трения, возникающие при относительном перемещении

в шарнирных опорах. Все испытания и измерения проведены при температуре  $290 \pm 2$  К.

В исходном состоянии наблюдается обычная амплитудная зависимость неупругих деформаций материала с прогрессирующим их нарастанием. Она изменяется незначительно в период от начала нагружения до момента перелома в скорости снижения изгибной жесткости образца. Далее при более быстром снижении жесткости, периодически сопровождающемся резкими (иногда скачкообразными) ее изменениями, происходит увеличение неупругих деформаций образца и изменяется вид их амплитудной зависимости. При больших амплитудах нагружения неупругость практически не изменяется. Причиной этого, по-видимому, являются силы трения, возникающие при относительном перемещении

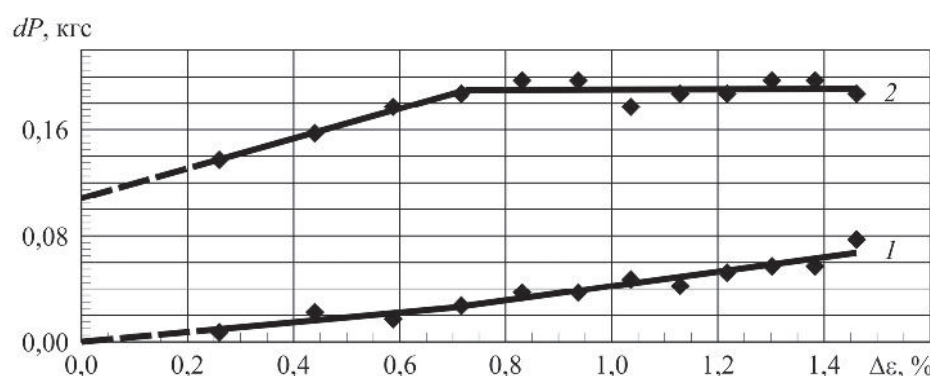


Рис. 5. Амплитудная зависимость неупругости стержней  $\varnothing 5,5 \times 350$  мм в начальный период (1) и после 4000 циклов нагружения их продольным изгибом с постоянным размахом перемещений  $\Delta h = 26 \pm 20$  мм (2)

разорванных пучков волокон, на фоне которых оставшая часть неупругих деформаций не выявляется. В момент деформирования стержня этот процесс можно наблюдать оптическими средствами при небольших увеличениях.

Особенности поведения КМ как конструкции, долговечность которой определяется последовательностью разрушения ее элементов, требуют для таких материалов сформулировать принципы решения задач прогнозирования их долговечности. При прогнозировании долговечности металлических сплавов, зная неупругие деформации, измеренные в цикле нагружения, и число циклов, прошедшее за время разрушения, можно связать во времени деформационные процессы с накоплением в материале повреждений. Определив эту связь в базовом эксперименте, через реологические модели твердого тела можно перейти затем к произвольному температурно-силовому нагружению [11]. При этом под долговечностью понимается время от начала приложения нагрузки до появления трещины. Далее требуется специальный расчет периода ее распространения.

Приведенные экспериментальные данные испытаний стеклопластика позволяют использовать подобные же принципы для прогнозирования долговечности КМ. Если за долговечность принять момент времени, когда начинаются разрывы волокон, то аналогичным образом, связывая неупругие деформации КМ со временем обнаружения этих разрывов, получаем ту же методологию прогнозирования долговечности. Время обнаружения разрывов волокон определяем по характерным изменениям скорости падения жесткости КМ или его неупругих деформаций.

Также проведены испытания на долговечность стержней  $\varnothing 7,5 \times 400$  мм при различных амплитудах перемещений с частотой 1 Гц и постоянным средним значением перемещения 30 мм. Во время испытаний регистрировались максимумы и минимумы усилий сжатия стержней в каждом цикле нагружения. По характерным переломам в их зависимостях от числа циклов наработки (см. рис. 4) определялась долговечность каждого образца. В результате получилась зави-

симость долговечности от максимальных значений размаха изгибных деформаций на контуре сечения образцов. Деформации вычислялись на основании зависимости прогиба и усилия сжатия от величины перемещения свободного конца образца как идеально упругого стержня [10]. При этом максимум изгибной деформации на контуре стержня примерно пропорционален корню квадратному из величины относительно перемещения:  $\varepsilon \sim (\Delta h/L)^{0,5}$ , где  $L$  – длина стержня [2]. На рис. 6 изображены полученные данные о долговечности стеклопластика в этих условиях.

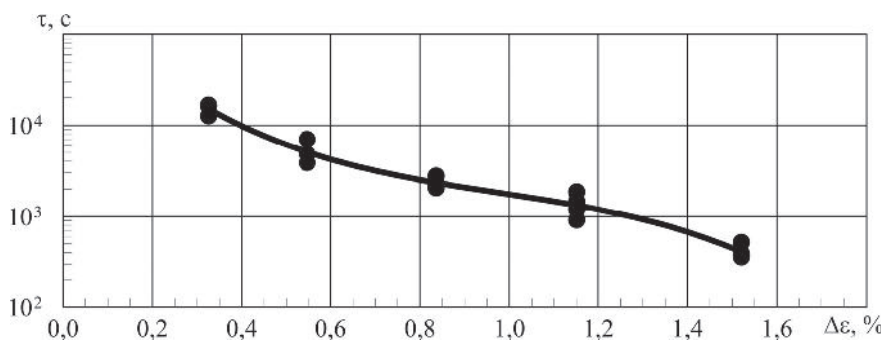


Рис. 6. Зависимость долговечности стержней  $\varnothing 7,5 \times 400$  мм от максимума размаха изгибных деформаций при нагружении их продольным изгибом с постоянным средним значением перемещения  $\Delta h = 30$  мм ( $\varepsilon = 1,57$  %). Частота нагружения 1 Гц, температура  $290 \pm 2$  К

Вид изображенной кривой аналогичен кривым усталостной долговечности, получаемым для металлических сплавов. Когда размах деформаций при циклическом нагружении стремится к нулю, долговечность определяется средним значением деформации, которая может быть пересчитана в условные напряжения [2]. При этом модуль упругости может быть определен по кривой статического нагружения на продольный изгиб, принимая в расчет его максимальную установившуюся величину, вычисленную по изгибной жесткости на основе теоретического решения [10].

## Выводы

Амплитудная зависимость раскрытия петли неупругости является отражением поля внутренних напряжений, возникающих при нагружении твердого тела, и характеризует его структурное состояние. Изменения неупругости в процессе разрушения КМ свидетельствуют о кинетике процесса и позволяют оценить особенности его протекания.

Оценивая долговечность КМ по началу прироста его неупругости или изменению скорости снижения жесткости, можно применять те же методы прогнозирования их долговечности, которые используются для металлических материалов при определении времени появления трещины. Дальнейшее описание хода процесса разрушения КМ является самостоятельной задачей, аналогичной задаче прогнозирования периода распространения трещины в металлах и сплавах.

### Список литературы

1. Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах: пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.
2. Петров М.Г. Анализ прочности и долговечности однонаправленного стеклопластика с позиций кинетической концепции разрушения // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2003. – Т. 9, № 3. – С. 376–397.
3. Петров М.Г. Некоторые структурные модели для описания реологических свойств материалов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – Т. 13, № 2. – С. 191–208.
4. Petrov M.G. Some methods of analysis and diagnostics of structure and properties of materials produced under various technological processes // XIV International conference on the methods of aerophysical research: Proceedings of Section V “Interdisciplinary problems and advanced technologies” (Novosibirsk, June 30–July 06, 2008). – Novosibirsk, 2008. – Paper N 24. – P. 1–9.
5. О причинах снижения долговечности полимеров при циклическом нагружении / В.А. Степанов, Ю.А. Никонов, Л.А. Беляева, А.С. Власов // Механика полимеров. – 1976. – № 2. – С. 279–283.
6. Головин С.А., Пушкар А. Микропластичность и усталость металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 240 с.
7. Петров М.Г., Равикович А.И. Накопление повреждений при пластическом деформировании и ползучести алюминиевых сплавов // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47, № 1. – С. 172–182.
8. Троценко В.Т. Усталость и неупругость металлов. – Киев: Наукова думка, 1971. – 268 с.
9. Регель В.Р., Лексовский А.М., Поздняков О.Ф. Изучение кинетики разрушения композиционных материалов // Механика композитных материалов. – 1979. – № 2. – С. 211–216.
10. Kuznetsov V.V., Levyakov S.V. Complete solution of the stability problem for elastica of Euler’s column // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2002. – Vol. 37, iss. 6. – P. 1003–1009. – doi: 10.1016/S0020-7462(00)00114-1.
11. Петров М.Г. Моделирование процесса неупругого деформирования материалов и прогнозирование усталостного разрушения // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сборник материалов Третьей международной конференции (Москва, 12–15 октября 2009 г.). – М., 2009. – Т. 2. – С. 365–366.

## OBRAHOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(65), October – December 2014, Pages 61–67

### Evaluation of the composite materials structural condition during fracture

Petrov M.G., Ph.D. (Engineering), e-mail: markp@risp.ru

Siberian Aeronautical Research Institute named after S.A. Chaplygin, 21, Polzunov st., Novosibirsk, 630051, Russian Federation

#### Abstract

The fracture kinetics of the unidirectional fiberglass under cyclic lateral deflection is studied. During fracture process the composite structural state is determined by the changes in its rigidity and inelasticity. Changes in rigidity indicate the breakages both on the stage of the composite layering, and during a break of the fibers. Amplitude dependence of the inelasticity is related to the distribution of internal stresses in the material volume. It characterizes the state of the material structure as the breakages advances. Changes in these characteristics give opportunity to make a conclusion about the stages of the composite fracture process and predictability of its durability.

#### Keywords:

composite material, lateral deflection, rigidity, inelastic strains, failure, durability.

## References

1. Nowick A.S., Berry B.S. Anelastic relaxation in crystalline solids. New York and London, Academic Press, 1972. 677 p. (Russ. ed.: Novik A., Berri B. *Relaksatsionnye yavleniya v kristallakh*. Moscow, Atomizdat Publ., 1975. 472 p.).
2. Petrov M.G. Analiz prochnosti i dolgovechnosti odnonapravlenogo stekloplastika s pozitsii kineticheskoi kontseptsii razrusheniya [Study of strength and durability of uni-directional fiberglass plastics by using the kinetic concept of fracture]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii – Composite Mechanics and Design*, 2003, vol. 9, no. 3, pp. 376–397. (In Russian)
3. Petrov M.G. Nekotorye strukturnye modeli dlya opisaniya reologicheskikh svoistv materialov [Some structural models for description of rheological properties of materials]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii – Composite Mechanics and Design*, 2007, vol. 13, no. 2, pp. 191–208. (In Russian)
4. Petrov M.G. Some methods of analysis and diagnostics of structure and properties of materials produced under various technological processes. XIV International conference on the methods of aerophysical research: Proceedings of Section V “Interdisciplinary problems and advanced technologies” (ICMAR 2008). Novosibirsk, 2008, paper no. 24, pp. 1–9.
5. Stepanov V.A., Nikonov Yu.A., Belyaeva L.A., Vlasov A.S. O prichinakh snizheniya dolgovechnosti polimerov pri tsiklicheskom nagruzhenii [Reasons for the lowering of the lifetime of polymers under cyclic loading]. *Mekhanika polimerov – Polymer Mechanics*, 1976, no. 2, pp. 279–283. (In Russian)
6. Golovin S.A., Pushkar A. *Mikroplastichnost' i ustalost' metallov* [Microplasticity and fatigue of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 240 p.
7. Petrov M.G., Ravikovich A.I. Nakoplenie povrezhdenii pri plasticheskom deformirovanii i polzuchesti alyuminievykh splavov [Damage accumulation in aluminum alloys under plastic deformation and creep]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2006, vol. 47, no. 1, pp. 171–182. (In Russian)
8. Troshchenko V.T. *Ustalost' i neuprugost' metallov* [Fatigue and inelasticity of metals]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1971. 268 p.
9. Regel' V.R., Leksovskii A.M., Pozdnyakov O.F. Izuchenie kinetiki razrusheniya kompozitsionnykh materialov [Fracture kinetics of composite materials]. *Mekhanika kompozitnykh materialov – Composite Mechanics and Design*, 1979, no. 2, pp. 211–216. (In Russian)
10. Kuznetsov V.V., Levyakov S.V. Complete solution of the stability problem for elastica of Euler's column. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2002, vol. 37, iss. 6, pp. 1003–1009. doi: 10.1016/S0020-7462(00)00114-1
11. Petrov M.G. [Modeling the process of inelastic deformation of materials and prediction of fatigue failure]. *Sbornik materialov Tret'ei mezhdunarodnoi konferentsii “Deformatsiya i razrushenie materialov i nanomaterialov”* [Proceedings of the III International Conference “Deformation and fracture of materials and nanomaterials”]. Moscow, 2009, vol. 2, pp. 365–366.

Received 03 September 2014

Revised 18 September 2014

Accepted 25 September 2014

# РАСЧЕТ ПЛАСТИН ИЗ УПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ МАТЕРИАЛА, РАЗНОСОПРОТИВЛЯЮЩЕГОСЯ РАСТЯЖЕНИЮ И СЖАТИЮ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

*И. А. БАНЩИКОВА*<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук  
*А.Е. МУРАВЬЁВА*<sup>2</sup>, магистрант НГУ  
*И.Ю. ЦВЕЛОДУБ*<sup>1</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор  
(<sup>1</sup>ИГиЛ СО РАН, г. Новосибирск,  
<sup>2</sup>НГУ, г. Новосибирск)

Поступила 02 октября 2014  
Рецензирование 23 октября 2014  
Принята к печати 03 ноября 2014

**Банщикова И.А.** – 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15,  
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН  
e-mail: binnan@ya.ru

Экспериментальное исследование на растяжение и сжатие образцов при  $T = 195\text{ }^{\circ}\text{C}$  из сплава АК4-1Т, вырезанных из плиты  $h = 45\text{ мм}$ , показало, что сплав обладает свойством упрочнения и является разносопротивляющимся растяжению и сжатию при ползучести. По полученным экспериментальным данным определены константы для степенных зависимостей, описывающих скорости деформаций ползучести. Развита модель, основанная на «трансформированном» пространстве напряжений, учитывающая упрочнение и разносопротивляемость растяжению и сжатию материала при ползучести. Модель протестирована для задачи чистого кручения пластин из сплава АК4-1Т в предположении плоского напряженного состояния. Представлены экспериментальные данные кручения гибких пластин и расчет методом конечных элементов в геометрически нелинейной постановке с использованием констант либо только на растяжение, либо только на сжатие. Экспериментальные значения расположены посередине между соответствующими расчетными линиями, что подтверждает сложные свойства сплава, которые необходимо учитывать в расчетах.

**Ключевые слова:** ползучесть, разносопротивляемость растяжению и сжатию, кручение, изгиб пластин, упрочнение, алюминиевый сплав

## Введение

Большинство современных конструкционных сплавов обладает сложными свойствами при нелинейном деформировании, что необходимо учитывать при проектировании технологических процессов и при прогнозировании прочностного эксплуатационного ресурса конструкций. Для описания деформирования разносопротивляющегося растяжению и сжатию материала в условиях ползучести используются, как правило, либо модели установившейся ползучести, при этом процессы описываются степенными функциями с различными пока-

зателями для растяжения и сжатия [1–4], либо модели неустановившейся ползучести с учетом упрочнения и/или разупрочнения, но в предположении, что эти показатели одинаковы [5–11]. Однако экспериментальные данные для многих сплавов показывают, что при растяжении и сжатии может отличаться не только показатель ползучести установившейся стадии [12], но и показатель, характеризующий упрочнение [13,14].

В настоящей работе развита модель [15] для случая, когда все степенные показатели различны. По экспериментальным данным на одноосное растяжение и сжатие при  $T = 195\text{ }^{\circ}\text{C}$  сплошных круглых образцов из сплава АК4-1Т

(вырезанных из плиты  $h = 45$  мм) определены константы для степенных зависимостей. С использованием полученных констант выполнены расчеты для задачи кручения пластины и проведено сравнение с экспериментальными данными. Все эксперименты были проведены сотрудниками лаборатории статической прочности ИГиЛ СО РАН под руководством Б.В. Горева.

### Экспериментальные исследования

Процесс ползучести при одноосном нагружении довольно хорошо описывается зависимостью типа деформационного упрочнения [16]

$$\dot{\eta} = \dot{\varepsilon}^c = \varepsilon^{-\alpha} B \sigma^n, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – параметр упрочнения;  $B$  и  $n$  – параметры, соответствующие стадии установившейся ползучести.

На рис. 1, *a* и *б* точками 1–3 изображены результаты экспериментов при  $T = 195$  °С на одноосное растяжение при  $\sigma = 280; 310; 320$  МПа и сжатие при  $\sigma = 300; 310; 320$  МПа соответственно сплошных круглых образцов сплава АК4-1Т, вырезанных из плиты  $h = 45$  мм. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что сплав обладает свойством значительного упрочнения. Для определения констант  $\alpha$ ,  $B$  и  $n$  в уравнении (1) воспользуемся аналогичной методикой, представленной в работах [17, 18].

Проинтегрируем и далее прологарифмируем (1), предположив, что  $\sigma = \text{const}$ :

$$\ln(\varepsilon^c) = \frac{1}{1 + \alpha} \ln t + \frac{1}{1 + \alpha} \ln((\alpha + 1) B \sigma^n) \text{ при } \sigma = \text{const}. \quad (2)$$

На рис. 2, *a* и *б* нанесены те же экспериментальные данные, соответствующие начальным упрочняющимся участкам в логарифмических координатах. Используя метод наименьших квадратов, определим угол наклона  $1 / (1 + \alpha)$  в (2) для каждой из линий. После усреднения определим  $\alpha_1 = 1,3$  для растяжения и  $\alpha_2 = 1,64$  для сжатия.

Для нахождения констант  $B$  и  $n$  проинтегрируем (1) при  $\sigma = \text{const}$  от  $t_a$  до  $t_b$  и далее прологарифмируем полученное выражение

$$\ln \Delta \varepsilon^c = \ln B + n \ln \sigma. \quad (3)$$

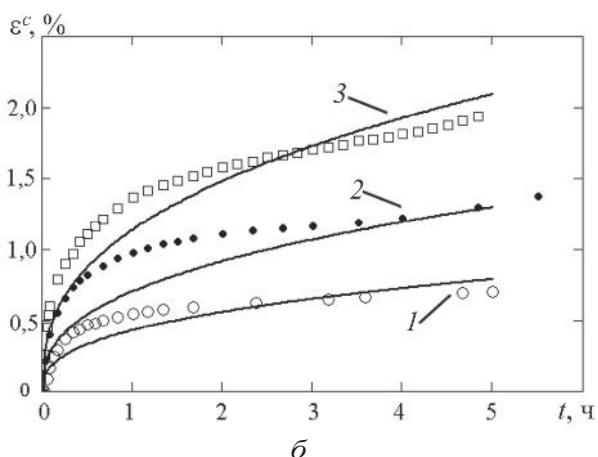
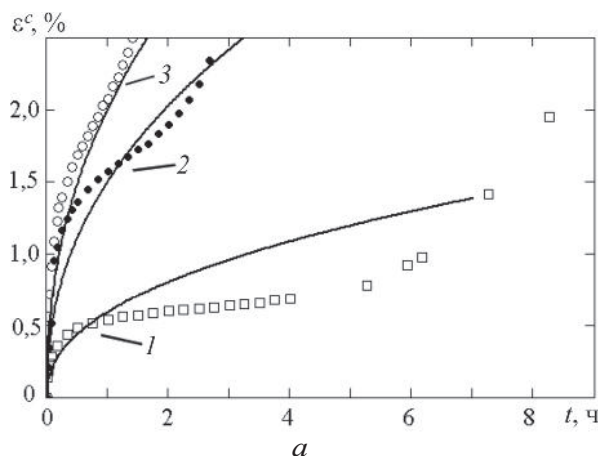


Рис. 1. Данные экспериментов (точки) и аппроксимационные кривые при одноосном растяжении (*a*) и сжатии (*б*) образцов из сплава АК4-1Т при  $T = 195$  °С.

Здесь  $\Delta \varepsilon^c = \frac{(\varepsilon_a^c)^{\alpha+1} - (\varepsilon_b^c)^{\alpha+1}}{(\alpha + 1)(t_a - t_b)}$ , где  $t_a$  и  $t_b$  – время

начала и конца установившейся стадии;  $\varepsilon_a^c, \varepsilon_b^c$  – соответствующие деформации. Точки 1 и 2 на рис. 2, *в* – экспериментальные зависимости  $\ln \Delta \varepsilon^c$  от  $\ln \sigma$  для установившихся участков при растяжении и сжатии. Из уравнения (3) по углу наклона определяются константы  $B$  и  $n$ . Таким образом, для скоростей деформаций ползучести сплава АК4-1Т при  $T = 195$  °С получены следующие константы:

$$\frac{d\varepsilon^c}{dt} = \frac{B_1 \sigma^{n_1}}{(\varepsilon^c)^{\alpha_1}}, \quad (4)$$

$$B_1 = 3,7 \cdot 10^{-61} (\text{МПа}/\text{м}^2)^{-n_1} \text{ с}^{-1},$$

$$n_1 = 21, \alpha_1 = 1,3 \text{ при } \sigma > 0,$$

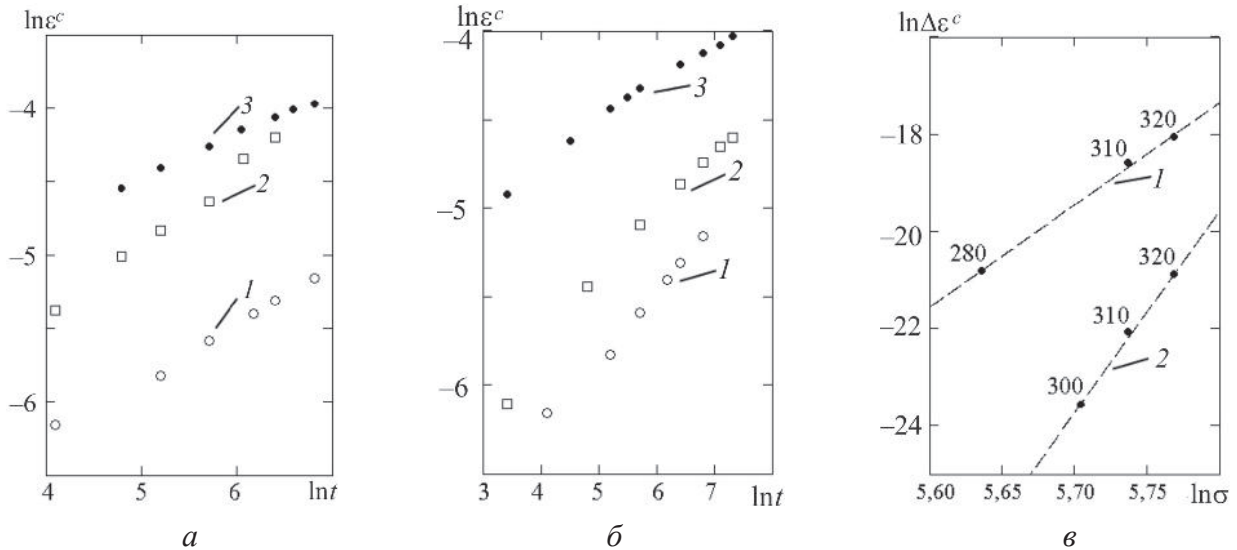


Рис. 2. Экспериментальная зависимость  $\ln \varepsilon^c$  от  $\ln t$  для определения  $\alpha$  при растяжении  $\sigma = 280; 310; 320$  МПа (а) и сжатии  $\sigma = 300; 310; 320$  МПа (б); линии 1, 2 – зависимости  $\ln \Delta \varepsilon^c$  от  $\ln \sigma$  для определения  $B, n$  при растяжении и сжатии соответственно (в)

$$\frac{d\varepsilon^c}{dt} = \frac{B_2 \sigma^{n_2}}{(\varepsilon^c)^{\alpha_2}},$$

$$B_2 = 4,8 \cdot 10^{-110} (\text{МПа}/\text{М}^2)^{-n_2} \text{с}^{-1}, \quad (5)$$

$$n_2 = 40, \alpha_2 = 1,64 \text{ при } \sigma < 0.$$

Сплошными линиями на рис. 1, а и б изображены кривые, аппроксимирующие экспериментальные данные по формулам с константами (4) и (5).

### Теория и методы

Для построения модели упрочняющегося и разносопротивляющегося при растяжении и сжатии материала используется методика, основанная на «трансформированном» пространстве напряжений [15].

При описании процесса ползучести изотропных материалов с одинаковыми свойствами на растяжение и сжатие исходят из гипотезы существования связи между интенсивностью скоростей деформаций ползучести и интенсивностью напряжений  $\dot{\varepsilon}_i^c = f(\varepsilon_i^c, \sigma_i) \sigma_i$ ,  $\sigma_i = \left(3\bar{\sigma}_{kl}\bar{\sigma}_{kl}/2\right)^{0.5}$  – интенсивность напряжений;  $\bar{\sigma}_{kl}$  – компоненты девиатора напряжений;  $\dot{\varepsilon}_i^c$  – интенсивность скоростей деформаций ползучести. Обобщая на случай сложного напряженного состояния, имеем

$$\dot{\varepsilon}_i^c = f_1(\varepsilon_i^c, \sigma_i) \sigma_i, \quad \dot{\varepsilon}_k^c = \lambda_1 \bar{\sigma}_k, \quad (6)$$

когда все  $\sigma_k \geq 0$ ,

$$\dot{\varepsilon}_i^c = f_2(\varepsilon_i^c, \sigma_i) \sigma_i, \quad \dot{\varepsilon}_k^c = \lambda_2 \bar{\sigma}_k, \quad (7)$$

когда все  $\sigma_k \leq 0$ ,

где  $\bar{\sigma}_k$  – компоненты девиатора напряжений в главных осях ( $k = 1, 2, 3$ );  $\lambda_1, \lambda_2$  выражаются через  $f_1, f_2$ . В пространстве главных напряжений поверхность  $\varepsilon_i^c = \text{const}$  состоит из двух областей в виде соосных цилиндров, где все главные напряжения положительны и соответственно отрицательны. Для переходной области, в которой главные напряжения разных знаков, рассмотрим «трансформированное» пространство напряжений

$$\Sigma_k^1 = \left\{ \begin{array}{ll} \sigma_k, & \sigma_k > 0 \\ \mu_1 \sigma_k & \sigma_k \leq 0 \end{array} \right\}, \quad k = 1, 2, 3, \quad (8)$$

$\mu_1 > 0$  – некоторая функция главных напряжений, которая выбирается таким образом, чтобы в «трансформированном» пространстве поверхности  $\varepsilon_i^c = \text{const}$  обеих областей первого рода перешли в соосные цилиндры одинакового радиуса. В этом пространстве предполагается справедливой теория течения типа Мизеса. Таким образом, из (6) для любой области имеем



$$\dot{\varepsilon}_i^c = f_1(\varepsilon_i^c, \Sigma_i^1) \Sigma_i^1, \dot{\varepsilon}_k^c = \lambda_1 \bar{\Sigma}_k^1, \quad k = 1, 2, 3, \quad (9)$$

где  $\Sigma_i^1$  – интенсивность «трансформированных» напряжений;  $\bar{\Sigma}_k^1$  – компоненты девиатора «трансформированных» напряжений. При всестороннем сжатии при  $\sigma_k \leq 0$  имеем (7), но, с другой стороны, из (9)  $\dot{\varepsilon}_i^c = f_1(\varepsilon_i^c, \mu_1 \sigma_i) \mu_1 \sigma_i$ . Приравнивая оба выражения, получим

$$f_2(\varepsilon_i^c, \sigma_i) = f_1(\varepsilon_i^c, \mu_1 \sigma_i) \mu_1. \quad (10)$$

Аналогичные соотношения можно получить для констант сжатия:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_i^c &= f_2(\varepsilon_i^c, \Sigma_i^2) \Sigma_i^2, \dot{\varepsilon}_k^c = \lambda_2 \bar{\Sigma}_k^2, \\ \Sigma_k^2 &= \begin{cases} \mu_2 \sigma_k, & \sigma_k > 0 \\ \sigma_k & \sigma_k \leq 0 \end{cases}, \quad (k = 1, 2, 3), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\Sigma_i^2$  – интенсивность и  $\bar{\Sigma}_k^2$  – компоненты девиатора новых «трансформированных» напряжений. Подобно (10)

$$f_1(\varepsilon_i^c, \sigma_i) = f_2(\varepsilon_i^c, \mu_2 \sigma_i) \mu_2. \quad (12)$$

Переходя от пространств  $\Sigma_k^1, \Sigma_k^2$  к пространству главных напряжений  $\sigma_k$ , будем иметь две поверхности одной и той же интенсивности, соответствующие (9) и (11), которые совпадают только в области первого рода, а в переходных областях описывают два разных процесса, поэтому определять (10) и (12) только как функции от  $\sigma_i$  нельзя. Требуя эквивалентности, получаем соотношения

$$\mu_1 \mu_2 = 1, \quad \Sigma_k^1 = \mu_1 \Sigma_k^2, \quad \Sigma_k^2 = \mu_2 \Sigma_k^1,$$

$$\Sigma_i^1 = \mu_1 \Sigma_i^2, \quad \Sigma_i^2 = \mu_2 \Sigma_i^1.$$

Равенства (10) и (12) переписутся в виде

$$\begin{aligned} \mu_1 f_1(\varepsilon_i^c, \Sigma_i^1) &= f_2\left(\varepsilon_i^c, \frac{\Sigma_i^1}{\mu_1}\right), \\ \mu_2 f_2(\varepsilon_i^c, \Sigma_i^2) &= f_1\left(\varepsilon_i^c, \frac{\Sigma_i^2}{\mu_2}\right). \end{aligned} \quad (13)$$

Учитывая (4) и (5), из (13) определим

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \left(\frac{B_2}{B_1}\right)^{\frac{1}{n_2}} (\Sigma_i^1)^{\frac{n_2-n_1}{n_2}} (\varepsilon_i^c)^{\frac{\alpha_1-\alpha_2}{n_2}}, \\ \mu_2 &= \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{\frac{1}{n_1}} (\Sigma_i^2)^{\frac{n_1-n_2}{n_1}} (\varepsilon_i^c)^{\frac{\alpha_2-\alpha_1}{n_1}}. \end{aligned} \quad (14)$$

В качестве примера применимости изложенной выше модели рассматривается задача чистого кручения квадратных пластин в предположении плоского напряженного состояния, т. е. когда напряжение по нормали  $\sigma_{33} = 0$ . Предполагается также, что прогиб не превосходит половину толщины пластины. Экспериментально кручение пластины внешним скручивающим моментом  $M_{12} = M$  можно реализовать путем приложения четырех сил величиной  $2M$  в углах [19, 20]. На рис. 3, а и б изображены схема кручения в главных осях и пластина из сплава АК4-1Т после двух часов эксперимента при  $T = 195^\circ\text{C}$ . Задача чистого кручения квадратной пластины в седлообразную поверхность внешним скручивающим моментом  $M_{12}$  эквивалентна задаче изгиба пластины равномерно

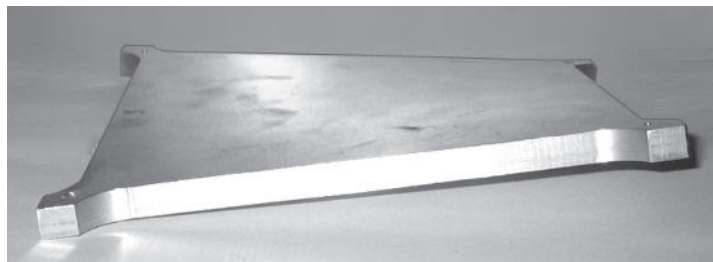
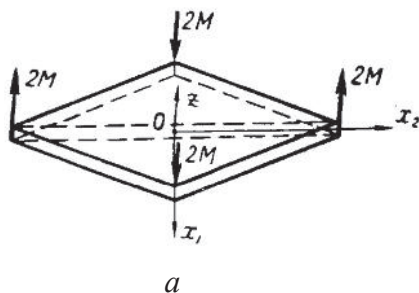


Рис. 3. Схема кручения квадратной пластины (а); пластина из сплава АК4-1Т после двух часов эксперимента при  $T = 195^\circ\text{C}$  (б)

распределенными моментами разных знаков  $M_1 = -M_2 = M$ , приложенными в двух взаимно-перпендикулярных направлениях вдоль диагоналей [21]. Предполагается, что в начальный момент пластина деформируется упруго и поверхности изгиба совпадают со срединной поверхностью.

С учетом гипотезы прямых нормалей для полных деформаций в главных осях имеем систему уравнений:

$$(\sigma_1 - \nu\sigma_2) / E + \varepsilon_1^c = k_1(z + \delta_1), \quad (15)$$

$$(\sigma_2 - \nu\sigma_1) / E + \varepsilon_2^c = k_2(z + \delta_2). \quad (16)$$

Здесь  $k_i$  – главные кривизны;  $-h/2 \leq z \leq h/2$ ,  $\delta_i$  – смещения нейтральных поверхностей изгиба от срединной поверхности вследствие разносопротивляемости материала при растяжении и сжатии при ползучести. На нейтральных поверхностях изгиба одно из главных напряжений обращается в нуль. Модуль упругости одинаков при растяжении и сжатии и равен  $E = 59\,000$  МПа/м<sup>2</sup>, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,4$ . Интегральные

уравнения для моментов  $M_1 = \int_{-h/2}^{h/2} (z + \delta_1)\sigma_1 dz$ ,

$$M_2 = \int_{-h/2}^{h/2} (z + \delta_2)\sigma_2 dz. \quad \text{Поскольку задача}$$

асимметрична, то  $\varepsilon_1^c(z) = \varepsilon_2^c(-z) = \varepsilon^c(z)$ ,  $\delta_1 = -\delta_2 = \delta$ ,  $k_1 = -k_2 = k$ ,  $\sigma_1(z) = \sigma_2(-z) = \sigma(z)$ ,  $M_1 = -M_2 = M$ .

После ряда преобразований (15) и (16), интегрирования по толщине пластины, а также с учетом того, что  $\int_{-h/2}^{h/2} \sigma dz = 0$ , определяются кривизна, смещение и напряжение:

$$k = \frac{\left( \frac{M(1+\nu)}{E} + \int_{-h/2}^{h/2} \varepsilon^c(z)(z + \delta) dz \right)}{\left( \frac{h^3}{12} + \delta^2 h \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \right)}, \quad (17)$$

$$\delta = \frac{(1-\nu)}{kh(1+\nu)} \int_{-h/2}^{h/2} \varepsilon^c(z) dz, \quad (18)$$

$$\sigma = \frac{E \left( \begin{matrix} k(z + \delta) - \nu k(z - \delta) - \\ -\varepsilon^c(z) - \nu \varepsilon^c(-z) \end{matrix} \right)}{(1-\nu^2)}. \quad (19)$$

Скорости деформаций ползучести (9)

$$\frac{d\varepsilon_1^c}{dt} = \frac{1}{2} \frac{B_1(\Sigma_i)^{n_1-1}}{(\varepsilon_i^c)^{\alpha_1}} (2\Sigma_1(z) - \Sigma_2(z)),$$

$$\frac{d\varepsilon_2^c}{dt} = \frac{1}{2} \frac{B_1(\Sigma_i)^{n_1-1}}{(\varepsilon_i^c)^{\alpha_1}} (2\Sigma_2(z) - \Sigma_1(z)), \quad (20)$$

где  $\Sigma_k$  – трансформированное пространство (8),

$$\Sigma_i = \left( (\Sigma_1(z))^2 + (\Sigma_2(z))^2 - \Sigma_1(z)\Sigma_2(z) \right)^{1/2},$$

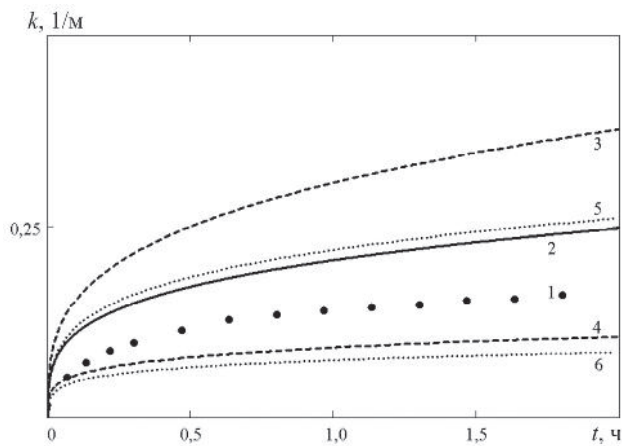
$$\varepsilon_i^c = \frac{2}{\sqrt{3}} \left( (\varepsilon_1^c(z))^2 + (\varepsilon_2^c(z))^2 + \varepsilon_1^c(z)\varepsilon_2^c(z) \right)^{1/2}.$$

К системе (17)–(20) добавляются начальные условия, нормаль пластины разбивается на  $l$  равных интервалов. Полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка относительно деформаций в точках разбиения пластины решается методом Рунге–Кутты–Мерсона [22].

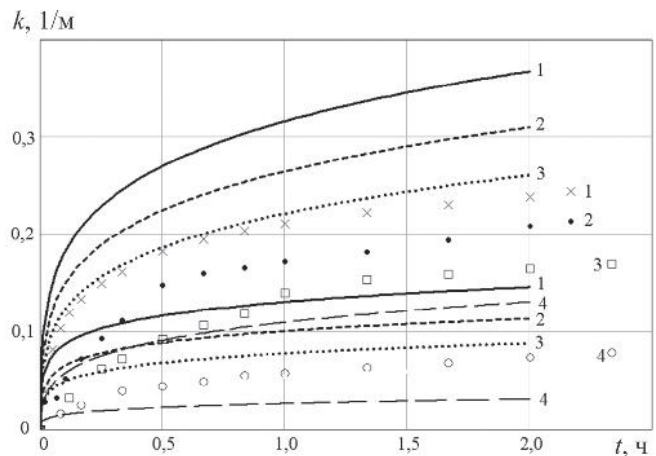
Выполнены также расчеты на кручение пластины в конечно-элементном комплексе Ansys в геометрически нелинейной постановке, учитывающей мембранные усилия с использованием констант только на растяжение или только на сжатие. Вычисления проводились с применением 3D элемента Solid45, который был оттестирован [23], и с разбиением 4 элемента по толщине пластины, 12×12 элементов в плоскости. Увеличение плотности конечно-элементной сетки в полтора раза приводило к уменьшению прогиба и кривизны не более чем на 2 %.

### Результаты и обсуждение

На рис. 4, а точками 1 изображены экспериментальные значения зависимости кривизны от времени при кручении пластины с раз-



а



б

Рис. 4. Экспериментальные и расчетные зависимости кривизны от времени для пластины  $h = 11,715$  мм,  $\bar{\sigma}_i = 216$  МПа (а); для пластин  $l - h = 10,066$  мм,  $\bar{\sigma}_i = 240$  МПа, 2 –  $10,066$  мм;  $230$  МПа; 3 –  $10,158$  мм;  $220$  МПа; 4 –  $8,029$  мм;  $200$  МПа (б)

мерами  $180 \times 180$  мм, толщиной  $h = 11,715$  мм из сплава АК4-1Т,  $T = 195$  °С и с интенсивностью напряжений в характеристической точке  $\bar{\sigma}_i = 216$  МПа. Отличительной особенностью характеристических точек является то, что напряжение в течение всего времени деформирования при выполнении условий чистого изгиба остается приблизительно равным одной и той же величине [24]. В условиях чистого изгиба эти точки располагаются на расстоянии  $\rightarrow h/3$  по обе стороны от срединной поверхности, т. е.  $\hat{z} \rightarrow \pm h/3$ . Момент кручения связан с  $\bar{\sigma}_i$  по формуле  $M = \bar{\sigma}_i h^2 / (4\sqrt{3})$ . Кривизна вычислялась по замерам прогиба  $w$  на базе  $L = 100$  мм вдоль диагонали пластины на одинаковом расстоянии от центра  $k = 8w / L^2$ . На том же рисунке изображены расчетные кривые: кривая 2 – расчет по модели (17)–(20) с учетом констант на растяжение и сжатие одновременно; кривые 3 и 4 – расчет по модели (17)–(20) с использованием констант только на растяжение и только на сжатие соответственно. Экспериментальные данные расположены между расчетными кривыми 3 и 4. Завышенное расположение линии 2 можно объяснить тем, что в расчетах не учитываются возникающие при деформировании мембранные усилия. График кривизны на рис. 4 изображен без учета упругой составляющей  $k_0 = 0,76$  1/м в начальный момент при  $t = 0$ . При превышении прогиба (вместе с упругой составляющей) половины толщины пластины, т. е. кривизны порядка  $0,8$  1/м в вычислениях необ-

ходимо учитывать деформации срединной поверхности. Линиями 5 и 6 на графике изображены результаты расчетов для той же пластины, выполненные в конечно-элементном комплексе Ansys в геометрически нелинейной постановке, учитывающей мембранные усилия с использованием констант только на растяжение и только на сжатие соответственно.

Точками 1–4 на рис. 4, б представлены экспериментальные данные (кривизна) для четырех пластин:  $l - h = 10,066$  мм,  $\bar{\sigma}_i = 240$  МПа; 2 –  $10,066$  мм,  $230$  МПа; 3 –  $10,158$  мм,  $220$  МПа; 4 –  $8,029$  мм,  $200$  МПа. Линии 1–4 – расчет методом конечных элементов в программном комплексе Ansys в геометрически нелинейной постановке с использованием констант либо только на растяжение (4), либо только на сжатие (5). На графике видно, что экспериментальные значения расположены посередине между соответствующими расчетными линиями, что дополнительно подтверждает сложные свойства сплава и необходимость их учета в расчетах. Вычисления показали также, что деформации пластин не превосходят 2 %.

## Выводы

Экспериментальное исследование на растяжение и сжатие образцов из сплава АК4-1Т, вырезанных из плиты  $h = 45$  мм, при  $T = 195$  °С, показало, что сплав обладает свойством упрочнения и является разносопротивляющимся растяжению и сжатию при ползучести. Определены

константы для степенных зависимостей, описывающих скорости деформаций ползучести. Развита модель, основанная на «трансформированном» пространстве напряжений, учитывающая упрочнение и разносопротивляемость материала при растяжении и сжатии, когда все степенные показатели различны. Разработана методика расчета для решения задач чистого изгиба пластин из такого материала при плоском напряженном состоянии. Расчеты, выполненные с константами либо только на растяжение, либо только на сжатие с помощью метода конечных элементов в трехмерной постановке с учетом деформаций срединной поверхности, показали хорошее соответствие экспериментальным данным.

### Список литературы

1. Банищикова И.А., Горев Б.В., Цвелодуб И.Ю. О ползучести пластин из алюминиевых сплавов при изгибе // Прикладная механика и техническая физика. – 2007. – Т. 48, № 5 (285). – С. 156–159.
2. Математическое моделирование процессов ползучести металлических изделий из материалов, имеющих разные свойства при растяжении и сжатии / С.Н. Коробейников, А.И. Олейников, Б.В. Горев, К.С. Бормотин // Вычислительные методы и программирование. – 2008. – Т. 9, № 1. – С. 346–365.
3. Олейников А.И. Модели установившейся ползучести трансверсально-изотропных материалов с разными характеристиками на растяжение и сжатие // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2010. – Т. 13, № 3 (43). – С. 113–116.
4. Цвелодуб И.Ю. К построению определяющих уравнений ползучести ортотропных материалов с различными свойствами при растяжении и сжатии // Прикладная механика и техническая физика. – 2012. – Т. 53, № 6 (316). – С. 98–101.
5. Горев Б.В., Рубанов В.В., Соснин О.В. О ползучести материалов с разными свойствами при растяжении и сжатии // Проблемы прочности. – 1979. – № 7. – С. 62–67.
6. Горев Б.В., Соснин О.В., Любашевская И.В. К вопросу о ползучести материалов с разными свойствами на растяжение и сжатие // Труды IV Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи», Самара (29–31 мая 2007 г.). – Самара: Изд-во СамГТУ, 2007. – Ч. 1. – С. 77–81.
7. Никитенко А.Ф. Ползучесть и длительная прочность металлических материалов. – Новосибирск: НГАСУ, 1997. – 278 с.
8. Цвелодуб И.Ю. Постулат устойчивости и его приложения в теории ползучести металлических материалов. – Новосибирск, 1991. – 201 с.
9. Numerical modeling of creep and creep damage in thin plates of arbitrary shape from materials with different behavior in tension and compression under plane stress conditions / A. Zolochovsky, S. Sklepus, T.H. Hyde, A.A. Becker, S. Peravali // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2009. – Vol. 80, iss. 11. – P. 1406–1436. – doi: 10.1002/nme.2663
10. Analysis of creep deformation and creep damage in thin-walled branched shells from materials with different behavior in tension and compression / A. Zolochovsky, A. Galishin, S. Sklepus, G.Z. Voyiadjis // International Journal of Solids and Structures. – 2007. – Vol. 44, iss. 16. – P. 5075–5100. – doi: 10.1016/j.ijsolstr.2006.12.019
11. Constitutive equations of creep under changing multiaxial stresses for materials with different behavior in tension and compression / A. Zolochovsky, S. Sklepus, Yu. Kozmin, A. Kozmin, D. Zolochovsky, J. Betten // Forschung im Ingenieurwesen. – 2004. – Vol. 68, iss. 4. – P. 182–196. – doi: 10.1007/s10010-003-0123-6
12. Горев Б.В., Масанов И.Ж. Особенности формирования листовых конструкционных плит из алюминиевых сплавов в режимах ползучести // Технология машиностроения. – 2009. – № 7. – С. 13–20.
13. Hiroyuki Watanabe, Masao Fukusumi. Tension-compression asymmetry under superplastic flow in magnesium alloys // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2014. – Vol. 23, iss. 10. – P. 3551–3557. – doi: 10.1007/s11665-014-1176-4
14. О ползучести упрочняющихся материалов с разными свойствами на растяжение и сжатие / А.Ф. Никитенко, О.В. Соснин, Н.Г. Торшенов, И.К. Шокало // Прикладная механика и техническая физика. – 1971. – № 2. – С. 118–122.
15. Цвелодуб И.Ю. О ползучести материалов с разными свойствами на растяжение и сжатие // Динамика сплошной среды. – 1974. – Вып. 19–20. – С. 147–155.
16. Соснин О.В. К вопросу о существовании потенциала ползучести // Механика твердого тела. – 1971. – № 5. – С. 85–89.
17. Горев Б.В., Клопотов И.Д. К описанию процесса ползучести и длительной прочности по уравнениям с одним скалярным параметром повреждаемости // Прикладная механика и техническая физика. – 1994. – Т. 35, № 5. – С. 92–102.
18. Закономерности ползучести и длительной прочности: справочник / С.А. Шестериков, А.Л. Аршакуни, А.М. Локощенко, В.Н. Киселевский и др.; под общ. ред. С.А. Шестерикова. – М.: Машиностроение, 1983. – С. 8–11.

19. *Соснин О.В., Горев Б.В., Рубанов В.В.* Кручение квадратной пластинки из материала, разносопротивляющегося растяжению и сжатию при ползучести // Расчеты прочности судовых конструкций и механизмов: сб. тр. / Министерство речного флота РСФСР, Новосибирский институт инженеров водного транспорта. – Новосибирск. – 1976. – Вып. 117. – С. 78–88.

20. *Банищикова И.А., Муравьёва А.Е.* Изгиб пластин из упрочняющегося материала, разносопротивляющегося растяжению и сжатию при ползучести // Проблемы оптимального проектирования сооружений: доклады 3 Всероссийской конференции, Новосибирск, 15–17 апреля, 2014 г. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2014. – С. 34–40.

21. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 547 с.

22. *Мудров А.Е.* Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. – Томск: Раско, 1991. – 272 с.

23. *Банищикова И.А.* Расчет пластин двойной кривизны из анизотропных сплавов при ползучести // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4, ч. 4. – С. 1385–1387.

24. *Горев Б.В., Панамарев В.А.* Метод интегральных характеристик для расчетов изгиба элементов конструкций // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2013. – Вып. 3 (177). – С. 202–211.

## OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(65), October – December 2014, Pages 68–77

### Calculation of plates made of strain-hardening material with different resistance to tension and compression under creep

**Banshchikova I.A.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Physics and Mathematics), e-mail: binna@ngs.ru

**Muraveva A.E.**<sup>2</sup>, Master's Degree student, e-mail: binnan@ya.ru

**Tselodub I.Yu.**<sup>1</sup>, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: itsvel@hydro.nsc.ru

<sup>1</sup> Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the RAS, 15 Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, 2 Pirogova Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

#### Abstract

Samples cut from AK4-1T alloy plates with thickness  $h = 45$  mm are experimentally investigated at  $T = 195$  °C under tension and compression conditions. The alloy is strain-hardening and has different resistance to tension and compression under creep. Constants for power-law dependences describing creep strain rates are defined according to the experimental data. The model based on the “transformed” space of stresses, taking into account properties of hardening and different resistance of material to tension and compression at creep is developed. The model is tested for the problem of AK4-1T alloy plates' pure torsion in assuming of planes stress-strain state. Experimental data on flexible plates' torsion and finite elements' calculation in geometrically nonlinear statement using constants only on tension or compression are presented. Experimental values are located between the relevant calculated lines, that confirms the complex properties of alloy. These properties should be taken into account in the calculations.

#### Keywords:

creep, hardening, different resistance to tension and compression bending, torsion plates, aluminum alloys

#### References

1. *Banshchikova I.A., Gorev B.V., Tselodub I.Yu.* O polzuchesti plastin iz alyuminiyevykh spлавov pri izgibe [Creep of plates made of aluminum alloys under bending]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2007, vol. 48, no. 5, pp. 156–159. (In Russian)

2. *Korobeynikov S.N., Oleinikov A.I., Gorev B.V., Bormotin K.S.* Matematicheskoe modelirovanie protsessov polzuchesti metallicheskikh izdelii iz materialov, imeyushchikh raznye svoystva pri rastyazhenii i szhatii [Mathematical

simulation of creep processes in metal patterns made of materials with different extension compression properties]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye – Numerical Methods and Programming*, 2008, vol. 9, no. 1, pp. 346–365.

3. Oleinikov A.I. Modeli ustanovivsheysya polzuchesti transversal'no-izotropnykh materialov s raznymi kharakteristikami na rastyazhenie i szhatie [Models for the steady-state creep of transversely isotropic materials with different tension and compression characteristics]. *Sibirskii Zhurnal Industrial'noi Matematiki – Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 2010, vol. XIII, no. 3 (43), pp. 113–116. (In Russian)

4. Tselodub I.Yu. K postroeniyu opredelyayushchikh uravnenii polzuchesti ortotropnykh materialov s razlichnymi svoistvami pri rastyazhenii i szhatii [Construction of constitutive equations of creep in orthotropic materials with different properties under tension and compression]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2012, vol. 53, no. 6 (316), pp. 98–101. (In Russian)

5. Gorev B.V., Rubanov V.V., Sosnin O.V. O polzuchesti materialov s raznymi svoistvami pri rastyazhenii i szhatii [Creep of materials with different properties in tension and compression]. *Problemy prochnosti – Strength of Materials*, 1979, no. 7, pp. 62–67. (In Russian)

6. Gorev B.V., Sosnin O.V., Lyubashevskaya I.V. [On creep of materials with different tension and compression properties]. *Trudy IV Vserossiiskoi konferentsii s Mezhdunarodnym uchastiem. Matematicheskoe modelirovaniye i kraevye zadachi* [Proceedings of the Fourth All-Russian Scientific Conference with International Participation (29–31 May 2007). Mathematical Modeling and Boundary-Value Problems], Samara, SamSTU Publ., 2007, pt. 1, pp. 77–81. (In Russian)

7. Nikitenko A.F. *Polzuchest' i dlitel'naya prochnost' metallicheskih materialov* [Creep and long-term strength of metal materials]. Novosibirsk, NGASU Publ., 1997. 278 p.

8. Tselodub I.Yu. *Postulat ustoychivosti i ego prilozheniya v teorii polzuchesti metallicheskih materialov* [The stability postulate and its applications in creep theory of metallic materials]. Novosibirsk, LIH SB RAS Publ., 1991. 201 p.

9. Zolochovsky A., Sklepus S., Hyde T.H., Becker A.A., Peravali S. Numerical modeling of creep and creep damage in thin plates of arbitrary shape from materials with different behavior in tension and compression under plane stress conditions. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2009, vol. 80, iss. 11, pp. 1406–1436. doi: 10.1002/nme.2663

10. Zolochovsky A., Galishin A., Sklepus S., Voyiadjis G.Z. Analysis of creep deformation and creep damage in thin-walled branched shells from materials with different behavior in tension and compression. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, vol. 44, iss. 16, pp. 5075–5100. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2006.12.019

11. Zolochovsky A., Sklepus S., Kozmin Yu., Kozmin A., Zolochovsky D., Betten J. Constitutive equations of creep under changing multiaxial stresses for materials with different behavior in tension and compression. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2004, vol. 68, iss. 4, pp. 182–196. doi: 10.1007/s10010-003-0123-6

12. Gopev B.V., Masanov I.Zh. Osobennosti deformirovaniya listovykh konstruktsionnykh plit iz alyuminievykh splavov v rezhimakh polzuchesti [Deformation features of the aluminium laminary structural plates under creep modes]. *Tekhnologiya Mashinostroeniya – Mechanical Engineering*, 2009, no. 7, pp. 13–20.

13. Hiroyuki Watanabe, Masao Fukusumi. Tension-compression asymmetry under superplastic flow in magnesium alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23, iss. 10, pp. 3551–3557. doi: 10.1007/s11665-014-1176-4

14. Nikitenko A.F., Sosnin O.V., Torshenov N.G., Shokalo I.K. O polzuchesti uprochnyayushchikhsya materialov s raznymi svoistvami na rastyazhenie i szhatie [Creep of hardening materials with different properties in tension and compression]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1971, no. 2, pp. 118–122. (In Russian)

15. Tselodub I.Yu. O polzuchesti materialov s raznymi svoistvami na rastyazhenie i szhatie [The creep of materials with different properties in tension and compression]. *Dinamika sploshnoi sredy – Dynamics of a Continuous Medium*, 1974, iss. 19–20, pp. 147–155.

16. Sosnin O.V. K voprosu o sushchestvovanii potentsiala polzuchesti [Existence of a creep potential]. *Mekhanika tverdogo tela – Mechanics of Solids*, 1971, no. 5, pp. 85–89. (In Russian)

17. Gorev B.V., Klopotov I.D. K opisaniyu protsessa polzuchesti i dlitel'noi prochnosti po uravneniyam s odnim skalyarnym parametrom povrezhdaemosti [Description of the creep process and long-term strength by equations with one scalar damage parameter]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1994, vol. 35, no. 5, pp. 92–102. (In Russian)

18. Shesterikov S.A., Arshakuni A.L., Lokoshchenko A.M., Kiselevskii V.N. et al. *Zakonomernosti polzuchesti i dlitel'noi prochnosti: spravochnik* [The Laws of Creep and Long-Term Strength: A Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983, pp. 8–11.

19. Sosnin O.V., Gorev B.V., Rubanov V.V. [Torsion of a square plate in a material with differing resistance to creep in tension and compression]. *Sbornik trudov Ministerstvo rechnogo flota RSFSR "Raschety prochnosti sudovykh konstruksii i mekhanizmov"* [Proceedings of the Ministry of USSR river fleet "Strength analysis of ship structures and mechanisms"], Novosibirsk, 1976, iss. 117, pp. 78–88.

20. Banshchikova I.A., Muraveva A.E. [Bending plates of the hardening material with different resistance to tension and compression at creep]. *Doklady 3-i Vserossiiskoi konferentsii "Problemy optimal'nogo proektirovaniya sooruzhenii"* [Proceedings of the 3rd Russian Conference "Problems of optimal design of structures"], Novosibirsk, 2014, pp. 34–40.

21. Rabotnov Yu.N. *Polzuchest' elementov konstruksii* [Creep of Structural Elements]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 547 p.

22. Mudrov A.E. *Chislennye metody dlya PEVM na yazykakh Beisik, Fortran i Paskal'* [Calculus of Approximations for PC on BASIC, Fortran, and Pascal]. Tomsk, "Rasko" Publ., 1991. 272 p.

23. Banshchikova I.A. Raschet plastin dvoimoi krivizny iz anizotropnykh splavov pri polzuchesti [Calculation of double curvature plates of anisotropic alloys under creep]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo – Bulletin of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod*, 2011, no. 4, pt. 4, pp. 1385–1387.

24. Gorev B.V., Panamarev V.A. Metod integral'nykh kharakteristik dlya raschetov izgiba elementov konstruksii [The integrated characteristics method for calculation of a bend of design]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki – St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 2013, iss. 3 (177), pp. 202–211.

Received 02 October 2014

Revised 23 October 2014

Accepted 03 November 2014

# ВЛИЯНИЕ РАЗБРОСА ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ КОМПОЗИЦИИ НА ЭФФЕКТИВНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛОвого РАСШИРЕНИЯ МИКРОНЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Б.С. РЕЗНИКОВ, доктор техн. наук, профессор  
А.В. ГОБЫШ, канд. физ.-мат. наук  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 19 октября 2014  
Рецензирование: 05 ноября 2014  
Принята к печати: 15 ноября 2014

**Резников Б.С.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: reznikov@corp.nstu.ru

Предложен подход для численного исследования осредненных коэффициентов линейного теплового расширения многофазных композитов на основе метода статистических испытаний. Данный подход позволяет учитывать стохастическую природу композита, т.е. исследовать влияние разброса физико-математических характеристик субструктурных элементов, в частности, модулей Юнга, коэффициентов Пуассона и линейного теплового расширения. При этом используемая математическая модель композита основана на принципе эффективной однородности, структурном анализе и учитывает естественные условия сопряжения (для деформаций, напряжений и температуры) на границе раздела фаз. Численные результаты для эффективных коэффициентов линейного теплового расширения композита приведены для различных структур трехфазных сред, для которых получены доверительные интервалы с заданной доверительной вероятностью. Оценено влияние стохастической природы различных характеристик субструктурных элементов на математическое ожидание коэффициентов линейного теплового расширения композита.

**Ключевые слова:** структурно-неоднородные среды, стохастическая природа композита, метод Монте-Карло, эффективные коэффициенты, тепловое расширение, статистические характеристики, доверительный интервал.

## Введение

Композиты, используемые в современной технике, представляют собой статистический ансамбль значительного количества первичных элементов (различных волокон, частиц, «усов», стеклянных микросфер, связующего и т. д.), физико-механические свойства которых, как показывают эксперименты, имеют разброс значений, т. е. являются случайными величинами. Поэтому исследование влияния статистического разброса упругих характеристик и коэффициентов линейного теплового расширения субструктурных элементов композиции является актуальной задачей, решение которой позволит наиболее

достоверно прогнозировать эффективные коэффициенты теплового расширения микroneоднородных материалов.

В данной работе на основе математической модели для многофазных материалов из [1–3], где параметры композита являлись детерминированными, предложен подход для расчета эффективных коэффициентов линейного теплового расширения структурно-неоднородных сред, который позволяет учитывать стохастическую природу композита. При этом используется метод Монте-Карло (метод статистических испытаний [4–6]) и считается, что случайными параметрами являются модули Юнга, коэффициенты Пуассона и линейного теплового расширения



субструктурных элементов. С помощью разработанного по данной методике численного алгоритма для различных типов многофазных материалов определены как статистические характеристики, так и доверительные интервалы (при заданной доверительной вероятности) для эффективных коэффициентов линейного теплового расширения рассматриваемых композитов.

### Метод исследования

Для расчета осредненных коэффициентов линейного теплового расширения многофазных материалов в случае детерминированных параметров используется математическая модель композита (рис. 1), основные предположения из [1–3] и соотношения из [3].

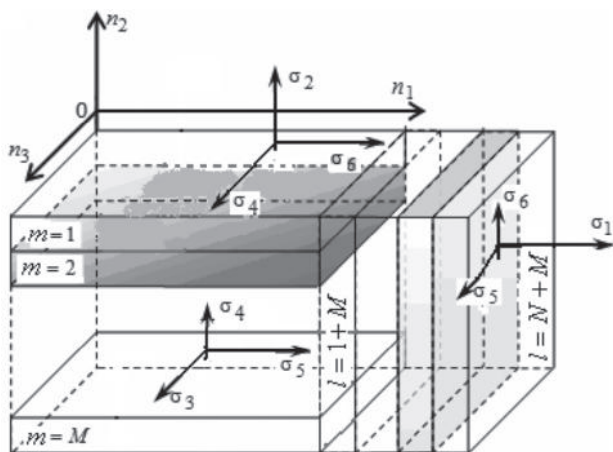


Рис. 1. Характерный элемент композита с продольно-поперечным расположением  $M + N$  фаз

В частности, физические соотношения в случае пространственного напряженного состояния при термосиловом воздействии для рассматриваемого композита (см. рис. 1) имеют следующий вид:

$$\varepsilon_n = \sum_{p=1}^3 b_{np} \sigma_p + \alpha_{nn}^t \theta, \quad (1)$$

$$\varepsilon_s = b_{ss} \sigma_s + \alpha_{ss}^t \theta \quad (n = 1, 2, 3; s = 4, 5, 6).$$

Выражения для эффективных коэффициентов податливости  $b_{np}$ ,  $b_{ss}$  ( $n, p = 1, 2, 3; s = 4, 5, 6$ ) и линейного теплового расширения  $\alpha_{rr}^t$  ( $r = 1, 2, \dots, 6$ ) определены в [3], где получено, что указанные величины зависят от большого числа управляющих параметров:

$$b_{np} = b_{np}(\omega_m, a_{ik}^{(m)}, a_{jj}^{(m)}, \alpha_{ll}^{(m)});$$

$$b_{ss} = b_{ss}(\omega_m, a_{ik}^{(m)}, a_{jj}^{(m)}, \alpha_{ll}^{(m)});$$

$$\alpha_{rr}^t = \alpha_{rr}^t(\omega_m, a_{ik}^{(m)}, a_{jj}^{(m)}, \alpha_{ll}^{(m)}), \quad (2)$$

где  $i, k = 1, 2, 3; j = 4, 5, 6; l = 1, 2, \dots, 6; m = 1, 2, \dots, M, M + 1, \dots, M + N$ .

(Здесь и в дальнейшем используются в основном обозначения из [3].) Для оценки влияния отклонений тех или иных параметров из (2) от номинальных на значения  $\alpha_{rr}^t$  ( $r = 1, 2, \dots, 6$ ) будем использовать метод Монте-Карло [4]. При этом считается, что теоретические плотности распределения параметров

$$a_{ik}^{(m)}, a_{jj}^{(m)}, \alpha_{ll}^{(m)}, \quad (3)$$

которые имеют стохастическую природу, известны, например, из экспериментов. Тогда, определив последовательность (на ЭВМ) случайных значений указанных параметров (3) и используя соотношения из [3], найдем  $\alpha_{rr}^t$  ( $r = 1, 2, \dots, 6$ ) для каждой серии значений управляющих параметров. Повторив эту процедуру  $L$  раз ( $L$  – количество статистических испытаний), получим значения  $\alpha_{rr}^t(1), \alpha_{rr}^t(2), \dots, \alpha_{rr}^t(L)$ , что позволяет определить статистические характеристики случайных величин  $\alpha_{rr}^t$  ( $r = 1, 2, \dots, 6$ ) – статистическое среднее и статистическую дисперсию [7, 8]:

$$M[\alpha_{rr}^t] = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \alpha_{rr}^t(l), \quad (4)$$

$$D[\alpha_{rr}^t] = \frac{1}{L-1} \sum_{l=1}^L (\alpha_{rr}^t(l) - M[\alpha_{rr}^t])^2,$$

где  $r = 1, 2, \dots, 6$ .

Указанные величины в (4) являются состоятельными и несмещенными оценками для математических ожиданий и дисперсий случайных величин  $\alpha_{rr}^t$  ( $r = 1, 2, \dots, 6$ ).

Используя (4), можно построить доверительные интервалы  $I_{rr(\beta)}$ , соответствующие заданной доверительной вероятности  $\beta$  для математического ожидания величины  $\alpha_{rr}^t$  ( $r = 1, 2, \dots, 6$ ), которые, согласно [7], определяются следующим образом:

$$I_{rr(\beta)} = \left( M \left[ \alpha_{rr}^t \right] - \Delta_{r(\beta)} ; \right. \\ \left. M \left[ \alpha_{rr}^t \right] + \Delta_{r(\beta)} \right), \quad (5)$$

где  $\Delta_{r(\beta)} = t_{\beta} \frac{\sqrt{D \left[ \alpha_{rr}^t \right]}}{\sqrt{L}}$ ;  $t_{\beta}$  – статистика Стьюдента (при заданных  $L$  и  $\beta$ ).

### Результаты и обсуждение

В качестве числовых примеров в целях определенности и конкретизаций рассмотрим трехфазные композиты, состоящие из различных изотропных фаз. В этом случае для элементов композиции будем иметь следующие выражения для коэффициентов податливости и линейного теплового расширения [2, 9, 10]:

$$a_{ii}^{(m)} = 1/E^{(m)}, \\ a_{12}^{(m)} = a_{13}^{(m)} = a_{23}^{(m)} = -v^{(m)}/E^{(m)}, \\ a_{ll}^{(m)} = 1/G^{(m)}, G^{(m)} = 0,5E^{(m)}/(1 + v^{(m)}), \\ \alpha_{ii}^{(m)} = \alpha_i^{(m)}, \alpha_{ll}^{(m)} = 0, \quad (6)$$

где  $i = 1, 2, 3$ ;  $l = 4, 5, 6$ ;  $m = 1, 2, 3$ . При этом параметры  $E^{(m)}$ ,  $v^{(m)}$ ,  $\alpha_i^{(m)}$  ( $m = 1, 2, 3$ ) имеют стохастическую природу и подчиняются (для значительного класса композитов [11–14]) нормальному закону. Тогда, согласно [4], определим совокупность значений нормально распределенных случайных величин по формуле

$$X_i = \sqrt{D[X_i]} \xi + M[X_i] \quad (i = 1, 2, \dots, 9); \\ X_1 = E^{(1)}, X_2 = E^{(2)}, X_3 = E^{(3)}, \\ X_4 = v^{(1)}, X_5 = v^{(2)}, X_6 = v^{(3)}, \\ X_7 = \alpha_1^{(1)}, X_8 = \alpha_1^{(2)}, X_9 = \alpha_1^{(3)} \quad (7)$$

( $\xi$  – нормально распределенная случайная величина с математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсией, равной единице), а тем самым найдем множество случайных значений для всех рассматриваемых параметров из (6). Затем, используя их, определим с помощью соотношений из [2, 3]  $\alpha_{rr(l)}^t$  ( $r = 1, 2, 3$ ;  $l = 1, 2, 3, \dots, L$ ), а тем самым из (4) и (5) –  $M[\alpha_{rr}^t]$ ,  $D[\alpha_{rr}^t]$  и  $I_{rr(\beta)}$ .

Для указанных композитов также были проведены расчеты статистического среднего, статистической дисперсии и доверительного интервала для эффективного термического коэффициента объемного расширения –  $\alpha^t$ , значение которого в соответствии с [2, 9] определяется следующим образом:

$$\alpha^t = \sum_{r=1}^3 \alpha_{rr}^t. \quad (8)$$

При этом соотношения (4), (5) остаются справедливыми и для  $\alpha^t$ , если в них нижний индекс « $r$ » опустить.

Конкретные расчеты проведены для композита со следующими параметрами:  $\tilde{\omega}_3 = 0,3$ ,  $0 \leq \tilde{\omega}_1 \leq 0,3$ ,  $\tilde{\omega}_2 = 0,7 - \tilde{\omega}_1$ . Характеристики, указанные в таблице, взяты из [11–15].

При этом первый материал соответствует стеклянным волокнам (кварцевое стекло), второй материал – стеклянной микродроби, а третий материал – полиэфирному связующему. Для определения среднего квадратического отклонения указанных в таблице величин использовалось «правило трех сигм» (при заданном разбросе экспериментальных данных в [11–15]).

Для оценки влияния взаимного расположения фаз и их объемного содержания на статистические характеристики коэффициентов линейного теплового расширения композита на рис. 2–4 приведены соответственно зависимости  $M[\alpha_{11}^t]$ ,  $M[\alpha_{22}^t]$  и  $M[\alpha^t]$  от удельного

Характеристики параметров для композита

$m$	$M[E^{(s)}], \text{ ГПа}$	$\sqrt{D[E^{(s)}]}, \text{ ГПа}$	$M[v^{(s)}]$	$\sqrt{D[v^{(s)}]}$	$\sqrt{D[\alpha^{(s)}]},$ 1/град, $10^{-5}$	$\sqrt{D[\alpha^{(s)}]},$ 1/град, $10^{-5}$
1	120,17	17,17	0,17	0,015	0,056	0,018
2	63,5	4,83	0,25	0,0167	0,053	0,149
3	3,29	0,41	0,385	0,012	8,5	0,5

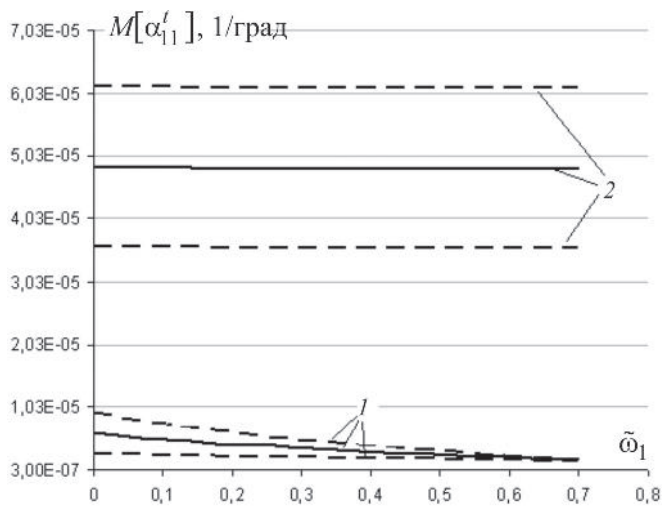


Рис. 2. Зависимости  $M[\alpha'_{11}]$  от удельного объемного содержания 1-й фазы  $\tilde{\omega}_1$  (сплошные линии) и доверительные интервалы (пунктирные линии) при доверительной вероятности  $\beta = 0,95$  и  $L = 10$

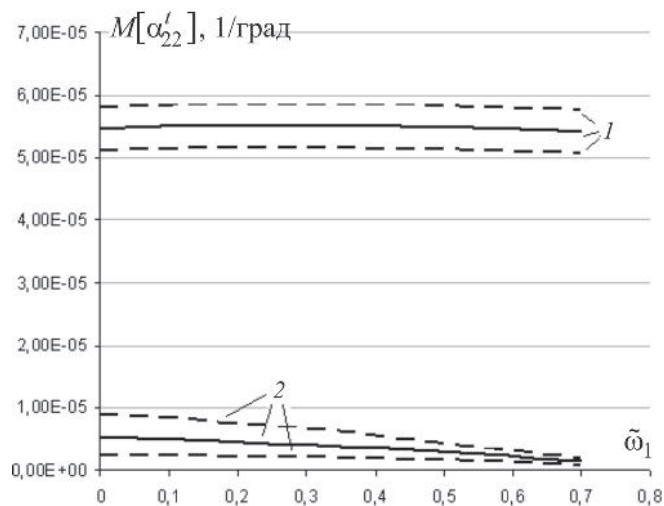


Рис. 3. Зависимости  $M[\alpha'_{22}]$  от удельного объемного содержания 1-й фазы  $\tilde{\omega}_1$  (сплошные линии) и доверительные интервалы (пунктирные линии) при доверительной вероятности  $\beta = 0,95$  и  $L = 10$

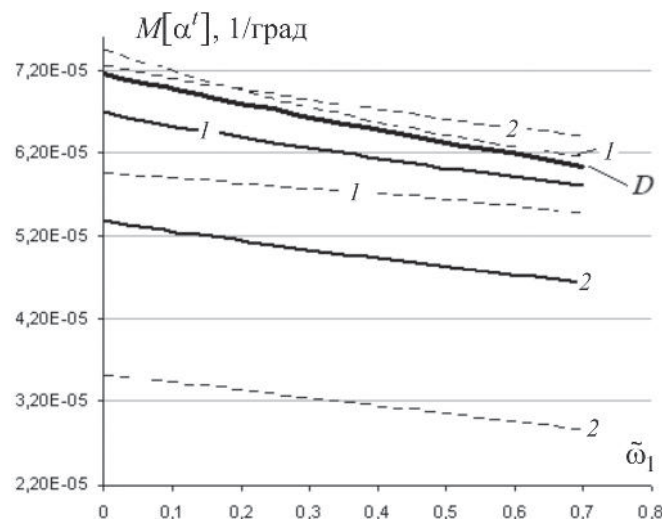


Рис. 4. Зависимости  $M[\alpha^t]$  от удельного объемного содержания 1-й фазы  $\tilde{\omega}_1$  (сплошные линии) и доверительные интервалы (пунктирные линии) при доверительной вероятности  $\beta = 0,95$  и  $L = 10$

объемного содержания 1-й фазы  $\tilde{\omega}_1$  (сплошные линии) и указаны доверительные интервалы (пунктирные линии) при доверительной вероятности  $\beta = 0,95$  и  $L = 10$ . Кривые, отмеченные цифрой 1, отвечают случаю продольного расположения фаз ( $M = 3, T = 0$ ), а цифрой 2 – случаю продольно-поперечного расположения фаз ( $M = 2, N = 1$ ). Сплошная кривая, отмеченная буквой D на рис. 4, соответствует эффективному термическому коэффициенту объемного расши-

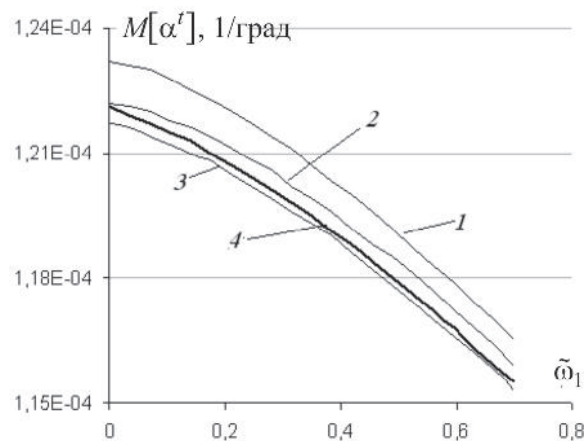


Рис. 5. Влияние стохастической природы различных характеристик субструктурных элементов композита (продольное расположение фаз) на  $M[\alpha^t]$

рения  $\alpha^t$ , найденному для продольно-поперечного расположения фаз при детерминированных параметрах элементов композиции, которые равны математическим ожиданиям соответствующих величин из таблицы.

На рис. 5 для оценки влияния стохастической природы различных характеристик субструктурных элементов композита (продольное расположение фаз) на  $M[\alpha^t]$  приведены зависимости: кривая 1 соответствует случаю, когда  $\alpha^{(m)}$

( $m = 1, 2, 3$ ) – случайные, а остальные параметры детерминированы; кривая 2 –  $\nu^{(m)}$  ( $m = 1, 2, 3$ ) – случайные, а остальные параметры детерминированы; кривая 3 –  $E^{(m)}$  ( $m = 1, 2, 3$ ) – случайные, а остальные параметры детерминированы; кривая 4 – все параметры случайные. Учет стохастической природы модуля Юнга (кривая 3) практически совпадает со случаем, когда все параметры детерминированные. Характеристики свойств элементов композиции взяты из таблицы. Сравнение кривых на рис. 5 показывает, что наибольшее влияние на эффективный коэффициент объемного термического расширения оказывает разброс значений  $\alpha^{(m)}$  ( $m = 1, 2, 3$ ).

### Выводы

Используемая математическая модель многофазного композита и предложенный метод позволили исследовать влияние структуры композита и его стохастическую природу на статистические характеристики эффективных коэффициентов теплового расширения. При этом для указанных характеристик найдены доверительные интервалы при заданной доверительной вероятности, что позволяет оценивать эксплуатационные свойства композита при термических воздействиях.

### Список литературы

1. Резников Б.С., Никитенко А.Ф., Кучеренко И.В. Прогнозирование макроскопических свойств структурно-неоднородных сред: сообщение 1 // Известия вузов. Строительство. – 2008. – № 2. – С. 10–17.
2. Резников Б.С., Гобыш А.В. Расчёт эффективных коэффициентов теплового расширения микронеоднородных композитов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2013. – № 2 (21). – С. 139–149.
3. Резников Б.С., Гобыш А.В. Прогнозирование структуры многофазных размеростабильных композитов при температурном воздействии // Доклады

3-й Всероссийской конференции «Проблемы оптимального проектирования сооружений». – Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2014. – С. 345–352.

4. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) / Н.П. Бусленко, Д.И. Голенко, И.М. Соболев, В.Г. Срагович, Ю.А. Шрейдер. – М.: Физматгиз, 1962. – 332 с.

5. Резников Б.С. Прогнозирование разрушения кольцевых пластин с учетом реальной структуры и стохастической природы армированных материалов // Краевые задачи и их приложения: межвузовский сборник научных трудов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1989. – С. 89–99.

6. Резников Б.С. Расчет на прочность конструкций из армированных материалов методом Монте-Карло // Механика композитных материалов. – 1986. – № 6. – С. 1059–1063.

7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1964. – 576 с.

8. Математическая статистика: учебник / В.М. Иванова, В.Н. Калинина, Л.А. Нешумова, И.О. Решетникова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1981. – 371 с.

9. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. – М.: Наука, 1977. – 400 с.

10. Подстригач Я.С., Коляно Ю.М. Обобщенная термомеханика. – Киев: Наукова думка, 1976. – 310 с.

11. Скудра А.М., Булавс Ф.Я., Роценс К.А. Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков. – Рига: Зинатне, 1971. – 238 с.

12. Игнатов И.В., Стрельченко И.Г., Юрьев С.В. Статистические характеристики механических констант стеклопластиков // Механика полимеров. – 1972. – № 6. – С. 1025–1028.

13. Тарнопольский Ю.М., Скудра А.Н. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. – Рига: Зинатне, 1966. – 260 с.

14. Тарнопольский Ю.М., Розе А.В. Особенности расчёта деталей из армированных пластиков. – Рига: Зинатне, 1969. – 274 с.

15. Дубровский И.М., Егоров Б.В., Рябошапка К.П. Справочник по физике. – Киев: Наукова думка, 1986. – 558 с.

**OBRABOTKA METALLOV**

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(65), October – December 2014, Pages 78–84

**Influence of range of compositions elements characteristics on the effective thermal expansion coefficients for microheterogeneous materials****Reznikov B.S.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: reznikov@corp.nstu.ru**Gobysh A.V.**, Ph.D. (Physics and Mathematics), e-mail: agobysh@mail.ru

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

**Abstract**

The approach for the numerical analysis of the averaged thermal expansion coefficients of multiphase composites based on the method of statistical testing is proposed. This approach allows to take into account the stochastic nature of the composite. The influence of the variation of physical and mathematical characteristics of the substructural elements: Young modulus, Poisson ratios and linear thermal expansion coefficients is investigated. The mathematical model of the composite is based on the principle of effective homogeneity, structural analysis and correctly formulated interference conditions (for deformation, stress and temperature) at the interphase boundary. The numerical results are presented for the effective coefficients of linear thermal expansion of the composite for various structures of three-phase environments. The confidence intervals with given confidence probability for various structures are found. The influence of the stochastic nature of various characteristics of substructural elements on mathematical expectation of thermal expansion coefficients of the composite is estimated.

**Keywords:**

structure-heterogeneous mediums, stochastic nature of composite, Monte-Carlo technique, effective coefficients, thermal expansion, statistical characteristics, confidence interval.

**References**

1. Reznikov B.S., Nikitenko A.F., Kucherenko I.V. Prognozirovaniye makroskopicheskikh svoystv strukturno-neodnorodnykh sred. Soobshchenie 1 [Determination Technique of Macroscopic Properties of Structurally Nonhomogeneous Environments. Information 1]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo – News of higher educational institutions. Construction*, 2008, no. 2, pp. 10–17.
2. Reznikov B.S., Gobysh A.V. Raschet effektivnykh koeffitsientov teplovogo rasshireniya mikroneodnorodnykh kompozitov [Calculation of the effective thermal expansion coefficients for microheterogeneous composites]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2013, no. 2 (21), pp. 139–149.
3. Reznikov B.S., Gobysh A.V. [Prediction of the structure of multi-phase composites dimensionally at temperature influence]. *Doklady 3 Vserossiiskoi konferentsii "Problemy optimal'nogo proektirovaniya sooruzhenii"* [Reports of the 3rd All-Russian conference "Problems of optimal design of structures"]. Novosibirsk, NGASU Publ., 2014, pp. 345–352.
4. Buslenko N.P., Golenko D.I., Sobol' I.M., Sragovich V.G., Shreider Yu.A. *Metod statisticheskikh ispytaniy (metod Monte-Karlo)* [Method of statistical tests (Monte Carlo method)]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962. 332 p.
5. Reznikov B.S. [Prediction of fracture annular plates with the real structure and the stochastic nature of fiber reinforced materials]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov "Kraevye zadachi i ikh prilozheniya"* [Interuniversity collected articles "Boundary value problems and their applications"], 1989, pp. 89–99.
6. Reznikov B.S. *Raschet na prochnost' konstruksii iz armirovannykh materialov metodom Monte-Karlo* [Calculation of the strength of structures of reinforced materials by the Monte Carlo method]. *Mekhanika kompozitnykh materialov – Mechanics of Composite Materials*, 1986, no. 6, pp. 1059–1063. (In Russian)
7. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostei* [Probability theory]. 3<sup>rd</sup> ed. Moscow, Nauka Publ., 1964. 576 p.
8. Ivanova V.M., Kalinina V.N., Neshumova L.A., Reshetnikova I.O. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical Statistics]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1981. 371 p.

9. Shermergor T.D. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred* [Theory of elasticity microinhomogeneous media]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 400 p.
10. Podstrigach Ya.S., Kolyano Yu.M. *Obobshchennaya termomekhanika* [Generalized Thermomechanics]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1976. 310 p.
11. Skudra A.M., Bulavs F.Ya., Rotsens K.A. *Polzuchest' i staticheskaya ustalost' armirovannykh plastikov* [Creep and static fatigue of reinforced plastics]. Riga, Zinatne Publ., 1971. 238 p.
12. Ignatov I.V., Strel'chenko I.G., Yur'ev S.V. *Statisticheskie kharakteristiki mekhanicheskikh konstant stekloplastikov* [Statistical characteristics of the mechanical constants of glass-reinforced plastics]. *Mekhanika polimerov – Polymer Mechanics*, 1972, no. 6, pp. 1025–1028. (In Russian)
13. Tarnopol'skii Yu.M., Skudra A.N. *Konstruksionnaya prochnost' i deformativnost' stekloplastikov* [Structural strength and deformability of fiberglass plastic]. Riga, Zinatne Publ., 1966. 260 p.
14. Tarnopol'skii Yu.M., Roze A.V. *Osobennosti rascheta detalei iz armirovannykh plastikov* [Features of calculation of details made of reinforced plastics]. Riga, Zinatne Publ., 1969. 274 p.
15. Dubrovskii I.M., Egorov B.V., Ryaboshapka K.P. *Spravochnik po fizike* [Physics Handbook]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986. 558 p.

Received 19 October 2014

Revised 05 November 2014

Accepted 15 November 2014

# ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ИЗГИБОМ В РЕЖИМЕ ПЛАСТИЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ САМОЛЕТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*С.Н. ВЕРИЧЕВ<sup>1</sup>, канд. тех. наук*  
*Б.В. ГОРЕВ<sup>2</sup>, доктор техн. наук*  
*И. А. БАНЩИКОВА<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук*  
*(<sup>1</sup> НГТУ, г. Новосибирск,*  
*<sup>2</sup> ИГиЛ СО РАН, г. Новосибирск)*

Поступила 24 октября 2014  
Рецензирование 10 ноября 2014  
Принята к печати 15 ноября 2014

**Горев Б.В.** – 630090, г. Новосибирск, пр. ак. М.А.Лаврентьева, 15,  
Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН  
e-mail: GorevBV@ya.ru

Для технологии формообразования крупногабаритных оребренных панелей рассматривается решение обратной упругопластической задачи расчета упреждающей формы оснастки по заданному остаточному контуру детали с учетом упругого восстановления заготовки после снятия нагрузок. Форма детали представляет собой сложную поверхность двойной кривизны, у которой зоны выпуклости соседствуют с зонами вогнутости. При формообразовании панели ребра жесткости находятся в условиях растяжения, сжатия и кручения. Предварительные тестовые расчеты упругопластического деформирования образцов Т-образного поперечного сечения из сплава АК4–1Т при температуре 195 °С в условиях чистого изгиба, моделирующих деформирование ребра жесткости с присоединенной обшивкой, показали удовлетворительное соответствие экспериментальным данным. Итерационный метод расчета с использованием конечноэлементного комплекса ANSYS позволил получить достаточно близкую к практике форму поверхности детали, которая может рассматриваться, как начальное приближение при отработке технологии процесса формообразования в реальных условиях.

**Ключевые слова:** обратная упругопластическая задача, формообразование, изгиб, оребренная панель, алюминиевый сплав, двойная знакопеременная кривизна

## Введение

Ряд деталей фюзеляжа и оперения современных летательных аппаратов изготавливаются из монолитных оребренных панелей, получаемых из плиты фрезерованием заготовки. Вопросы определения параметров процессов формообразования для придания теоретического контура изделию в условиях пластичности и ползучести являются актуальными в настоящее время [1–8]. Важной задачей остается разработка рациональных режимов деформирования, обеспечивающих минимальное упругое распружинивание заготовки после снятия нагрузок и учитывающих реальные свойства современных материалов.

Способы формообразования крупногабаритных пластин при пластичности и ползучести в условиях холодной и горячей обработки рассматриваются в патентах РФ № 1147471, 2056197, 2076010, 2216421, 2251464, 2336966, 2475322, патент США 5.345.799 и др. Технический образец модуля с электрическим приводом штоков, разработанный НовосибирНИАТ и ИГиЛ СО РАН, работает с 2006 г. на ОАО «НАПО им. В.П. Чкалова» и позволяет получать необходимую форму детали в условиях медленного деформирования за один технологический цикл [9]. Такой метод формообразования требует решения обратных задач по нахождению упреждающей геометрии контура и расчету статических и кинематических

параметров деформирования с учетом упругого восстановления исходя из заданного остаточного контура [10–14].

В данной работе рассматривается решение одной из таких обратных задач расчета упреждающей формы оснастки для технологии формообразования крупногабаритных деталей, выходящих на обводообразующую поверхность теоретического контура авиационных конструкций. Из анализа теоретического контура детали (рис. 1) следует, что ее геометрическая форма представляет собой сложную поверхность двойной кривизны, которая имеет зоны выпуклости,

соседствующие с зонами вогнутости. При формообразовании панели ребра жесткости будут находиться как в условиях растяжения, так и сжатия, что накладывает дополнительные трудности при использовании материалов, для которых характерны различия свойств при сжатии и растяжении. Более того, ребра жесткости заготовки панели находятся под углами к направлениям главных кривизн, что существенно затрудняет процесс деформирования, поскольку в такой ситуации ребра жесткости деформируются с поворотом плоскости ребра, т. е. возникают деформации кручения ребра.

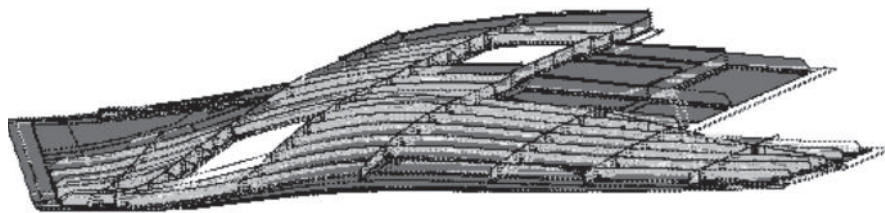


Рис. 1. Общий вид детали центроплана

### Экспериментальные исследования

Перед расчетом всей детали предварительно проведены тестовые расчеты упругопластического деформирования образцов Т-образного поперечного сечения, моделирующих деформирование ребра жесткости с присоединенной обшивкой в условиях чистого изгиба (рис. 2) и выполнено сравнение с результатами эксперимента. Образцы таврового сечения нагружались до возникновения зон пластических деформаций, а затем разгружались. В расчетах учитывались условия симметрии деформирования и рассматривалась расчетная схема консольного

защемления таврового образца. Использовано кинематическое нагружение. Узлам, лежащим на торце образца, сообщалось одно и то же значение прогиба  $w$  и продольные смещения  $u$ , линейно изменяющиеся по высоте поперечного сечения образца:

$$w = \frac{ML^2}{2EI}, \theta = \frac{ML}{EI}, u = y\theta.$$

Здесь  $M$  – изгибающий момент;  $L$  – длина консоли, равная половине длины образца;  $EI$  – изгибная жесткость;  $\theta$  – угол поворота сечения;  $y$  – поперечная координата, отсчитываемая от центра тяжести сечения.

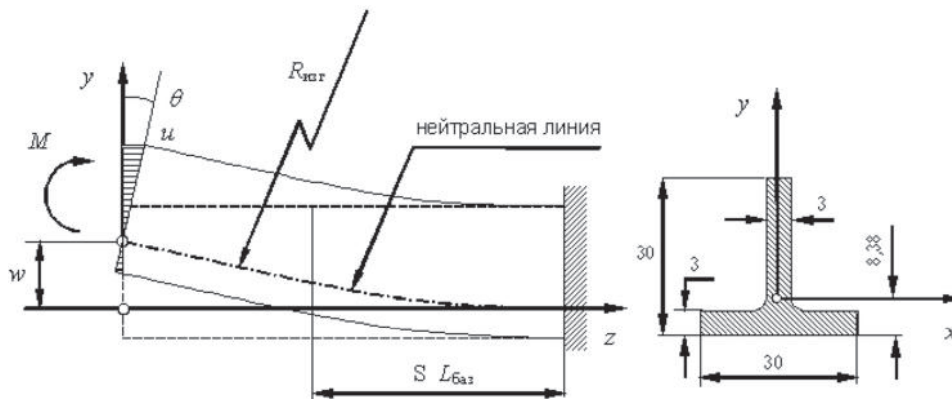


Рис. 2. Расчетная схема элемента таврового образца



Диаграммы деформирования для сплава АК4-1Т при температуре 195 °С получены при растяжении и сжатии образцов, изготовленных из плиты толщиной 42 мм [15, 16]. В качестве программы расчета использовался конечноэлементный комплекс ANSYS, в котором анизотропия и разносопротивляемость пластического деформирования может быть учтена с помощью опции «Anisotropic». Однако при этом кривая деформирования материала задается лишь приближенно с помощью билинейных зависимостей. Как показывают эксперименты, кривые деформирования материала при растяжении и сжатии носят плавный характер и не имеют площадок текучести, что затруднительно описать

билинейными зависимостями. В опции «Multi-linear Isotropic» характеристики материала при растяжении и сжатии считаются одинаковыми, но кривая деформирования может быть задана с высокой точностью с помощью кусочно-линейной зависимости. В расчетах была использована кусочно-линейная аппроксимация кривой деформирования, построенная по экспериментальным значениям, приведенным в табл. 1 и полученным при растяжении образцов. Модуль упругости  $E = 5,85 \times 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,25$ .

В табл. 2 приведены данные по испытаниям образцов в условиях чистого изгиба. Результаты расчета находятся в удовлетворительном соответствии с данными экспериментов.

Таблица 1

**Экспериментальные значения, полученные при растяжении образцов**

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7
$\varepsilon \times 10^3$	1,86	3,25	4,79	5,95	8,43	11,0	13,0
$\sigma$ , МПа	108,8	189,5	260,5	275,1	284,4	287,5	292,2

Таблица 2

**Результаты испытаний образцов в условиях чистого изгиба**

Номер образца	Радиус изгиба загрузки (по нейтральной оси), $R_{изг}$ , мм	Стрела прогиба на длине $L_{баз} = 100$ мм, $w$ , мм	Остаточная максимальная стрела прогиба на длине $L_{баз} = 300$ мм, $\tilde{w}$ , мм
1	2281,63	0,550	2,00
2	2281,63	0,550	1,92
3	2345,35	0,535	1,85
4	4041,04	0,310	0,42

### Теория и методы

С учетом результатов тестового расчета была подготовлена модель и выполнен расчет упреждающей формы оснастки для процесса формообразования оребренной панели в геометрически линейной постановке. Расчет был проведен с помощью модели упругопластического деформирования материала с изотропным упрочнением конечноэлементного комплекса ANSYS.

Конструкция представлена конечными элементами оболочки SHELL143. Четырехугольный элемент SHELL143 с 24 степенями сво-

боды предназначен для анализа нелинейного деформирования тонкостенных конструкций при малых упругопластических деформациях. При составлении расчетной модели (рис. 3) учтены основные конструктивные особенности панели (ребра жесткости, переменная толщина обшивки, вырезы прямоугольной формы) [17]. Модель состоит из 5869 элементов и 5776 узлов. Для исключения перемещений конструкции, как жесткого целого перемещения точек  $A$  (узел 6 на рис. 4),  $B$  (узел 29) и  $C$  (узел 125), задавались равными нулю. Узел 51 на рис. 4 (на рис. 3 этот узел отмечен как узел максимальных отклонений)

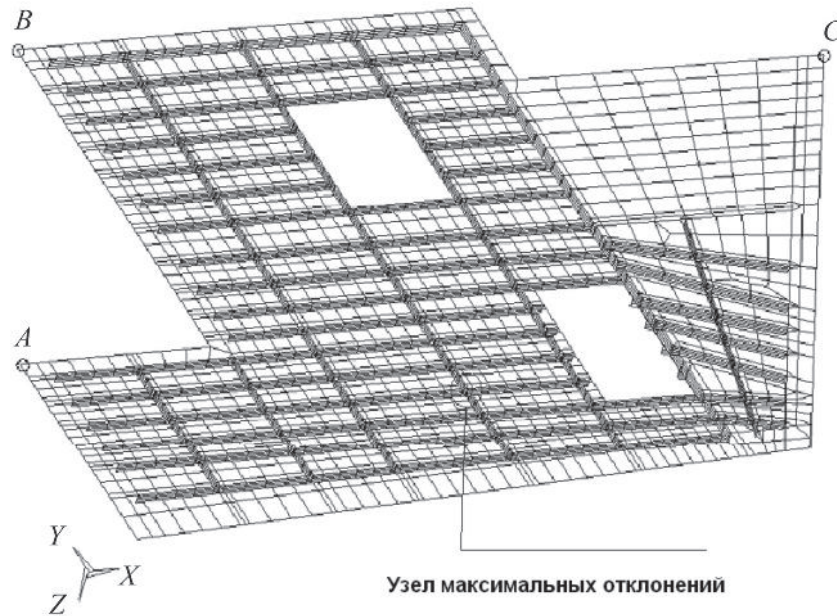


Рис. 3. Конечноэлементная модель панели

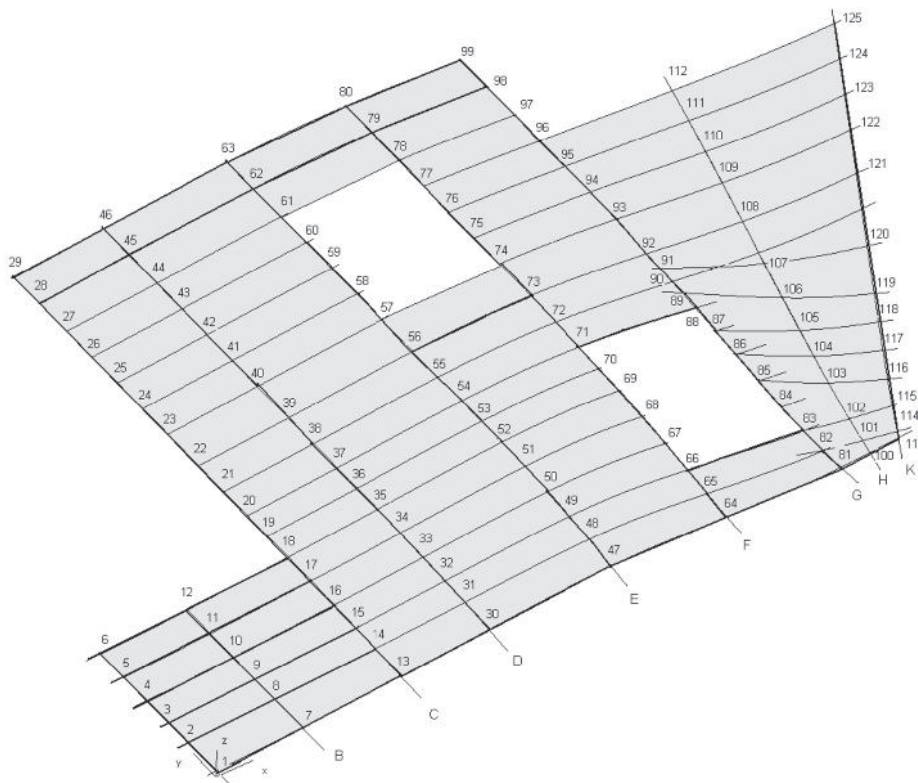


Рис. 4. Нумерация опорных точек

соответствует узлу, в котором теоретический контур панели имеет максимальные отклонения от плоскости панели, в которой находятся точки  $A, B, C$ .

Пластическое деформирование ребренной панели происходит в крайних волокнах ребер жесткости, где действуют растягивающие или сжимающие напряжения. При расчетах исполь-

зуется кусочно-линейная аппроксимация кривой деформирования материала, построенная по значениям из табл. 1. Поскольку определение поверхности упреждающего контура основано на ряде допущений и предположений относительно условий нагружения и деформирования, то результаты расчетов следует рассматривать лишь как приближение к искомому решению.

Расчетная схема вычислений включает в себя решение обратной задачи: найти такое поле перемещений, накладываемое на исходную плоскую конструкцию панели, чтобы после освобождения конструкции от заданных смещений (т. е. после снятия нагрузки) она приняла требуемую форму. Так как деформирование носит сложный нелинейный характер, для решения указанной обратной задачи используется итерационный метод, на каждом шаге которого решается соответствующая прямая задача. Вычислительный процесс на каждой итерации состоит из двух основных этапов. На первом этапе производится кинематическое нагружение с помощью задаваемого поля перемещений. На втором этапе конструкция освобождается от заданных перемещений и происходит разгрузка по упругому закону. Полученные на втором этапе остаточные прогибы сравниваются с требуемыми прогибами и вычисляется невязка, т. е. разность между требуемыми значениями прогибов и вычисленными значениями остаточных прогибов в каждом из узлов. На основе полученной невязки производится уточнение значений прогибов,

которые используются для следующего кинематического нагружения. Процесс повторяется до удовлетворения приемлемой точности решений. Алгоритм реализован с помощью управляющей программы (макроса), написанной на языке APDL (ANSYS Parametric Design Language). По полученным значениям  $z$  в узлах конечно-элементной схемы конструкции строится поверхность панели с использованием сплайновой аппроксимации в среде UNIGRAPHICS.

### Результаты и обсуждение

В табл. 3 приведены вычисленные распределения «нагружающих» прогибов  $w$  ( $z = w$ ), заданных остаточных прогибов  $\tilde{w}$  и остаточных прогибов  $\tilde{w}^n$  после  $n = 10$  итераций. При таком количестве итераций максимальное отклонение полученного контура от теоретического составило не более 1 мм. Результаты в виде упреждающего (нижние в сечениях  $A-K$  и правые в сечениях  $M-U$  линии) и теоретического контуров (верхние в сечениях  $A-K$  и левые в сечениях  $M-U$  линии) изображены на рис. 5 и 6.

Таблица 3

**Координаты опорных точек, упреждающий расчетный контур  $w$ , остаточный теоретический контур  $\tilde{w}$  и вычисленный остаточный контур  $\tilde{w}^n$  для = 10 итераций**

Номер точки	$X$ , мм	$Y$ , мм	$w$ , мм	$\tilde{w}^n$ , мм	$\tilde{w}$ , мм
1	-0,231	0,0	13,386	20,588	23,226
6	0,000	506,243	0,0	0,0	0,0
7	259,864	7,274	-3,094	27,645	29,017
12	260,163	507,415	0,077	13,973	13,807
13	559,118	15,991	6,149	39,917	39,820
21	559,683	789,117	12,450	28,509	28,628
29	560,193	1707,925	-3,157	-0,287	0,0
30	825,193	24,039	39,178	54,388	53,114
38	825,845	791,068	61,634	51,777	52,181
55	1196,219	797,587	137,859	84,419	84,674
63	1196,722	1712,611	103,014	55,579	58,016
64	1545,183	42,018	32,990	48,108	44,094
72	1546,288	797,983	154,963	90,218	90,064
80	1546,835	1713,345	115,060	64,322	67,516
81	1890,781	49,487	13,636	31,211	25,104
90	1891,632	790,884	84,865	49,585	48,905
99	1892,367	1711,468	68,873	41,954	45,525
113	2063,716	54,437	33,583	37,258	30,279
119	2312,387	523,090	-53,260	11,197	10,562
125	2765,391	1363,716	-3,740	-0,34	0,0

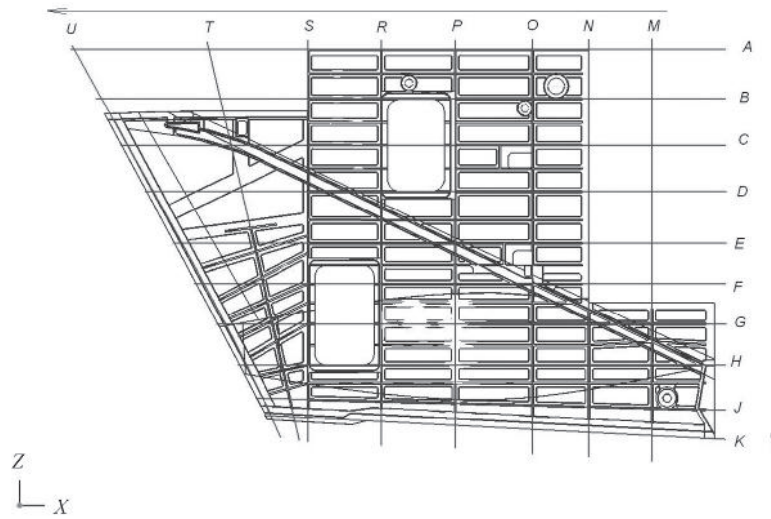


Рис. 5. Схема сечений контура оснастки (зеркальное отражение панели, изображенной на рис. 3 и 4)

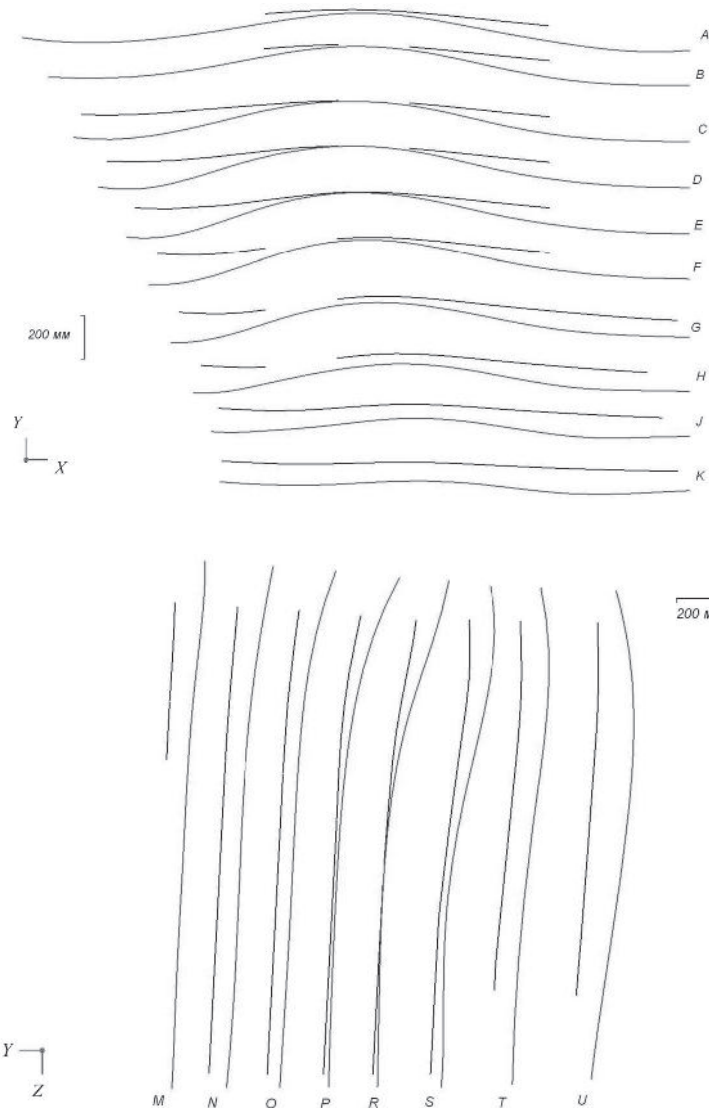


Рис. 6 Упреждающий контур (нижние в сечениях А-К и правые в сечениях М-У линии) и теоретический контур (верхние в сечениях А-К и левые в сечениях М-У линии)

## Выводы

Получение точной формы поверхности упреждающей формы оснастки с использованием расчетных методов и схем не представляется возможным в силу сложных нелинейных процессов упругопластического деформирования. Поэтому результаты данной работы могут рассматриваться как начальное приближение при технологической отработке процесса формообразования оребренных панелей в реальных условиях. Как показала практика при формообразовании ряда панелей, расчеты позволяют получить достаточно близкий к практике рабочий контур и далее с минимальной трудоемкостью довести этот контур до практической реализации. Выбранная модель деформирования представляется адекватной поставленной технологической задаче.

## Список литературы

1. *Guines D., Gavrus A., Ragneau E.* Numerical modeling of integrally stiffened structures forming from creep age forming technique // *International Journal of Material Forming*. – 2008. – Vol. 1, iss. 1, suppl. – P. 1071–1074. – doi: 10.1007/s12289-008-0204-z.
2. Springback evaluation in hot v-bending of Ti-6Al-4V alloy sheets / Yingying Zong, Po Liu, Bin Guo, Debin Shan // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 05 Sept. 2014. – doi: 10.1007/s00170-014-6190-z.
3. *Isakhanov G.V., Gulyar A.I., Maiboroda E.E.* Computer simulation of the processes of mechanical shaping of three-dimensional shells under the conditions of creep. Pt. 2 // *Strength of Materials*. – 1997. – Vol. 29, iss. 5. – P. 495–502. – doi: 10.1007/BF02767459. – [Translated from *Problemy Prochnosti*. – 1997. – N 5. – P. 69–77].
4. *Яковлев С.С., Ларин С.Н.* Правка растяжением листовой заготовки из анизотропного материала в режиме кратковременной ползучести // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2013. – № 7-2. – С. 223–231.
5. *Nepershin R.I.* Shaping a thin-walled cylindrical shell on a three-roll bending machine // *Mechanics of Solids*. – 2011. – Volume 46, iss. 4. – P. 554–562. – doi: 10.3103/S0025654411040066. – [Original Russian Text R.I. Nepershin, published in *Izvestiya Akademii Nauk. Mekhanika Tverdogo Tela*. – 2011. – N 4. – P. 75–84].
6. *Шавров И.А.* Повышение точности формообразования корпусных деталей судов из алюминиевых сплавов // *Судостроительная промышленность*.

Серия: Технология и организация производства. – 1989. – Вып. 14. – С. 1–11.

7. Технология формообразования крупногабаритных деталей из сплава 1561 в режиме сверхпластичности / Б.В. Горев, И.Д. Клопотов, И.А. Шавров, А.Л. Кузнецовский // *Судостроительная промышленность*. Серия: Технология и организация производства. – 1989. – Вып. 14. – С. 11–23.
8. *Горев Б.В., Веричев С.Н., Раевская Г.А.* К анализу формообразования оребренных панелей при медленных режимах деформирования // *Авиационная промышленность*. – 1990. – № 2. – С. 8–10.
9. *Горев Б.В., Соснин О.В., Загарин Ю.В.* Технология процесса формообразования деталей двойной знакопеременной кривизны в режиме ползучести и устройство для его осуществления // *Военная техника, вооружение и технологии двойного применения: материалы III Международного технологического конгресса, Омск, 7–10 июня 2005 г.: в 2 ч.* – Омск: Изд-во ОмГУ, 2005. – Ч. 1. – С. 117–119.
10. *Банищикова И.А., Горев Б.В., Цвелодуб И.Ю.* О ползучести пластин из алюминиевых сплавов при изгибе // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2007. – Т. 48, № 5 (285). – С. 156–159.
11. *Банищикова И.А., Цвелодуб И.Ю.* Об одном классе обратных задач формоизменения вязкоупругих пластин // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1996. – Т. 37, № 6. – С. 122–131.
12. Формообразование подкрепленных панелей двойной кривизны в условиях ползучести / И.В. Сухоруков, Б.В. Горев, И.Д. Клопотов, С.Н. Веричев // *Труды XVI международной конференции по теории оболочек и пластин*, 21–23 сент. 1993 г. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. ун-та. – 1994. – Т. 3. – С. 199–207.
13. *Annin B.D., Oleinikov A.I., Bormotin K.S.* Modeling of forming of wing panels of the SSJ-100 aircraft // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2010. – Т. 51, N 4. – P. 579–589. – doi: 10.1007/s10808-010-0074-2. – [Translated from *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaja fizika*. – 2010. – Т. 51, N 4. – P. 155–165.]
14. Shape and thickness optimization of an aeronautical structure manufactured using age creep forming process / J.-P. Bourdin, J.-P. Bonnafé, J. Delmotte, E. Grosjean, J.-M. Roelandt // *Integrated design and manufacturing in Mechanical Engineering '98: Proceedings of the 2nd IDMME Conference held in Compiègne, France, 27–29 May 1998*. – Dordrecht, Netherlands: Springer Science and Business Media, 1999. – P. 315–322. – doi: 10.1007/978-94-015-9198-0\_39.
15. Problem of processing materials by pressure under creepage conditions / B.V. Gorev, I.D. Klopotov, G.A. Raevskaya, O.V. Sosnin // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 1980. – Vol. 21, iss. 5. – P. 729–735. – doi: 10.1007/BF00910183. –

[Translated from Zhurnal prikladnoi mekhaniki i tekhnicheskoi fiziki. – 1980. – N 5. – P. 185–191].

16. Формообразование монолитных вафельных панелей из сплава АК4-1 в режиме ползучести. Типовой технологический процесс: ОСТ 1–42388–88. – Введ. 01.07.1989. – М.: НИИТ, 1989. – 15 с.

17. Веричев С.Н. Автоматизация проектирования геометрии рабочего контура при формообразовании монолитных панелей // Вопросы авиационной науки и техники. Серия: Авиационная технология. – 1988. – Вып. 2 (5). – С. 72–76.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(65), October – December 2014, Pages 85–93

### The shaping by bending of elements aircraft structures at plasticity conditions

Verichev S.N.<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), e-mail: kimt@ngs.ru

Gorev B.V.<sup>2</sup>, D.Sc. (Engineering), e-mail: GorevBV@yandex.ru

Banshchikova I.A.<sup>2</sup>, Ph.D. (Physics and Mathematics), e-mail: binna@ngs.ru

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

<sup>2</sup> Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the RAS, 15 Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

#### Abstract

The problem of inverse elastic-plastic calculation of predictive snap on the base of residual contour of the detail is solved with taking into account the elastic recovery after load removal for technology of shaping of large-sized finned panels. The form of the detail corresponds to a complex surface of double curvature with zones of convexity and concavity. Panel reinforcement ribs are under tension, compression and torsion during shaping. Preliminary test calculations of elastic-plastic bending at a temperature of 195 °C of the t-shaped cross-section samples of alloy AK4-1T cut from the plate with the thickness  $h = 42\text{mm}$  showed satisfactory compliance to the experimental data. Such samples bending is simulation of the deformation of the stiffener with attached aircraft skin. An iterative method of calculation using finite element package ANSYS allowed to get close enough to practice form of detail surface, which can be considered as an initial approximation for developing the technology of shaping process in real conditions.

#### Keywords:

inverse elastic-plastic problem, shaping, aluminum alloy, bending, double sign-variable curvature.

#### References

1. Guines D., Gavrus A., Ragneau E. Numerical modeling of integrally stiffened structures forming from creep age forming technique. *International Journal of Material Forming*, 2008, vol. 1, iss. 1, suppl., pp. 1071–1074. doi: 10.1007/s12289-008-0204-z
2. Yingying Zong, Po Liu, Bin Guo, Debin Shan. Springback evaluation in hot v-bending of Ti-6Al-4V alloy sheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, Published online. doi: 10.1007/s00170-014-6190-z
3. Isakhanov G.V., Gulyar A.I., Maiboroda E.E. Computer simulation of the processes of mechanical shaping of three-dimensional shells under the conditions of creep. Pt. 2. *Strength of Materials*, 1997, vol. 29, iss. 5, pp. 495–502. doi: 10.1007/BF02767459
4. Yakovlev S.S., Larin S.N. Pravka rastyazheniem listovoi zagotovki iz anizotropnogo materiala v rezhime kratkovremennoi polzuchesti [Editing by stretching of sheet preparation from the anisotropic material in the mode of short-term creep]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki – Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*, 2013, no. 7-2, pp. 223–231.

5. Nepershin R.I. Shaping a thin-walled cylindrical shell on a three-roll bending machine. *Mechanics of Solids*, 2011, vol. 46, iss. 4, pp. 554–562. doi: 10.3103/S0025654411040066
6. Shavrov I.A. Povyshenie tochnosti formoobrazovaniya korpusnykh detalei sudov iz alyuminievykh splavov [Increasing the accuracy of shaping of hull details ship from aluminum alloys]. *Sudostroitel'naya promyshlennost'. Seriya: Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva – Shipbuilding Industry. Series: Technology and Organization of Production*, 1989, iss. 14, pp. 1–11.
7. Gorev B.V., Klopotov I.D., Shavrov I.A., Kuznetsovskii A.L. Tekhnologiya formoobrazovaniya krupnogabaritnykh detalei iz splava 1561 v rezhime sverkhplastichnosti [Technology shaping of large-size details of alloy 1561 at superplasticity]. *Sudostroitel'naya promyshlennost'. Seriya: Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva – Shipbuilding Industry. Series: Technology and Organization of Production*, 1989, iss. 14, pp. 11–23.
8. Gorev B.V., Verichev S.N., Raevskaya G.A. K analizu formoobrazovaniya orebrennykh panelei pri medlennykh rezhimakh deformirovaniya [Analyze of shaping of ribbed panels at slow deformation modes]. *Aviatsionnaya promyshlennost' – Aircraft industry*, 1990, no. 2, pp. 8–10.
9. Gorev B.V., Sosnin O.V., Zagarin Yu.V. [Technology process shaping of sign-variable double curvature details at creep mode and device for its implementation]. *Materialy III Mezhdunarodnogo tekhnologicheskogo kongressa "Voennaya tekhnika, voozuzhenie i tekhnologii dvojnogo primeneniya"* [Proceedings of the III International Congress of Technology "Military Equipment, Arms and Dual-use Technology"]. Omsk, 2005, pt. 1, pp. 117–119.
10. Banshchikova I.A., Gorev B.V., Tselodub I.Yu. O polzuchesti plastin iz alyuminievykh splavov pri izgibe [Creep of plates made of aluminum alloys under bending]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2007, vol. 48, no. 5, pp. 156–159. (In Russian)
11. Banshchikova I.A., Tselodub I.Yu. Ob odnom klasse obratnykh zadach formoizmeneniya vyzkouprugikh plastin [On one class of inverse problems of variation in shape of viscoelastic plates]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1996, vol. 37, no. 6, pp. 122–131. (In Russian)
12. Sukhorukov I.V., Gorev B.V., Klopotov I.D., Verichev S.N. [Forming reinforced panels double curvature under creep conditions]. *Trudy XVI mezhdunarodnoi konferentsii po teorii obolochek i plastin* [Proceedings of the XVI International Conference "Theory of Shells and Plates"]. Nizhny Novgorod, 1994, vol. 3, pp. 199–207.
13. Annin B.D., Oleinikov A.I., Bormotin K.S. Modeling of forming of wing panels of the SSJ-100 aircraft. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2010, vol. 51, iss. 4, pp. 579–589. doi: 10.1007/s10808-010-0074-2
14. Bourdin J.-P., Bonnafé J.-P., Delmotte J., Grosjean E., Roelandt J.-M. Shape and Thickness Optimization of an Aeronautical Structure Manufactured Using Age Creep Forming Process. *Integrated design and manufacturing in Mechanical Engineering '98*. Proceedings of the 2nd IDMME Conference held in Compiègne, France, 27–29 May 1998, Dordrecht, Netherlands, Springer Science and Business Media, 1999, pp. 315–322. doi: 10.1007/978-94-015-9198-0\_39
15. Gorev B.V., Klopotov I.D., Raevskaya G.A., Sosnin O.V. Problem of processing materials by pressure under creepage conditions. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1980, vol. 21, iss. 5, pp. 729–735. doi: 10.1007/BF00910183
16. Branch Standard 1-42388-88. Shaping of monolithic waffle panels AK4-1 alloy at creep. Typical technological process. Moscow, NIAT Publ., 1989. 15 p.
17. Verichev S.H. Avtomatizatsiya proektirovaniya geometrii rabocheho kontura pri formoobrazovanii monolitnykh panelei [Computer aided design at shaping of the working geometry monolithic panels]. *Voprosy aviatsionnoi nauki i tekhniki. Seriya: Aviatsionnaya tekhnologiya – Aviation Science and Technology. Series: Aviation Technology*, 1988, iss. 2 (5), pp. 72–76.

Received 24 October 2014

Revised 10 November 2014

Accepted 15 November 2014

## 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.

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

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

В тексте авторского резюме следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, 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.

*II Международная научно-практическая конференция*  
**«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ»**

*II International Scientific and Practical Conference*  
**“ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING”**

**25 Марта/March 2015 г.**

25 марта 2015 г. с 10-30 до 17-00 ч. – общее заседание в конференц-зале «ITE Сибирь» в рамках Международной выставки машиностроения и металлообработки MASHEX SIBERIA по адресу: г. Новосибирск, ул. Станционная, 104, МВК «Новосибирск Экспоцентр».

***Тематика конференции***

- Инновационные технологии в машиностроении;
- Технологическое оборудование, оснастка и инструменты;
- Материаловедение в машиностроении;
- Экономика и организация инновационных процессов в машиностроении.

***Организаторы конференции***

*Hochschule RheinMain University of Applied Sciences, Leibniz Universität Hannover*, Донбасская государственная машиностроительная академия, Беларуский национальный технический университет, Новосибирский государственный технический университет, ОАО НПП и ЭИ «Оргстанкинпром», ООО НПКФ «Машсервисприбор», научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов», МВЦ «ITE Сибирская Ярмарка», Кузбасский государственный технический университет, Кузбасское региональное отделение РАЕ, Сибирский государственный индустриальный университет, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Бийский технологический институт АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томский политехнический университет, Братский государственный университет

***Организационный комитет***

➤ **Батаев А.А.**, главный редактор научно-технического и производственного журнала «Обработка металлов», профессор, д.т.н., проректор НГТУ, (г. Новосибирск), **сопредседатель.**

➤ **Коротков А.Н.**, академик РАЕ, профессор, д.т.н., КузГТУ (г. Кемерово), **сопредседатель.**

**Члены оргкомитета:** **Монико Грайф**, профессор, доктор, Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук (г. Рюссельсхайм), **Томас Хассел**, профессор, доктор, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница (г. Гарбсен), **Флориан Нюрнбергер**, профессор, доктор, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница (г. Гарбсен), **Ковалевский С.В.**, проректор ДГМА (г. Краматорск), **Пантелеенко Ф.И.**, профессор, д.т.н., член-корреспондент НАН Беларуси, БНТУ (г. Минск), **Атапин В.Г.**, зам. главного редактора журнала «Обработка металлов», профессор, д.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), **Афанасьев В.К.**, академик РАЕН, профессор, д.т.н., зав. каф. СибГИУ (г. Новокузнецк), **Буров В.Г.**, профессор, к.т.н., декан факультета НГТУ (г. Новосибирск), **Герасенко А.Н.**, директор ООО НПКФ «Машсервисприбор» (г. Новосибирск), **Гурьев А.М.**, профессор, д.т.н., зав. каф. АлтГТУ (г. Барнаул), **Кирсанов С.В.**, профессор, д.т.н., ТПУ (г. Томск), **Косов В.В.**, зам. ген. директора ОАО «Первый Кемеровский авторемонтный завод» (г. Кемерово), **Марков А.М.**, профессор, д.т.н., зав. каф. АлтГТУ (г. Барнаул), **Мещерякова Н.А.**, директор выставки, МВЦ «ITE Сибирская Ярмарка» (г. Новосибирск), **Овчаренко А.Г.**, профессор, д.т.н., зав. каф. БТИ АлтГТУ (г. Бийск), **Рахимьянов Х.М.**, профессор, д.т.н., зав. каф. НГТУ (г. Новосибирск), **Скиба В.Ю.**, зам. главного редактора журнала «Обработка металлов», доцент, к.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), **Татаркин Е.Ю.**, профессор, д.т.н., зав. каф. АлтГТУ (г. Барнаул), **Янюшкин А.С.**, профессор, д.т.н., член-корреспондент САН ВШ, академик МАН ВШ, зав. каф. БГУ (г. Братск)

Для участия в конференции и выпуска сборника тезисов докладов необходимо выслать в адрес оргкомитета в срок до **20 февраля 2015 г.** следующие материалы:

- заявку на участие, где указать фамилию, имя и отчество, должность, ученую степень, звание, название организации, адрес, телефон, факс, e-mail, необходимость предоставления гостиницы;
- тезисы доклада с указанием необходимого демонстрационного оборудования.

Сканированные **лицензионный договор** с подписями авторов, **экспертное заключение** и **заключение внутривузовской комиссии по экспортному контролю** (цветной режим сканирования, разрешение не менее 300 dpi) прикрепляются к электронному письму, а **оригиналы данных документов высылаются на почтовый адрес редакции.**

### **Требования к оформлению материалов**

• Объем до шести машинописных страниц, *Microsoft Word*; формат А4 (210×297 мм); ориентация – книжная, все поля 2 см; без переносов; шрифт *Times New Roman*, размер шрифта основного текста – 14 пт, через 1 интервал, абзацный отступ – 1,25 см, страницы не нумеруются. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть включены в текст работы.

• **Структура публикации:** 1. Заглавие. 2. Аннотация. 3. Ключевые слова. 4. Введение. 5. Теория (для теоретических работ) или методика экспериментального исследования (для экспериментальных работ). 6. Результаты и обсуждение. 7. Выводы. 8. Список литературы. 9. Англоязычный блок.

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

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

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

• **Рисунки.** Рекомендуемые размеры: 60 × 150, 60 × 70 мм с разрешением не менее **300 dpi**.

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

• **Англоязычный блок** должен включать следующую информацию: заглавие работы; фамилия И.О. (всех авторов); аффилиация всех авторов; аннотация (Abstract) 100–150 слов; ключевые слова (*Keywords*).

• Материалы высылаются электронной почтой.

Статьи будут изданы в авторской редакции отдельным сборником. **Участие в конференции бесплатное.**

### **Материалы, присланные после 20 февраля 2015 года, к опубликованию не принимаются**

**Внимание!** В данный момент ведутся переговоры с издательством *Trans Tech Publications* о предоставлении возможности опубликования рекомендованных оргкомитетом материалов конференции в журнале “*Applied Mechanics and Materials*” (журнал включен в глобальные индексы цитирования Scopus). За дополнительной информацией следите на сайте конференции <http://machine-building.conf.nstu.ru/> и на сайте журнала [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metalloy](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metalloy).

**Адрес для направления материалов конференции:** e-mail: metal\_working@mail.ru

Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корп. 5, к. 274

Новосибирский государственный технический университет,  
заместители главного редактора журнала «Обработка металлов»:

*Атапин Владимир Григорьевич*, тел. (383) 346-17-77

*Скиба Вадим Юрьевич*, тел. (383) 346-17-79



## Пример оформления статьи

УДК 621.9.06:518.4

### ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**В.Г. ИВАНОВ**<sup>1</sup>, доктор техн. наук, профессор,  
**В.С. ПЕТРОВ**<sup>2</sup>, аспирант,  
(<sup>1</sup> НГТУ, г. Новосибирск, <sup>2</sup> БрГУ, г. Братск)

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

#### Аннотация

#### Ключевые слова

<желательная структура текста представляемого материала >

#### 1. Введение

2. Теория или методика экспериментального исследования или материалы и методы и др.

#### 3. Результаты и обсуждение

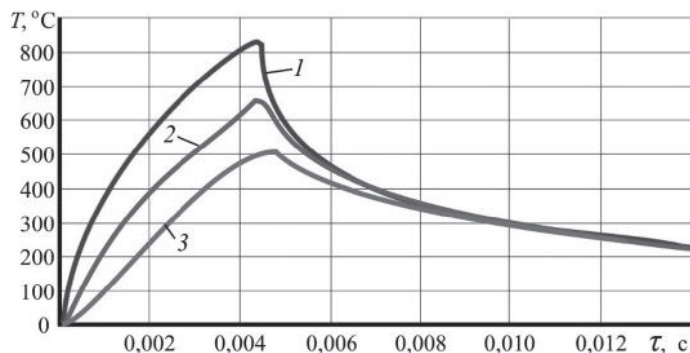


Рис. 1. Пример оформления рисунка

Таблица 1

#### Пример оформления таблицы

Зерни- стость, $Z$	$\sigma_{\varepsilon} \times \alpha_{\varepsilon}$ , $\text{мм}^{-1}$	$A_{\text{ср}} \times 10^{-3}$ $\text{кгс} \times \text{мм}$	Износ гранул, $I$ , г	Интенсив- ность износа, $J$ , г/мин	Износостой- кость, $\gamma \times 10^{-2}$	Коэффициенты пропорциональности	
						$\gamma/A_{\text{ср}}$	$\gamma/\sigma_{\varepsilon} \times \alpha_{\varepsilon} \times 10^{-2}$
	4,138	1,698	650	10,833	9,231	54,36	2,231
12	6,317	2,593	430	7,167	13,958	53,83	2,209

#### 4. Выводы

#### 5. Список литературы

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

**Ivanov V.G.**<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: [ivanov@mail.ru](mailto:ivanov@mail.ru)

**Petrov V.S.**<sup>2</sup>, Post-graduate Student, e-mail: [petrov@gmail.com](mailto:petrov@gmail.com)

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

<sup>2</sup> Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

**Abstract** (100–150 слов)

#### Keywords

## Пример оформления лицензионного договора

### Лицензионный договор

на публикацию статьи «Выбор конструктивных параметров базовых деталей на этапе проектирования» (авторы В.Г. Иванов, В.С. Петров, ..... ) в сборнике материалов международной конференции «Актуальные проблемы в машиностроении»

**1. Автор с момента заключения настоящего договора передает Издателю на безвозмездной основе права на издание произведения (далее – Статья), одобренного и принятого к опубликованию редколлегией (редакцией) сборника «Актуальные проблемы в машиностроении» (далее – Сборник) на срок – до выхода Сборника со Статьей Автора в свет печатном и (или) электронном виде и его использования и распространения по подписке или отдельным заказам на территории России и всего мира.**

**2. В соответствии с настоящим договором права использования Статьи, предоставленные Автором Издателю, включают:**

2.1 Анонсирование (предварительное оповещение или публичное сообщение сведений о произведении), аннотирование (краткое изложение содержания и иных сопутствующих сведений) и рекламу Статьи в Сборнике и иных средствах массовой информации, в том числе путем публикации фрагментов Статьи за счет Издателя;

2.2 Использование Статьи в электронной (цифровой) форме в базах данных Издателя, в том числе в электронно-библиотечной системе НГТУ, в том числе в сети Интернет со свободным или ограниченным доступом пользователей.

3. Автор гарантирует, что:

3.1 Рукопись является оригинальной работой автора с соавторами (если таковые имеются) и никогда не была опубликована в представленном виде;

3.2. Он имеет согласие всех соавторов Статьи, права на издание и распространение которой передаются Издателю по настоящему договору;

3.3 Он не публиковал Статью в объеме более 50% в других печатных и (или) электронных изданиях, кроме публикации Статьи в виде препринта;

3.4 Статья содержит все предусмотренные действующим законодательством об авторском праве ссылки на цитируемых авторов и (или) издания, а также используемые в статье результаты и факты, полученные другими авторами или организациями.

3.5 Статья не включает материалы, не подлежащие опубликованию в открытой печати, в соответствии с действующими нормативными актами.

**4. Автор обязуется:**

4.1 Внести в текст статьи исправления, предложенные рецензентами и принятые редколлегией Сборника;

4.2 Читать корректуру статьи в сроки, предусмотренные графиком выхода Сборника;

4.3 Не публиковать статью в объеме более 50 % в других печатных и (или) электронных изданиях до выхода в свет Сборника со статьей Автора, являющейся предметом настоящего договора;

4.4 Представить оригинал Статьи в электронном виде с распечаткой на бумаге, а в случае отсутствия таких возможностей – в форме, согласованной с редакцией Сборника;

4.5 Вносить в корректуру Статьи только тот минимум правки, который связан с необходимостью исправления допущенных в оригинале Статьи ошибок и (или) внесения фактографических изменений;

4.6 Не использовать в коммерческих целях и в других изданиях без согласия Издателя электронный оригинал-макет Статьи, подготовленный Издателем, в случае его передачи Автору;

**5. Издатель обязуется:**

5.1. За свой счет обеспечить рецензирование Статьи, научное, литературное и художественно-техническое редактирование, изготовление и (или) обработку иллюстративного материала, изготовление бумажного и электронного оригинала-макета, полиграфическое воспроизведение Сборника со статьей Автора и его распространение в соответствии с условиями настоящего договора, а также проведение подписной кампании и сбору заявок на тираж Сборника, включая рекламные мероприятия;

5.2 Согласовать с Автором вносимую в Статью правку с учетом условий пп. 3.4 и 4.1 настоящего договора;

5.3 Предоставить Автору корректуру верстки Статьи и внести обоснованную правку в нее с учетом условий п. 4.5 настоящего договора.

**6. Издатель гарантирует, что без согласия Автора:**

6.1 Не будет использовать Статью или ее отдельные части ни в одном из других печатных и (или) электронных изданий;

6.2 Не передаст права на опубликование Статьи, бумажный или электронный оригинал-макет третьей стороне.



**7. Издатель имеет право:**

7.1 Допечатывать тираж Сборника со Статьей Автора при поступлении дополнительных заявок;

7.2 Настоящий договор вступает в силу с момента решения редколлегии Сборника о принятии Статьи для публикации в Сборнике.

Если Статья не принята к публикации, настоящий договор не вступает в силу, и Издатель извещает об этом Автора в течение 45 календарных дней.

Авторы:

 / В.Г. Иванов /  / В.С. Петров /

Дата: 1 февраля 2015 года

# МЕДИАКИТ ЖУРНАЛА

О ЖУРНАЛЕ

МЕДИАКИТ



Ежеквартальный научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» публикует:

- материалы о прогрессивном оборудовании и инструментах для металло- и деревообработки, слесарно-монтажных, строительных и малярных работах, о достижениях в области их разработки и авангардных технологиях производства, а также о проблемах экономики и организации производства, подготовки специалистов и повышения их квалификации;

- результаты научных исследований докторов и кандидатов наук, аспирантов, магистров техники и технологии по следующим научным направлениям: 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). Присутствуют разделы: «Технология», «Оборудование», «Инструменты», «Материаловедение», «Труды конференции», «Научно-техническая информация» и др.

**Научно-технические статьи**, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование.

Публикация статей **бесплатная**.

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).

Дата основания:

1998 г. – Инструмент Сибири; с 2001 г. – Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты).

Свидетельство о регистрации средств массовой информации ПИ № ФС77-23961 от 05 апреля 2006 г. ISSN 1994-6309.

Учредители журнала:

- ОАО Новосибирский проектно-технологический и экспериментальный институт «Оргстанкинпром»;
- Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»;

- ООО Научно-производственная коммерческая фирма «Машсервисприбор».

**Издатель:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Новосибирский государственный технический университет»;

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.



## Технические характеристики журнала:

- Периодичность – 4 раза в год (1 раз в квартал)
- Язык – русский
- Объем – до 200 страниц
- Формат – А4 (210 x 297 мм)
- Тираж – до 500 экз



## 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)

- 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)



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/>



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.

