

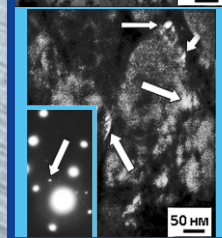
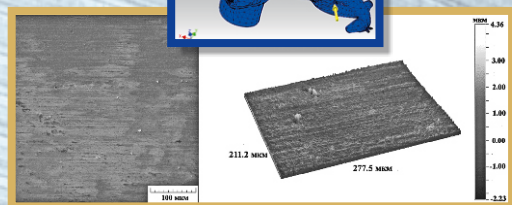
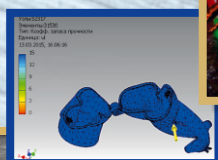
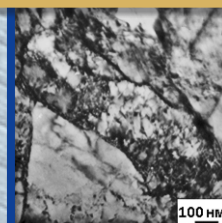
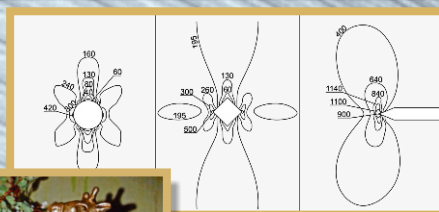
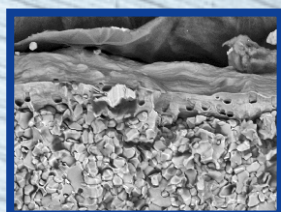
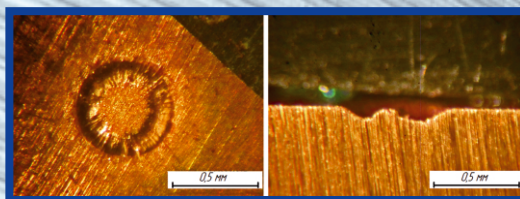
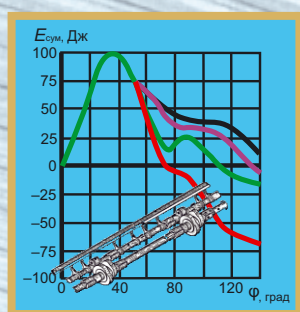
# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ISSN 1994-6309

ТЕХНОЛОГИЯ  
ОБОРУДОВАНИЕ  
ИНСТРУМЕНТЫ

№ 2 (75) АПРЕЛЬ–ИЮНЬ 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



НОВОСИБИРСК



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

С 28 по 31 марта компания «ИТЕ Сибирь» провела в Новосибирском Экспоцентре 19-ю выставку оборудования для металлообработки и сварки Masheх Siberia 2017 – наиболее значимое событие отрасли за Уралом. Выставка является инструментом для технического перевооружения предприятий Сибирского Федерального округа и создает условия для опережающего развития машиностроительного комплекса. На выставке демонстрировались новинки отрасли, что способствует внедрению инноваций в производство, обновлению основных фондов предприятий и повышению их конкурентоспособности. В выставке приняли участие 87 компаний из 17 регионов РФ, а также из Германии, Китая и Республики Беларусь. Среди участников выставки были такие известные производители технологического оборудования, как Kaindl Schleiftechnik, «Альфа Инжиниринг», «Армиг», «Измерительные технологии» (УК «МЕАТЭК»), «Кнут Индустрия», «Мир сварки», «Перитон-Красноярск», «Пром-Ойл», «ПроТехнологии», «Пумори-инжиниринг инвест», ПТО «Станкозавод», «СтанкоМашСиб», «УК Абамет», «Алтервиа», «Галика АГ», «Интехсервис», «КЕВ-РУС», «Прима Пауэр», «ИПЦ «Пегас», «Роланд ДГ РУС», «Точные машины», Steel Tailor, «Алтайский завод агрегатов», «ИТС-Сибирь», «ПромИнжиниринг», «Термакат», «Центр сварки», «Битван», «Барус», «ВЕДО-инструмент», «Клингспор», «Ренишоу», «РИД-СПБ», «Спецтехинструмент», «ХардМеталл», «Эмуге-Франкен» и другие. За четыре дня выставку посетили 2735 человек, большинство из которых составляли представители Новосибирской, Кемеровской, Томской областей и Алтайского края.

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

Открыл конференцию и выступил с приветственным словом декан механико-технологического факультета НГТУ В.В. Янпольский. В своем выступлении Василий Васильевич выразил надежду, что конференция внесет значительный вклад в развитие технической науки и решение её актуальных проблем. Успехов в проведении конференции и творческих достижений пожелали участникам члены программного и организационного комитетов: А.Н. Коротков, академик РАН, профессор, д.т.н., КузГТУ; В.Г. Атапин, профессор, д.т.н., НГТУ; и В.Ю. Скиба, зам. гл. редактора журнала «Обработка металлов», доцент, к.т.н., НГТУ (г. Новосибирск).

На конференции были рассмотрены вопросы взаимодействия науки и промышленных предприятий, совершенствования технологии производства деталей машин, создания и исследования передовых конструкционных материалов, инновационных и инвестиционных подходов в промышленности. В конференции приняли участие более 230 представителей отечественной и зарубежной промышленности, научно-исследовательские институты и вузы Италии, Китая, Германии, Республики Беларусь, Украины и России.

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

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

Материалы конференции опубликованы в периодических журналах «Обработка металлов (технология · оборудование · инструменты)» (ВАК, РИНЦ) и «Актуальные проблемы в машиностроении» (РИНЦ).



# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

## ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309

№ 2 (75) АПРЕЛЬ–ИЮНЬ 2017 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

#### Председатель совета

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

#### Члены совета

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

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

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

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

*Российская Федерация:* **Анисименко Г.Е.**, директор производственно-технической фирмы «Сигма-инструмент», г. Новосибирск, **Атапин В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Балков В.П.**, зам. ген.директора АО «ВНИИинструмент», канд. техн. наук, г. Москва, **Батаев В.А.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Бузов В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Герасенко А.Н.**, директор ООО НПКФ «Машсервисприбор», г. Новосибирск, **Кирсанов С.В.**, доктор техн. наук, профессор, ТПУ, г. Томск, **Коротков А.Н.**, доктор техн. наук, профессор, академик РАН, КузГТУ, г. Кемерово, **Кудряшов Е.А.**, доктор техн. наук, профессор, Засл. деятель науки РФ, ЮЗГУ, г. Курск, **Лобанов Д.В.**, доктор техн. наук, доцент, БрГУ, г. Братск, **Макаров А.В.**, доктор техн. наук, с.н.с., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург, **Овчаренко А.Г.**, доктор техн. наук, профессор, БТИ АлтГТУ, г. Бийск, **Рахимьянов Х.М.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Сараев Ю.Н.**, доктор техн. наук, профессор, ИФПМ СО РАН, г. Томск, **Янюшкин А.С.**, доктор техн. наук, профессор, БрГУ, г. Братск

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

Полный текст журнала «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» теперь можно найти в базах данных компании EBSCO Publishing) на платформе EBSCOhost. EBSCO Publishing является ведущим мировым агрегатором научных и популярных изданий, а также электронных и аудио книг.

#### СОУЧРЕДИТЕЛИ

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

#### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

#### ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

**Иванцовский Владимир Владимирович** – доцент,  
доктор технических наук.

**Скиба Вадим Юрьевич** – доцент, кандидат технических наук

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

#### ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

#### ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

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

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

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

Индекс: **70590** («РОСПЕЧАТЬ»)

#### Адрес редакции:

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

Тел. (383) 346-17-79

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

Цена свободная

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

*За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.*

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНОЛОГИЯ

<b>Рахимьянов Х.М., Василевская С.И.</b> Особенности формообразования малых отверстий в меди при электрохимической обработке в водных хлоридных растворах.....	6
--	---

### ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

<b>Подгорный Ю.И., Скиба В.Ю., Кириллов А.В., Максимчук О.В., Скиба П.Ю.</b> Проектирование кулачкового механизма с учётом технологической нагрузки и энергетических затрат.....	17
<b>Веселова Ю.В., Ложкина Е.А., Федосеева И.А.</b> Проектирование и изготовление декоративной шкатулки из металла.....	28

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<b>Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Кондратова О.А., Белов Е.Г., Костерев В.Б.</b> Формирование механических свойств поверхности низкоуглеродистой стали при термомеханическом упрочнении.....	38
<b>Дудина Д.В.</b> Электроискровое спекание смесей металлических порошков и композитов с металлическими матрицами: особенности формирования структуры и свойства спеченных материалов.....	45
<b>Макаров А.В., Гаврилов Н.В., Самойлова Г.В., Мамаев А.С., Осинцева А.Л., Саврай Р.А.</b> Влияние непрерывного и газоциклического плазменного азотирования на качество наноструктурированной поверхности аустенитной нержавеющей стали.....	55
<b>Попелюх А.И., Веселов С.В., Мункуева Д.Д., Тимонин В.В., Карпов В.Н.</b> Влияние неметаллических включений на сопротивление стали разрушению при многократном динамическом сжатии.....	67
Рекомендации по написанию научной статьи .....	79
Подготовка аннотации .....	82
Правила для авторов .....	85

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 25.05.2017. Выход в свет 15.06.2017. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
 Усл. печ.л. 11,5. Уч.-изд. л. 21,39. Изд. № 134. Заказ 736. Тираж 300 экз.

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



# BRABOTKA OMETALLOV METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

ISSN 1994-6309

Journal no.2 (75) April–June 2017

## EDITORIAL BOARD

### EDITOR-IN-CHIEF:

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

### DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

### Editor of the English translation:

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

The magazine is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year

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

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

Edition address: Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,  
Novosibirsk, 630073, Russia  
Tel.: (383) 346-17-79  
[http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)  
E-mail: [metal\\_working@mail.ru](mailto:metal_working@mail.ru)

## EDITORIAL COUNCIL

## CHAIRMAN:

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

## MEMBERS:

*The Federative Republic of Brazil:*

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

*The Federal Republic of Germany:*

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

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

**Thomas Hassel**, Dr.-Ing.,  
Head of Underwater Technology Center Hanover,  
Leibniz Universität Hannover, *Garbsen*

*The Republic of Belarus:*

**Fyodor I. Panteleenko**, D.Sc. (Engineering), Professor,  
First Vice-Rector, Corresponding Member of National Academy of Sciences of Belarus,  
Belarusian National Technical University, *Minsk*

*The Ukraine:*

**Sergiy V. Kovalevskyy**, D.Sc. (Engineering), Professor,  
Vice Rector for Research and Academic Affairs,  
Donbass State Engineering Academy, *Kramatorsk*

*The Russian Federation:*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Dmitry V. Lobanov**, D.Sc. (Engineering), Associate Professor,  
Department of Machine-building technology,  
Bratsk State University, *Bratsk*;

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

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

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

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

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



## CONTENTS

### TECHNOLOGY

<b>Rakhimyanov Kh.M., Vasilevskaya S.I.</b> Features of small holes formation in copper by electrochemical machining in water chloride solutions.....	6
---	---

### EQUIPMENT. INSTRUMENTS

<b>Podgornyj Yu.I., Skeebe V.Yu., Kirillov A.V., Maksimchuk O.V., Skeebe P.Yu.</b> Cam mechanism designing with account of the technological load and energy costs.....	17
<b>Veselova Yu.V., Lozhkina E.A., Fedoseeva I.A.</b> Design and manufacture of decorative metal box.....	28

### MATERIAL SCIENCE

<b>Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kondratova O.A., Belov E.G., Kosterev V.B.</b> Formation of mechanical properties of low alloy steel surface under thermomechanical treatment.....	38
<b>Dudina D.V.</b> Spark Plasma Sintering of the mixtures of metallic powders and metal matrix composites: Peculiarities of the structure formation and properties of the sintered materials.....	45
<b>Makarov A.V., Gavrilov N.V., Samoylova G.V., Mamaev A.S., Osintseva A.L., Savrai R.A.</b> Effect of a continuous and gas-cyclic plasma nitriding on the quality of nanostructured austenitic stainless steel.....	55
<b>Popelyukh A.I., Veselov S.V., Munkueva D.D., Timonin V.V., Karpov V.N.</b> Influence of nonmetallic inclusions on the fracture resistance of steel under fatigue dynamic compression conditions.....	67
Guidelines for Writing a Scientific Paper .....	79
Abstract requirements .....	82
Rules for authors .....	85

# ОСОБЕННОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МАЛЫХ ОТВЕРСТИЙ В МЕДИ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ В ВОДНЫХ ХЛОРИДНЫХ РАСТВОРАХ

*Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор  
С.И. ВАСИЛЕВСКАЯ, ассистент  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 6 марта 2017

Рецензирование 10 апреля 2017

Принята к печати 10 мая 2017

**Рахимьянов Х.М.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: x.rakhimyanov@corp.nstu.ru

Рассмотрены вопросы назначения величины межэлектродного промежутка (МЭП) при электрохимической размерной обработке (ЭХРО) отверстий малого диаметра в хлоридных растворах обработки меди полым катодом – инструментом с соотношением внутреннего и наружного диаметра 0,26 / 0,46 мм. Установлено, что при прошивке отверстий на малых межэлектродных промежутках (0,05...0,1 мм) с давлением струи электролита  $P = 0,3$  МПа не обеспечивается точность копирования инструмента. Это объясняется тем, что ЭХРО меди в хлоридных растворах сопровождается образованием на поверхности труднорастворимой соли  $\text{CuCl}$ , препятствующей электрохимическому растворению металла под торцом катода-инструмента. Точность копирования инструмента на обрабатываемой поверхности достигается при увеличении МЭП до 0,2 мм. Однако увеличение МЭП приводит к снижению локализации процесса анодного растворения и, следовательно, к уменьшению скорости прошивки отверстия. Показано, что повышение давления струи электролита до 0,8 МПа при величине МЭП от 0,05 до 0,1 мм гарантирует точность формообразования отверстия. Отмечено, что повышение давления струи электролита интенсифицирует процесс депассивации анодной поверхности, что обеспечивает возможность обработки при малом значении МЭП с высокой степенью локализации процесса. Установлено, что при величинах МЭП, равных 0,3 мм при  $P = 0,3$  МПа и 0,1 мм при  $P = 0,8$  МПа, возможна реализация схемы электрохимической прошивки с непрерывной стабилизацией МЭП за счет перемещения одного из электродов.

**Ключевые слова:** электрохимическая размерная обработка, катод-инструмент, анодное растворение, электролит, межэлектродный промежуток, струя электролита, труднорастворимая соль, депассивация, механизм формообразования отверстий.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-6-16

## Введение

В настоящее время наблюдается тенденция по внедрению электрофизических методов обработки в технологические процессы производства в различных отраслях промышленности. Это связано со значительным ростом потребления высокопрочных материалов, обработка ко-

торых с использованием традиционных методов резанием затруднена, а порой и невозможна. При этом растет количество технологических задач, связанных с обработкой сложнопрофильных деталей, формообразованием различного рода полостей, решение которых невозможно без использования электрофизических технологий. К таким задачам следует отнести и микрообра-



ботку, когда размеры обрабатываемых поверхностей составляют доли миллиметра [1–7]. В этой области значительный объем работ связан с формообразованием полостей и отверстий как сквозных, так и глухих, в том числе и глубоких, когда длина отверстия многократно превышает его диаметр. Для решения этих задач широко используется ЭХРО, реализуемая по различным технологическим схемам [8–11]. Механизмы электрохимического растворения различных классов материалов от легированных до порошковых и твердосплавных подробно рассмотрены в работах [12–15]. Дальнейшее развитие электрохимических технологий связано с поиском путей интенсификации процесса [16, 17] и повышения точности обработки [18].

Для обработки отверстий и полостей наибольшее распространение получила электрохимическая прошивка полым катодом-инструментом с подачей электролита через центральное отверстие [19–22]. Практика электрохимической обработки глухих отверстий полым катодом-инструментом свидетельствует об образовании на дне отверстия характерного выступа, размеры которого зависят от диаметра отверстия ( $d_{\text{отв}}$ ) в катоде, через которое подается электролит в зону обработки (рис. 1). Так при  $d_{\text{отв}} = 3$  мм высота выступа составляет  $t = 0,1 \dots 0,2$  мм, которая возрастает до  $t = 6 \dots 7$  мм при увеличении центрального отверстия до 30 мм [19].

Образование выступа на дне отверстия связано с замедлением процесса растворения обрабатываемого материала по мере удаления от внутренней стенки катода к его центру. Наиболее

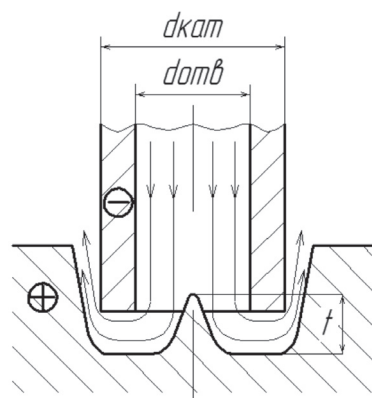


Рис. 1. Схема формирования выступа на дне отверстия при ЭХРО полым катодом-инструментом

интенсивное растворение наблюдается на участках торцевой поверхности катода, так как значение МЭП здесь минимально и, как правило, составляет десятые доли миллиметра, в то время как расстояние от внутренней стенки катода при минимальном значении диаметра отверстия, равном 2...3 мм, варьируется в диапазоне 1,0...1,5 мм. Эта разница в значении межэлектродного промежутка на различных участках обрабатываемого отверстия и объясняет наличие градиента в скорости анодного растворения в зоне обработки и соответствующее формообразование отверстия. Снижение высоты выступа обеспечивается уменьшением диаметра отверстия до 2...3 мм, но при этом возникает опасность нарушения нормального течения электролита в МЭП при соотношении  $d_{\text{кат}} / d_{\text{отв}} > 3$ . В этом случае на отдельных участках МЭП возникают разрывы потока электролита, что приводит к возникновению так называемых «сухих зон». На данных участках электрохимическое растворение металла существенно замедляется, что приводит к образованию неровностей, при соприкосновении катода-инструмента с которыми возникают токи короткого замыкания и происходит нарушение процесса обработки. В связи с этим в технологическом процессе получения глухих отверстий необходимо введение дополнительной операции механического удаления образующегося при ЭХРО выступа.

Данный механизм формообразования отверстий авторами [19] рассматривается для условий ЭХРО, когда диаметр отверстия в катоде-инструменте на порядок превышает величину МЭП, что и определяет образование характерного выступа на дне отверстия. Обработка малых отверстий с диаметром до 1,0 мм предполагает, что диаметр отверстия для подачи электролита в катоде-инструменте будет сопоставим с величиной МЭП. Значительное снижение величины МЭП от минимальных значений, используемых в практике ЭХРО и составляющих 0,1...0,2 мм, не предполагается возможным. Так, авторы [19] отмечают: установление величины МЭП менее 0,03 мм может привести к появлению облитерации, что вызовет прекращение движения электролита в МЭП. В связи с этим возникает вопрос о механизме формообразования отверстий малого диаметра, когда величина МЭП является сопоставимой с диаметром отверстия в катоде.

Настоящая статья посвящена изучению механизма формирования отверстий малого диаметра при ЭХРО.

### Методика экспериментального исследования

Технологические эксперименты по прошивке отверстий с использованием электрохимической размерной обработки проводились на специально разработанной и изготовленной установке, схема которой представлена на рис. 2. Установка обеспечивает ЭХРО как в условиях неподвижных электродов [23], так и при стабилизации величины МЭП за счет перемещения анодного узла без вращения катода-инструмента. Стабилизация может осуществляться как при периодическом его перемещении, так и при непрерывной подаче. Установка оснащена источником технологического тока, системой регистрации рабочего тока, а также пневмосистемой для создания избыточного давления  $P$  для подачи электролита в зону обработки. В качестве материала образца 8, закрепленного в электроизолирующей оправке 7, использовалась медь марки М1 (ГОСТ 859–2001). Полым катодом-инструментом 3 служила медицинская игла с соотношением внутреннего и наружного диаметра 0,26/0,46 мм.

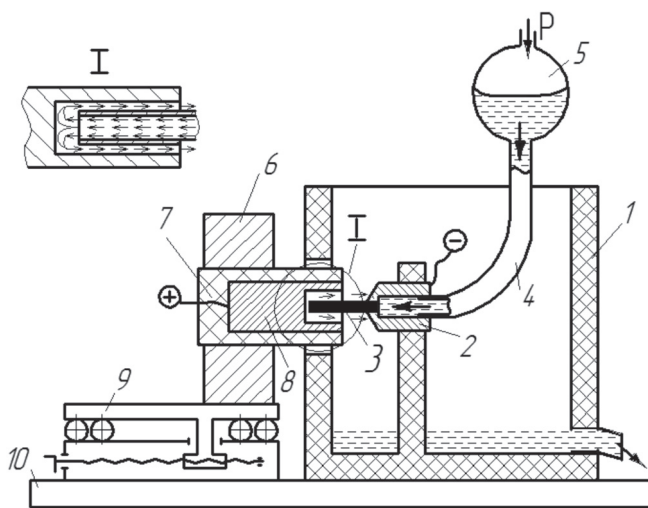


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для ЭХРО-отверстий:

1 – корпус электрохимической ячейки; 2 – катодный узел; 3 – катод-инструмент; 4 – магистраль подачи электролита; 5 – шар-баллон с электролитом; 6 – анодный узел; 7 – изоляционная оправка для образца; 8 – образец-анод; 9 – направляющие с механизмом перемещения анодного узла; 10 – основание

Катод-инструмент 3 закреплен в катодном узле 2, к которому подведена магистраль подачи электролита 4. Для создания давления магистрали использовался шар-баллон, обеспечивающий подачу электролита в зону обработки с давлением в диапазоне 0...1,0 МПа. Для электрохимической прошивки отверстий применялись 5 %-е водные растворы нейтральных солей NaCl (ГОСТ 4233–77) и KCl (ГОСТ 4234–77) [24]. Для оценки результатов электрохимической обработки использовался измерительный микроскоп Nikon MM-400.

При назначении параметров технологических режимов электрохимической прошивки малых отверстий руководствовались известными, используемыми на практике решениями. Так, значение технологического напряжения составило 10 В, а при выборе минимальной величины межэлектродного зазора, равной 0,05 мм, исходили из рассмотренных выше ограничений, определяющих гидродинамические условия при движении электролита. Для выявления кинетики формообразования отверстия при ЭХРО результаты оценивали через 4, 20 с и 1 мин после начала обработки.

Выбор минимальной величины МЭП объясняется стремлением к достижению максимально возможной локализации процесса электрохимического растворения. С этих же позиций при выборе составов электролитов предпочтение было отдано хлоридным растворам. Так, раствор нейтральной соли NaCl при ЭХРО меди обладает высоким (98 %) выходом металла по току, его независимостью от концентрации раствора и рабочей плотности тока, а также высокой удельной электропроводностью.

### Результаты и обсуждение

Из представленных выше рассуждений о механизме формообразования отверстий при ЭХРО возникает предположение о возможности получения отверстия без образования характерного выступа в условиях, когда диаметр отверстия в катоде-инструменте сопоставим с величиной МЭП. Однако анализ результатов электрохимического растворения меди в 5 %-м растворе NaCl как на начальной стадии процесса (после 4 с обработки), так и после 20 с не только не подтверждает высказанных предположений



по улучшению формообразования, но и свидетельствует об иной кинетике развития процесса (рис. 3), отличающейся от рассмотренной выше (см. рис. 1).

Кинетика формообразования отверстия на начальной стадии обработки представлена на рис. 4.

Вопреки традиционному для ЭХРО механизму анодного растворения, когда его скорость максимальна в зоне активной торцевой поверхности катода-инструмента, где величина МЭП минимальна, в данном случае область раство-

рения обрабатываемого материала в начальный момент времени находилась за пределами катода-инструмента. Зона обработки II (рис. 4) представляет собой кольцо с наружным диаметром ~0,8 мм, в то время как диаметр катода составляет 0,46 мм. В зоне II видны следы электрохимического растворения, характерные при сепарации потока электролита на отдельные струи с образованием так называемых «сухих зон». Появление струйности связано с разворотом потока электролита, вытекающего из отверстия катода-

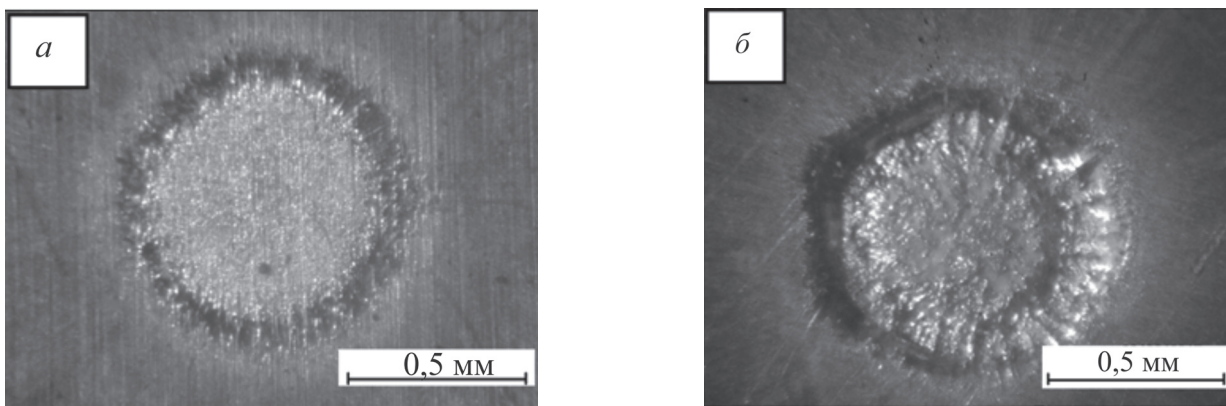


Рис. 3. Фото поверхности образца после 4 с (а) и 20 с (б) электрохимической прошивки отверстия в меди в 5 %-м растворе NaCl:

$P = 0,3 \text{ МПа}; \Delta = 0,05 \text{ мм}$

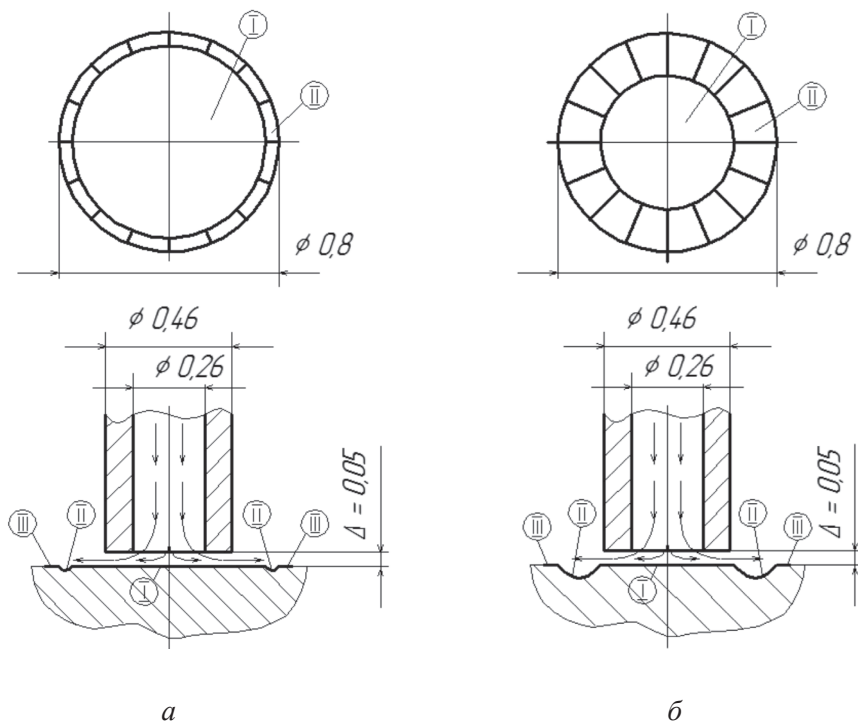


Рис. 4. Кинетика формообразования отверстия в меди на начальной стадии ЭХРО в 5 %-м NaCl:

$P = 0,3 \text{ МПа}; \Delta = 0,05 \text{ мм}$ : а – после 4 с обработки; б – после 20 с обработки

инструмента, на входе в МЭП малой величины. Внутри кольца, представляющего зону II, находится зона I, морфология поверхности которой отличается от исходной микрогеометрии. На поверхности III, расположенной с внешней стороны кольца II и имеющей более светлую окраску, чем исходная поверхность, видны следы слабого электрохимического травления.

Подобная кинетика формообразования отверстий при ЭХРО меди в данном электролите, вероятно, объясняется тем, что при малом (0,05 мм) МЭП в начальный момент времени под катодом имеет место интенсивное анодное растворение материала с образованием окислов меди на поверхности. Высокая анионная активность хлора приводит к замещению им кислорода в оксиде, в результате чего на поверхности образуется труднорастворимая соль  $\text{CuCl}$ , вызывающая полную пассивацию обрабатываемого материала [25, 26].

Очевидно, при такой интенсивности процесса пассивации устранить данные ограничения за счет движущегося потока электролита невозможно. И только на определенном расстоянии от катода, в зоне II, где интенсивность образования  $\text{CuCl}$  была ниже, происходил процесс депассивации, обеспечивающий анодное растворение материала. Увеличение времени обработки до 20 с приводит к расширению зоны анодного растворения в сторону центра отверстия. Дальнейшее продолжение обработки (~1 мин) сопровождается образованием характерного выступа в центре отверстия. Формообразование отверстия при ЭХРО на МЭП, равном 0,05 мм, при подобном развитии процесса анодного растворения не может быть приемлемым по двум причинам. Первая – не обеспечивается точность копирования катода-инструмента, когда при его наружном диаметре, равном 0,46 мм, диаметр входного отверстия ~0,8 мм. Вторая – невозможность стабилизации величины МЭП на уровне первоначальной настройки, так как до определенного момента времени (~1 мин) перемещение электродов приведет к их короткому замыканию и нарушению процесса обработки.

Увеличение МЭП до 0,1 мм в целом не изменяет кинетику формообразования, лишь приближает зону анодного растворения к катоду-инструменту и сокращает ее диаметр до 0,65 мм (рис. 5). На фото поперечного сечения образ-

ца (рис. 6) видно формирование характерного выступа в центре отверстия через ~1 мин обработки.

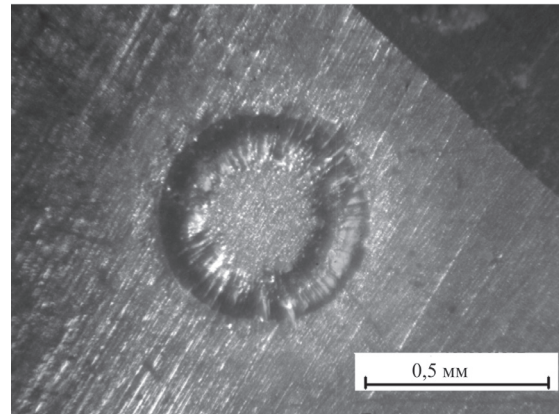


Рис. 5. Фото поверхности образца после 20 с электрохимической прошивки отверстия в меди в 5 %-м  $\text{NaCl}$ :  
 $P = 0,3$  МПа;  $\Delta = 0,1$  мм

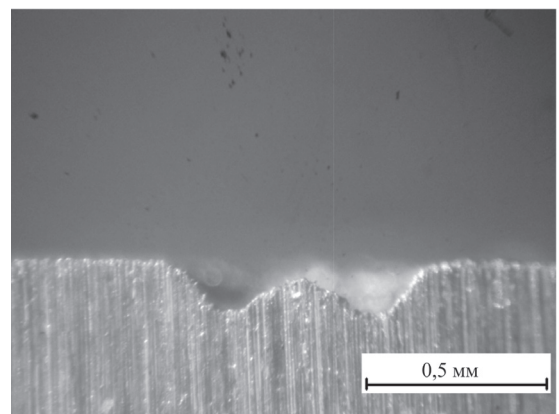


Рис. 6. Геометрия поперечного сечения отверстия после 1 мин электрохимической прошивки в 5 %-м  $\text{NaCl}$ :  
 $P = 0,3$  МПа;  $\Delta = 0,1$  мм

Несмотря на то что при ЭХРО на МЭП, равном 0,1 мм, кинетика формообразования изменяется в лучшую сторону, точность копирования катода-инструмента не обеспечивается и непрерывная стабилизация МЭП в процессе обработки на уровне 0,1 мм невозможна.

Развитие кинетики формообразования в классическом представлении, когда зона анодного растворения находится под активной торцевой поверхностью катода-инструмента, наблюдается при электрохимической прошивке на МЭП, равном 0,2 мм (рис. 7).

Такой характер формообразования можно объяснить выравниванием интенсивностей про-

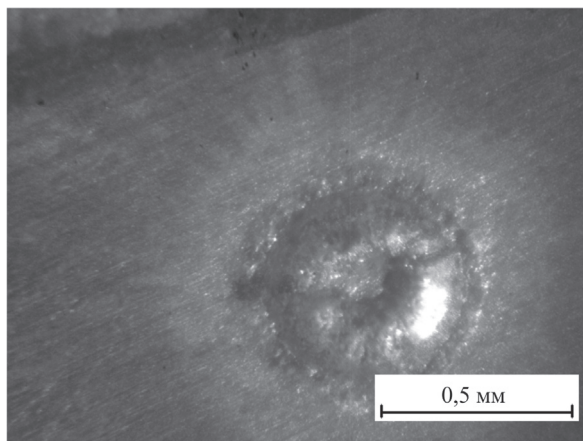


Рис. 7. Фото поверхности образца после 20 с электрохимической прошивки отверстия в меди в 5 %-м NaCl:  
 $P = 0,3$  МПа;  $\Delta = 0,2$  мм

цессов образования пассивационных структур и их депассивацией в межэлектродном промежутке. В этом случае обеспечивается точность копирования формы катода-инструмента и возможность стабилизации МЭП на уровне 0,2 мм, хотя и остается опасность короткого замыкания электродов из-за наличия небольшого выступа в центре отверстия.

При дальнейшем увеличении МЭП до 0,3...0,4 мм формообразование отверстия начинается с центра катода без образования характерного выступа (рис. 8). Соответствующее данным параметрам обработки сочетание процессов пассивации анодной поверхности и ее устранения создает условия для интенсивного анодного растворения в центре катода, где давление струи электролита максимально.

Осуществление ЭХРО отверстия при стабилизации величины МЭП на уровне 0,3...0,4 мм обеспечит копирование формы катода-инструмента без образования выступа на дне отверстия. Естественно, что увеличение МЭП приведет к снижению скорости анодного растворения и, следовательно, уменьшению производительности обработки.

Таким образом, кинетика формообразования главным образом зависит от скорости развития двух процессов – пассивации анодной поверхности и ее депассивации. Изменение величины МЭП определяет скорость пассивационных процессов, о чем свидетельствуют результаты, представленные выше. Интенсивность депассивационных процессов связана с гидродинамическими параметрами струи электролита, в первую очередь ее давлением. Это подтверждают результаты эксперимента, представленные на рис. 9 и 10.

Увеличение давления струи электролита до 0,8 МПа при ЭХРО на МЭП, равном 0,05 мм, обеспечивает формообразование отверстия после 4 с прошивки (рис. 9), подобное обработке после 20 с при давлении 0,3 МПа и МЭП, равном 0,1 мм (см. рис. 5). При этом увеличение давления на меньшем зазоре улучшает точность копирования катода-инструмента; так, входной диаметр отверстия составляет 0,55 мм (см. рис. 9) против 0,65 (см. рис. 5). Образование характерного выступа в отверстии при повышенном давлении происходит после 20 с обработки (рис. 10), тогда как при ЭХРО при давлении 0,3 МПа на это потребовалось около 1 мин (см. рис. 6).

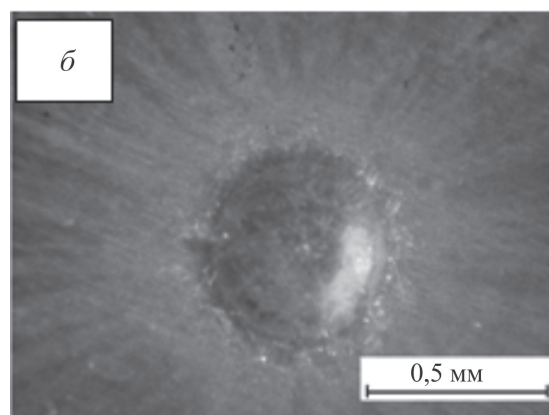
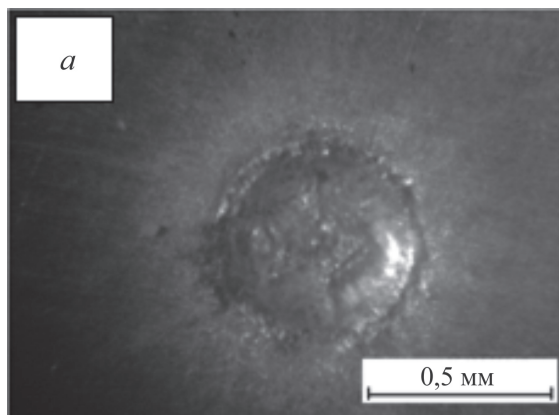


Рис. 8. Внешний вид отверстия в меди после 20 с электрохимической прошивки в 5 %-м NaCl при  $P = 0,3$  МПа:  
 $a - \Delta = 0,3$  мм;  $b - \Delta = 0,4$  мм



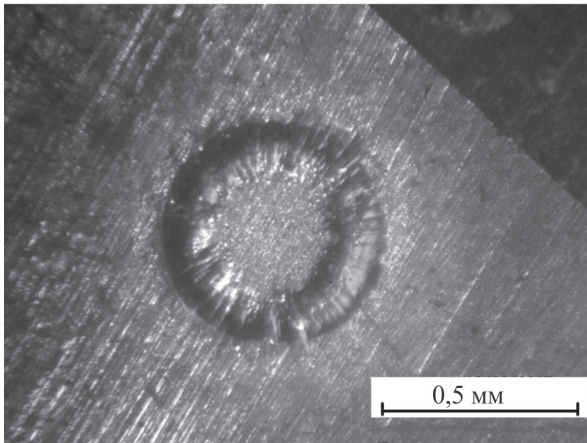


Рис. 9. Фото поверхности образца после 4 с электрохимической прошивки отверстия в меди в 5 % NaCl:

$P = 0,8 \text{ МПа}; \Delta = 0,05 \text{ мм}$

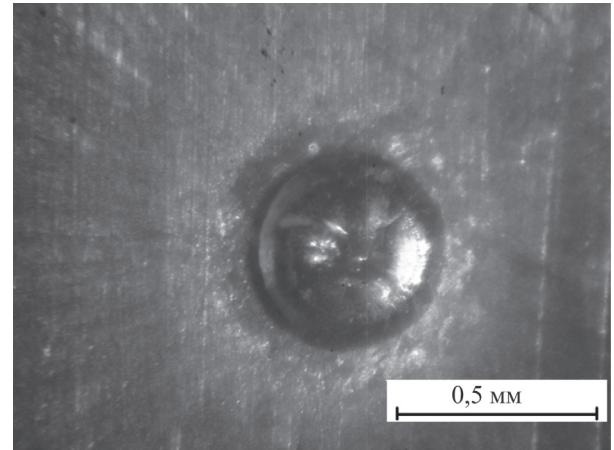


Рис. 11. Внешний вид отверстия в меди после 20 с электрохимической прошивки в 5 %-м NaCl:

$P = 0,8 \text{ МПа}; \Delta = 0,1 \text{ мм}$

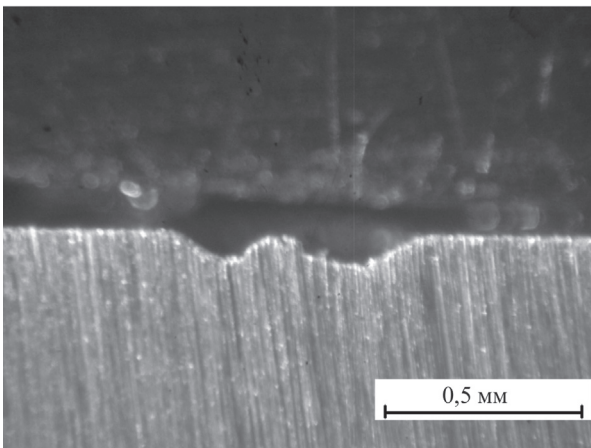


Рис. 10. Геометрия поперечного сечения отверстия после 20 с электрохимической прошивки в 5 % NaCl:

$P = 0,8 \text{ МПа}; \Delta = 0,05 \text{ мм}$

Увеличение величины МЭП до 0,1 мм при  $P = 0,8 \text{ МПа}$  обеспечивает максимальную точность копирования катода-инструмента без образования характерного выступа на дне отверстия (рис. 11).

Таким образом, увеличение давления струи электролита существенно изменило кинетику формообразования отверстия. Электрохимическая прошивка со стабилизацией МЭП становится возможной при малых его значениях (0,05...0,1 мм), что обеспечивает как точность копирования формы катода-инструмента, так и высокую скорость анодного растворения. Анализ представленных результатов свидетельствует о том, что главным ограничением в про-

цессе формообразования отверстий в меди при электрохимической прошивке в растворе NaCl является возникновение пассивационных ограничений вследствие образования труднорастворимой соли CuCl. Подтверждением являются результаты по ЭХРО с использованием другого хлоридного раствора – KCl. Характер и кинетика формообразования отверстий в растворах NaCl и KCl аналогичны.

## Выводы

Экспериментально подтверждено, что электрохимическая размерная обработка в хлоридных растворах при давлении струи электролита 0,3 МПа для прошивки отверстия в меди полым катодом-инструментом с соотношением внутреннего и наружного диаметров 0,26 / 0,46 мм на малых межэлектродных промежутках (0,05...0,1 мм) не обеспечивает точности копирования инструмента и исключает возможность стабилизации величины МЭП на установленном уровне. Смещение зоны электрохимического растворения за контуры катода-инструмента объясняется пассивацией анодной поверхности под его торцом вследствие образования труднорастворимой соли CuCl. Обеспечение точности копирования инструмента на обрабатываемой поверхности достигается при обработке с МЭП, равном 0,2 мм. При этом в центре отверстия формируется характерный для данной схемы ЭХРО-выступ. Увеличение МЭП до 0,3...0,4 мм сопровождается анодным растворением под торцом катода-инструмента, при этом выступа на дне отверстия

не образуется. Это обеспечивает возможность обработки отверстия с непрерывной стабилизацией МЭП за счет перемещения одного из электродов со скоростью анодного растворения. Увеличение МЭП приводит к снижению локализации процесса анодного растворения и, следовательно, к уменьшению скорости прошивки отверстия.

Показано, что повышение локализации процесса электрохимического растворения на МЭП, равном 0,05...0,1 мм, при обеспечении точности формообразования возможно при увеличении давления струи электролита до 0,8 МПа. Повышение давления струи интенсифицирует процессы депассивации анодной поверхности даже при высокой скорости образования труднорастворимой соли CuCl, что является закономерным при обработке на малых МЭП.

### Список литературы

1. *Венецева С.Н., Белоусов И.А.* Микроэлектрохимическая обработка материалов с применением наносекундных импульсов технологического напряжения // Современная электротехнология в промышленности России (молодежные инновации): сборник трудов научно-технической конференции, Тула, 7 октября 2011 г. – Тула: ТулГУ, 2011. – С. 9–10.
2. *Баранова С.Н.* Микроэлектрохимическая обработка при сверхмалых зазорах // Современная электротехнология в промышленности России (молодежные инновации): сборник трудов научно-технической конференции, Тула, 12 октября 2010 г. – Тула: ТулГУ, 2010. – С. 65.
3. *Skoczypiec S., Ruszaj A., Lipiec P.* Research on ECD localization in case of micro machining with ultra short pulses // Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI). – Shanghai, 2010. – P. 319–322.
4. Research on micro ECM using micro array electrode / Y. Li, X. Ma, G. Liu, M. Hu, F. Yi // Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI). – Shanghai, 2010. – P. 335–340.
5. *Ma X., Li Y.* Research on micro electrode fabrication based on ECM // Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI). – Shanghai, 2010. – P. 331–334.
6. Micro electrochemical machining and its influencing factors / X. Li, L. Zhao, X. Wang, Z. Wang // Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI). – Shanghai, 2010. – P. 385–388.
7. Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes / K.P. Rajurkar, G. Levy, A. Malshe, M.M. Sundaram, J. McGeough, X. Hu, R. Resnick, A. DeSilva // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2006. – Vol. 55, iss. 2. – P. 643–666. – doi: 10.1016/j.cirp.2006.10.002.
8. *Мороз И.И.* Электрохимическая размерная обработка металлов. – М.: Машиностроение, 2009. – 279 с.
9. *Де Барр А.Е., Оливер Д.А.* Электрохимическая обработка. – М.: Машиностроение, 1973. – 184 с.
10. Электродные процессы и процессы переноса при электрохимической размерной обработке металлов / А.И. Дикусар, Г.Р. Энгельгардт, В.И. Петренко, Ю.Н. Петров. – Кишинев: Штиинца, 1983. – 206 с.
11. *Зайдман Г.Н., Петров Ю.Н.* Формообразование при электрохимической размерной обработке металлов / под ред. А.И. Дикусара. – Кишинев: Штиинца, 1990. – 205 с.
12. *Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В.* Анодное растворение быстрорежущей стали Р6М5 и ее составляющих в водных растворах // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2003. – № 4 (34). – С. 141–147.
13. Электрохимическая обработка безвольфрамовых твердых сплавов / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский, Д.Б. Красильников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 3 (48). – С. 3–7.
14. Электрохимическое растворение покрытий из порошковых материалов / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский, М.И. Никитенко, А.Н. Моисеенко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 2. – С. 3–5.
15. Электрохимическое растворение стали 110Г13Л / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский, А.А. Марфеелев, А.Ю. Конев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3. – С. 40–41.
16. *Рахимьянов Х.М., Рахимьянов К.Х., Гаар Н.П.* Оценка механизмов активации процесса электрохимической размерной обработки нержавеющей стали // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 3. – С. 19–21.
17. Влияние гидродинамического режима на скорость анодного растворения меди в пассивирующих электролитах / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, А.С. Захаров, С.И. Василевская // Механика XXI века. – 2015. – № 14. – С. 112–115.
18. *Zaitsev A.N., Idrisov T.R.* Aspects of improving of electrochemical machining accuracy // Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI). – Shanghai, 2010. – P. 341–345.
19. *Байсунов И.А.* Электрохимическая обработка металлов. – М.: Высшая школа, 1981. – 152 с.
20. *Седыкин Ф.В.* Размерная электрохимическая обработка деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 346 с.

21. Размерная электрическая обработка металлов / Б.А. Артамонов, А.Л. Бишницкий, Ю.С. Волков, А.В. Глазков. – М.: Высшая школа, 1978. – 336 с.

22. Черепанов Ю.П., Самецкий Б.И. Электрохимическая обработка в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1972. – 117 с.

23. Рахимьянов Х.М., Василевская С.И. Технологические возможности электрохимической обработки отверстий неподвижным катодом-инструментом // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 2 (71). – С. 12–20. – doi: 10.17212/1994-6309-2016-2-12-20.

24. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И. Исследование электролитов, обеспечива-

ющих точность электрохимической обработки меди М1 // Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: материалы VI международной научно-технической конференции. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 100–104.

25. Анодное окисление меди, серебра и свинца в растворах хлоридов / В.К. Алтухов, Е.С. Воронцов, И.К. Маршаков, Т.Н. Клепинина // Защита металлов. – 1978. – Т. 14, № 4. – С. 474–480.

26. Грушевская С.Н. Кинетика анодного растворения Cu, Au-сплавов в условиях образования труднорастворимых соединений Cu (I): дис. ... канд. хим. наук: 02.00.05 / Воронежский государственный университет. – Воронеж, 2000. – 200 с.

## OBRAOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (75), April – June 2017, Pages 6–16

### Features of small holes formation in copper by electrochemical machining in water chloride solutions

Rakhimyanov Kh.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: x.raximyanov@corp.nstu.ru

Vasilevskaya S.I., Assistant, e-mail: vasilevskaya@corp.nstu.ru

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

#### Abstract

The problems of the interelectrode gap value assignment at the electrochemical dimensional machining of small holes in copper in chloride solutions with using a hollow cathode- tool with an internal diameter 0,26 mm and external diameter 0,46 mm are considered. It is established that when obtaining holes at small interelectrode gaps (0,05...0,1 mm) with electrolyte jet pressure  $P = 0,3$  MPa, the accuracy of copying the tool is not ensured. This is explained by the fact that the electrochemical dimensional machining of copper in chloride solutions is accompanied by the formation of a hardly soluble CuCl salt on the surface, which prevents electrochemical dissolution of the metal under the cathode-tool end. The accuracy of copying the tool on the machined surface is achieved by increasing the interelectrode gap to 0.2 mm. However, an increase in the interelectrode gap leads to a decrease in the localization of the anodic dissolution process, and, consequently, to a decrease in the rate of hole formation. It is shown that an increase in the pressure of the electrolyte jet to 0,8 MPa at a value of the interelectrode gap from 0,05 to 0,1 mm ensures the accuracy of the hole formation. It is noted that increasing the electrolyte jet pressure intensifies the process of depassivation of the anodic surface, which makes the processing possible at a small value of the interelectrode gap with a high degree of localization of the process. It is established that at interelectrode gap equal to 0,3 mm at  $P = 0,3$  MPa and equal to 0,1 mm at  $P = 0,8$  MPa, it is possible to realize the scheme of electrochemical machining of holes with continuous stabilization of the interelectrode gap due to the displacement of one of the electrodes.

#### Keywords

electrochemical machining, cathode – tool, anodic dissolution, electrolyte, interelectrode gap, electrolyte stream, hardly soluble salt, depassivation, the mechanism of formation of holes.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-6-16



## References

1. Venevtseva S.N., Belousov I.A. [Microelectrochemical processing of materials using nanosecond process voltage pulses]. *Sbornik trudov nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Sovremennaya elektrotekhnologiya v promyshlennosti Rossii (molodezhnye innovatsii)"* [Proceedings of the scientific-technical conference "Modern electrotechnology industry in Russia (youth innovation)"]. Tula, 2011, pp. 9–10. (In Russian).
2. Baranova S.N. [Microelectrochemical treatment for very small gaps]. *Sbornik trudov nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Sovremennaya elektrotekhnologiya v promyshlennosti Rossii (molodezhnye innovatsii)"* [Proceedings of the scientific-technical conference "Modern electrotechnology industry in Russia (youth innovation)"]. Tula, 2010. 65 p. (In Russian).
3. Skoczypiec S., Ruszaj A., Lipiec P. Research on ECD localization in case of micro machining with ultra short pulses. *Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI)*, Shanghai, 2010, pp. 319–322.
4. Li Y., Ma X., Liu G., Hu M., Yi F. Research on micro ECM using micro array electrode. *Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI)*, Shanghai, 2010, pp. 335–340.
5. Ma X., Li Y. Research on micro electrode fabrication based on ECM. *Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI)*, Shanghai, 2010, pp. 331–334.
6. Li X., Zhao L., Wang X., Wang Z. Micro electrochemical machining and its influencing factors. *Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI)*, Shanghai, 2010, pp. 385–388.
7. Rajurkar K.P., Levy G., Malshe A., Sundaram M.M., McGeough J., Hu X., Resnick R., DeSilva A. Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2006, vol. 55, iss. 2, pp. 643–666. doi: 10.1016/j.cirp.2006.10.002.
8. Moroz I.I. *Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka metallov* [Electrochemical machining of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 279 p.
9. De Barr A.E., Oliver D.A. *Electrochemical machining*. London, Macdonald, 1968 (Russ. ed.: De Barr A.E., Oliver D.A. *Elektrokhimicheskaya obrabotka*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 184 p.).
10. Dikumar A.I., Engel'gardt G.R., Petrenko V.I., Petrov Yu.N. *Elektrodnye protsessy i protsessy perenosa pri elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotke metallov* [Electrode processes and transport processes in the electrochemical dimensional processing of metals]. Kishinev, Shtiintsa Publ., 1983. 206 p.
11. Zaidman G.N., Petrov Yu.N. *Formoobrazovanie pri elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotke metallov* [Molding in electrochemical dimensional processing of metals]. Kishinev, Shtiintsa Publ., 1990. 205 p.
12. Rakhimyanov Kh.M., Yanpolskii V.V. Anodnoe rastvorenie bystrorezhushchei stali R6M5 i ee sostavlyayushchikh v vodnykh rastvorakh [Anode dissolution of high-speed steel R6M5 and its components in water solutions]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2003, no. 4 (34), pp. 141–147.
13. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Yanpolskii V.V., Krasilnikov D.B. Elektrokhimicheskaya obrabotka bezvol'framovykh tverdykh splavov [Electrochemical processing of tungsten carbide]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2010, no. 3 (48), pp. 3–7.
14. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Yanpolsky V.V., Nikitenko M.I., Moiseenko A.N. Elektrokhimicheskoe rastvorenie pokrytii iz poroshkovykh materialov [Electrochemical dissolution of coatings from powder materials]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2011, no. 2, pp. 3–5.
15. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Yanpolsky V.V., Marfelev A.A., Konev A.Y. Elektrokhimicheskoe rastvorenie stali 110G13L [Electrochemical dissolution of steel 110G13L]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2012, no. 3, pp. 40–41.
16. Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov K.Kh., Gaar N.P. Otsenka mekhanizmov aktivatsii protsessa elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotki nerzhavayushchei stali [Evaluation of mechanisms of activation of electrochemical dimensional machining of stainless steel]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2010, no. 3, pp. 19–21.
17. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Zakharov A.S., Vasilevskaya S.I. Vliyanie gidrodinamicheskogo rezhima na skorost' anodnogo rastvoreniya medi v passiviruyushchikh elektrolitakh [Influence of hydrodynamic conditions on the rate of anodic dissolution of copper in the passivating electrolytes]. *Mekhaniki XXI veku = Mechanics of the XXI century*, 2015, no. 14, pp. 112–115.
18. Zaitsev A.N., Idrisov T.R. Aspects of improving of electrochemical machining accuracy. *Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI)*, Shanghai, 2010, pp. 341–345.

19. Baisupov I.A. *Elektrokhimicheskaya obrabotka metallov* [Electrochemical treatment of metals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1981. 152 p.
20. Sedykin F.V. *Razmernaya elektrokhimicheskaya obrabotka detalei mashin* [Dimensional electrochemical processing machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 346 p.
21. Artamonov B.A., Bishnitskii A.L., Volkov Yu.S., Glazkov A.V. *Razmernaya elektricheskaya obrabotka metallov* [Dimensional electrical processing of metals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978. 336 p.
22. Cherepanov Yu.P., Sametskii B.I. *Elektrokhimicheskaya obrabotka v mashinostroenii* [Electrochemical machining in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 117 p.
23. Rakhimyanov Kh.M., Vasilevskaya S.I. Tekhnologicheskie vozmozhnosti elektrokhimicheskoi obrabotki otverstii nepodvizhnym katodom-instrumentom [Technological capabilities of the holes electrochemical machining using fixed cathode-tool]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2016, no. 2 (71), pp. 12–20. doi: 10.17212/1994-6309-2016-2-12-20.
24. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Vasilevskaya S.I. [Research electrolytes, providing precision electrochemical machining of copper M1]. *Innovatsii v mashinostroenii – osnova tekhnologicheskogo razvitiya Rossii: materialy VI mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference “Innovations in Mechanical Engineering Based on Technological Development of Russia”]. Barnaul, 2014, pt. 2, pp. 100–104. (In Russian).
25. Altukhov B.K., Vorontsov E.S., Marshakov I.K., Klepinina T.N. Anodnoe okislenie medi, serebra i svintsa v rastvorakh khloridov [Anodic oxidation of copper, silver and lead in solutions of chlorides]. *Zashchita metallov = Protection of metals*, 1978, vol. 14, no. 4, pp. 474–480.
26. Grushevskaya S.N. *Kinetika anodnogo rastvoreniya Cu, Au – splavov v usloviyakh obrazovaniya trudnorastvorimykh soedinenii Cu (I)*. Diss. kand. khim. nauk [Kinetics of anodic dissolution of Cu, Au – alloys under conditions of formation of hardly soluble Cu (I). PhD chem. sci. diss.]. Voronezh, 2000. 200 p.

#### Article history

Received 06 March 2017

Revised 10 April 2017

Accepted 10 May 2017

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ КУЛАЧКОВОГО МЕХАНИЗМА С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ\*

*Ю.И. ПОДГОРНЫЙ<sup>1,2</sup>, доктор техн. наук, профессор*

*В.Ю. СКИБА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент*

*А.В. КИРИЛЛОВ<sup>1,3</sup>, канд. техн. наук, доцент*

*О.В. МАКСИМЧУК<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент*

*П.Ю. СКИБА<sup>1</sup>, студент*

*(<sup>1</sup>НГТУ, г. Новосибирск,*

*<sup>2</sup>НТИ (филиал) РГУ им. А.Н. Косыгина, г. Новосибирск,*

*<sup>3</sup>НГПУ, г. Новосибирск)*

Поступила 11 января 2017

Рецензирование 10 февраля 2017

Принята к печати 14 апреля 2017

**Скиба В.Ю.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: skeeba\_vadim@mail.ru

Рассматриваются вопросы проектирования кулачковых механизмов. Анализ научной литературы по данному вопросу показывает, что в настоящее время синтез законов движения кулачковых механизмов производится в основном без учета энергетических затрат. Рассматриваются основные критерии, включающие фазовые углы, законы, представленные либо в аналитической форме, либо в виде таблиц профиля кулачка. Целью настоящей работы является разработка методики синтеза законов движения кулачкового механизма с учетом энергетических затрат от полезной нагрузки, момента сил инерции, сил упругости элементов механизма и энергии, развиваемой ведомым звеном. Актуальность исследования обусловлена отсутствием единой методики, позволяющей учитывать энергетические затраты при проектировании механизмов. При проведении исследований рассмотрена расчетная модель батанного механизма ткацкого станка типа СТБ. Для определения энергетических затрат механизма вычислены значения работы, израсходованной на преодоление сил сопротивления от действия технологической нагрузки, работы от сил инерции механизма, энергии, расходуемой на упругие деформации элементов механизма. При проведении расчетов использован математический пакет MathCad. Анализ результатов расчетов указывает, что определенные виды тканей при существующих в настоящее время параметрах конструкции батанного механизма вырабатываться не могут. В результате проведенных исследований предложена методика синтеза кулачковых механизмов для технологических машин, включающая определение энергетических затрат от полезной нагрузки, сил инерции, момента на ведомом валу кулачкового механизма. Теоретические исследования апробированы на модели конкретной машины – станок ткацкий типа СТБ. Синтезирован закон движения механизма прибора уточных нитей. Предложен новый профиль кулачка в виде таблицы радиусов-векторов. Полученные результаты позволяют разграничить ассортиментные возможности ткацких машин по величине технологического усилия и рекомендовать предприятиям наиболее рациональные режимы работы оборудования.

**Ключевые слова:** проектирование механизмов, кулачковый механизм, синтез закона движения, деформации конструктивных элементов, несущая система, технологическая машина, энергия деформации, технологическая нагрузка, ткацкая машина СТБ.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-17-27

\* Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-1\_17.



## Введение

Применение кулачковых механизмов, выполняющих прерывистые движения ведомых звеньев, ставит задачу всестороннего и полного изучения закономерностей движения рабочих органов. Решение этой задачи становится особенно актуально в связи со значительными энергетическими затратами для момента осуществления технологической операции, а также для механизмов, работающих в условиях повышенных динамических режимов [1–8].

Вопросам проектирования кулачковых механизмов посвящено большое количество исследований. Значительный вклад в синтез законов движения внесли отечественные и зарубежные ученые [9–18].

За последние годы опубликован ряд работ, посвященных синтезу законов движения кулачковых механизмов. В работе Г.Б. Алехиной представлен универсальный метод оптимального многокритериального синтеза плоских кулачковых механизмов, ориентированный на использование аналитических приемов динамического программирования и диалогового режима общения с персональным компьютером и получаемыми результатами. Предложен алгоритм ввода и обработки исходной информации в соответствии с изопараметрическими, граничными и дополнительными кинематическими условиями формирования законов движения; составлены алгоритмы, позволяющие вести синтез кулачковых механизмов по типовым критериям качества, а также параметрические комплексы, связанные с контактными напряжениями и износом элементов высшей пары и являющиеся по форме общими для рассматриваемой группы механизмов [19].

В работе Е.В. Рыбниковой отмечается, что расширение эксплуатационных возможностей кулачковых механизмов требует дальнейшего совершенствования методов их расчета, учета динамических особенностей и составления уточненного описания свойств, которые ранее оставались либо незамеченными, либо их учет был связан с определенными математическими трудностями. Последнее во многом касается динамики кулачковых механизмов как нелинейных механических систем, содержащих нестационарные связи. Работа содержит исследование ди-

намики типовых кулачковых механизмов и разработку методики их синтеза с учетом упругого контактного взаимодействия элементов высшей пары. При этом входная кинематическая цепь и толкатель как выходное звено принимаются абсолютно жесткими, учитывается упругая податливость соединения элементов высшей пары механизма [20].

В работе М.В. Лукина рассмотрен синтез законов движения механизмов кулачкового типа с применением ряда Фурье и использованием жестких и упругих моделей. Предложена методика рационального выбора динамических характеристик кулачковых механизмов за счет корректировки существующих законов движения, представленных в табличном или аналитическом виде с использованием ряда Фурье. Отмечено, что синтез кулачкового механизма необходимо производить на основе динамической модели механизма, учитывающей его упругие и диссипативные свойства, а также суммарную динамическую нагрузку в начале движения системы [21].

Однако практика эксплуатации ткацких станков указывает на то, что при выработке плотных тканей некоторые артикулы не могут вырабатываться на данном оборудовании. В период прибоа уточных нитей к опушке ткани энергии, развиваемой двигателем, оказывается недостаточно [22]. В связи с этим ставится задача изучения этого явления и введения дополнительных условий при синтезе закона движения кулачкового механизма, осуществляющего прибоа уточных нитей.

В работе авторов настоящей статьи [23] рассматриваются вопросы синтеза закона движения кулачкового механизма на основе анализа классических законов. Предложен алгоритм синтеза закона движения, позволяющий учитывать энергию, развиваемую механизмом, энергию, затраченную для формирования тканей, а также энергию, которая идет на деформацию остовов и элементов механизма прибоа. Показано, что часть энергии, которая затрачивается на деформацию несущей системы и элементов ткацкого станка, можно свести к минимуму рядом конструктивных изменений. Для этой цели выполнены конструктивные мероприятия по увеличению жесткости несущей и скальной систем [24–26]. В результате проведенных

исследований предложен новый закон движения механизма прибора, позволяющий снизить энергетические потери по сравнению с существующим законом, применяющимся в ткацких станках серийного производства.

Анализ перечисленных работ говорит о том, что в настоящее время синтез законов движения кулачковых механизмов производится в основном без учета энергетических затрат.

Действие технологической нагрузки для механизмов данного типа приходится главным образом на отрицательные участки графика ускорений. Энергия, которая расходуется на преодоление полезных сопротивлений, зависит от мощности на ведомом валу и его угловой скорости.

В связи с этим при синтезе кулачковых механизмов необходимо учитывать следующие факторы:

- цикловую диаграмму работы механизма в цикле станка (фазовые углы работы механизма);
- ход ведомого звена (толкателя или коромысла);
- ограничения на полезную нагрузку с учетом соотношения величин этой нагрузки и момента от сил инерции;
- энергию, развиваемую на ведомом звене (ее должно быть достаточно для осуществления всех видов энергетических затрат).

Кроме того, следует учитывать все требования для проектирования механизмов кулачкового типа: плавность и непрерывность кривой графика ускорений; отсутствие разрывов первого и второго рода.

Целью настоящей работы является разработка методики синтеза законов движения механизма прибора уточных нитей с учетом энергетических затрат от полезной нагрузки, момента сил инерции, сил упругости элементов механизма и энергии, развиваемой ведомым звеном.

### Расчетная модель

В качестве объекта исследования был выбран механизм прибора уточных нитей бесчелночного ткацкого станка типа СТБ (батанный механизм) [23]. Конструктивная схема механизма представлена на рис. 1.

Кулачковый механизм (см. рис. 1) работает следующим образом: ведомый вал 5 получает

вращательное движение от кулачков 2 и 3, укрепленных на главном валу 1, и роликов 4. Кулачки сообщают возвратно-качательное движение валу 5, на котором закреплены лопасти 6 и брус 7, несущий бердо 8.

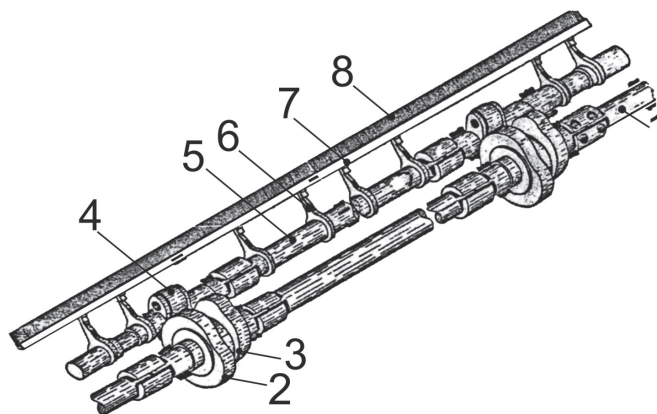


Рис. 1. Конструктивная схема кулачкового механизма

На основании [22] для работы этого механизма станков СТБ 180 и СТБ 220 всего по цикловой диаграмме отводится  $140^\circ$ , из которых  $70^\circ$  – на прямой ход и  $70^\circ$  – на обратный. В соответствии с конструктивными требованиями перемещение ведомого звена кулачкового механизма должно составлять 25 мм. Кроме того, величина момента сил полезных сопротивлений от действия технологического усилия не должна превышать величины суммарного значения момента от сил инерции (отрицательных и положительных значений). В момент прибора уточных нитей к опушке ткани происходит деформация составляющих элементов ткацкого станка [24–26]. Анализ результатов исследований указывает на то, что основная деформация системы приходится на несущую и скальную систему. В связи с этим при синтезе закона движения механизма прибора следует учитывать эти деформации, так как они требуют определенных затрат энергии.

### Методика исследований и проектирования

На первом этапе были проведены исследования закона, представленного в виде циклоиды. Все расчеты проводились в математическом пакете Mathcad. Полный ход рабочего органа по цикловой диаграмме составляет  $140^\circ$ . Закон движения записывается в виде

$$h = \frac{h_{\max}}{\pi} \left[ \frac{\pi\theta}{\beta} - \frac{1}{2} \sin \left( \frac{2\pi\theta}{\beta} \right) \right], \quad (1)$$

где  $h_{\max}$  – максимальное значение перемещений;  $\theta$  – текущий угол;  $\beta$  – угол кривой.

Ускорения ведомого звена механизма определяются в виде

$$a(t) = \frac{d^2}{dt^2} h(t). \quad (2)$$

График ускорений ведомого звена представлен на рис. 2.

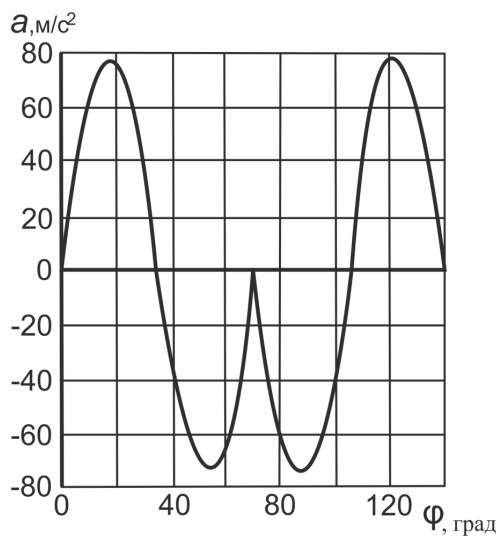


Рис. 2. График ускорений ведомого звена

Технологическое усилие для этого механизма представляет собой синусоидальный или треугольный импульс с его максимальной амплитудой при  $70^\circ$  по цикловой диаграмме. В этот момент ускорения равны нулю (см. рис. 2). В таком случае технологическое усилие полностью окажется на положительном участке ускорений, так как оно не встретит сопротивления от действия сил инерции, величину которых можно определить из выражения

$$M_{\text{и}} = \varepsilon J_0, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – угловое ускорение ведомого звена механизма;  $J_0$  – момент инерции массы относительно оси качания механизма прибора уточных нитей.

Угловое ускорение ведомого звена определяется:

$$\varepsilon = a^\tau / l, \quad (4)$$

где  $a^\tau$  – величина тангенциального ускорения (берется из графика, см. рис. 2);  $l$  – длина коромысла.

Для дальнейшего исследования изменим закон ускорений, для чего сформируем матрицу значений ускорений, включающую в себя два столбца и 29 строк. Первый столбец соответствует значениям углов поворота кулачка, второй – амплитудным значениям ускорений. Отсортируем их по возрастанию и убыванию, обработаем сплайнами и проинтерполируем полученные значения ускорений. В результате изменения значений матрицы на участке от  $35$  до  $105^\circ$  получен новый отмасштабированный закон ускорений, представленный на рис. 3.

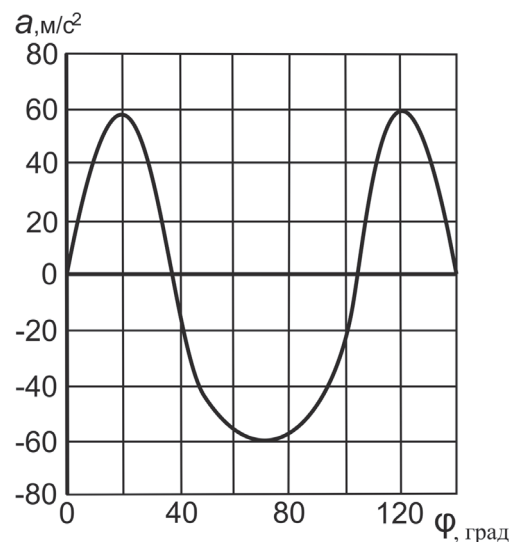


Рис. 3. Ускорения нового отмасштабированного закона ускорений

Скорость для нового закона можно найти из выражения

$$V(t) = \frac{\int_0^t a(t) dt}{\mu}, \quad (5)$$

где  $\mu$  – масштабный коэффициент, связанный с численным интегрированием.

График скорости приведен на рис. 4.

Для определения энергетических затрат механизма прибора уточных нитей необходимо определить работу, затраченную на преодоление сил сопротивления от действия технологической нагрузки, работу от сил инерции механизма, энергию, затраченную на упругие деформации.



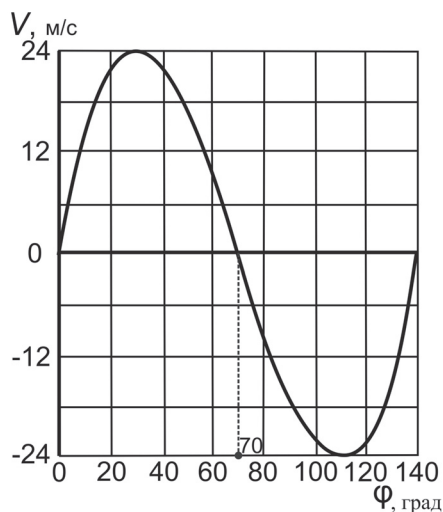


Рис. 4. График скорости ведомого звена для нового закона

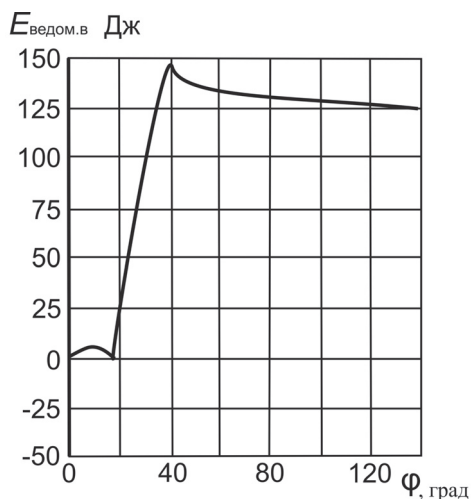


Рис. 5. График энергии, развиваемой ведомым валом механизма

Энергию ведомых частей механизма можно определить исходя из технических характеристик станка СТБ: мощность на ведущем валу механизма – 2,046 кВт с учетом КПД клиноременной передачи; частота вращения ведущего вала механизма 240 мин<sup>-1</sup>. Момент на ведомом валу (без учета КПД кулачкового механизма) определяется по формуле

$$M_{\text{ведом.в}} = \frac{Pl}{V}, \quad (6)$$

где  $M_{\text{ведом.в}}$  – момент на ведомом валу кулачкового механизма;  $P$  – мощность на ведущем валу кулачкового механизма;  $V$  – скорость ведомого звена;  $l$  – длина коромысла.

Тогда энергия на ведомом валу механизма определится в виде

$$E_{\text{ведом.в}}(t) = \int_0^t M_{\text{ведом.в}}(t) dt. \quad (7)$$

График энергии, развиваемой на ведомом валу, приведен на рис. 5.

Энергия, развиваемая от действия момента от сил инерции, определяется из выражения:

$$E_{\text{и}}(t) = \int_0^t M_{\text{и}}(t) dt, \quad (8)$$

где  $M_{\text{и}}(t) = \varepsilon(t)J_o$ ;  $\varepsilon(t)$  – угловое ускорение ведомого звена (ведомого вала);  $J_o$  – момент инерции массы ведомого звена (сборки ведомого вала).

График энергии от момента сил инерции изображен на рис. 6.

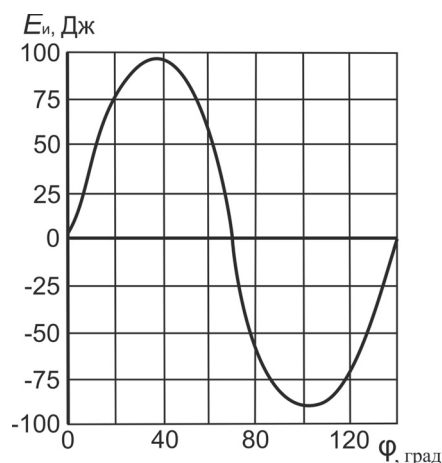


Рис. 6. График энергии от сил инерции, развиваемой ведомым звеном

Для определения энергии от действия технологической нагрузки необходимо знать ее величину, фазовый угол и характер действия (рис. 7).

Энергию от действия сил прибора определим из выражения

$$E_{\text{пр}}(t) = \int_0^t M_{\text{пр}}(t) dt. \quad (9)$$

Момент от сил прибора определяется в соответствии с выражением

$$M_{\text{пр}}(t) = F_{\text{пр}}(t)h, \quad (10)$$

где  $F_{\text{пр}}(t)$  – усилие прибора, необходимое для формирования ткани (согласно рис. 7) и зависит от угла поворота  $\varphi$ ;  $h$  – плечо силы.

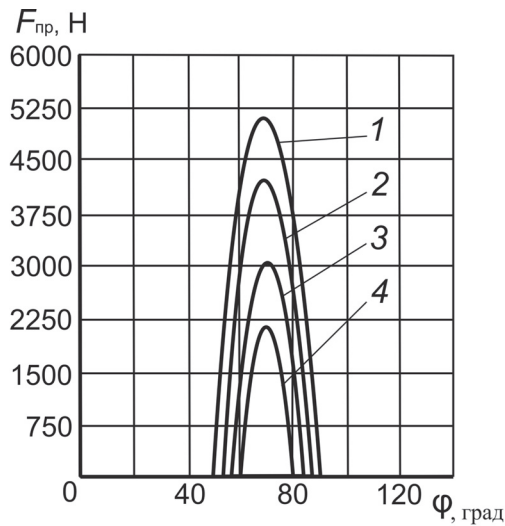


Рис. 7. График технологической нагрузки при усилиях прибора:

1 – 5300 Н; 2 – 4000 Н; 3 – 3000 Н; 4 – 2200 Н

В результате расчетов, проведенных для величины усилия 2000 Н (см. рис. 7, кривая 4), получен график энергии  $E_{пр}(t)$ , который имеет вид, представленный на рис. 8.

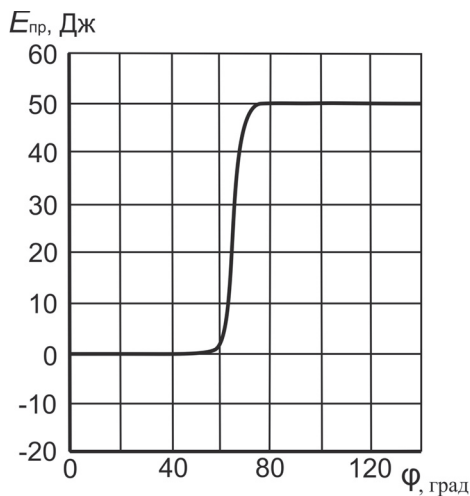


Рис. 8. График энергии от технологической нагрузки при усилии прибора 2000 Н

Аналогично приведенному примеру были рассчитаны энергетические затраты и для других значений усилий, показанных на рис. 7.

Величина суммарной энергии определяется из выражения

$$E_{сум} = E_{и} + E_{ведом.в} + E_{упр.кол} + E_{пр}, \quad (11)$$

где  $E_{сум}$  – суммарное значение энергий;  $E_{и}$  – энергия от сил инерции;  $E_{ведом.в}$  – энер-

гия, развиваемая ведомым валом механизма;  $E_{упр.кол}$  – энергия от сил упругости;  $E_{пр}$  – энергия от сил прибора.

В работе не приводятся данные энергетических затрат, идущих на упругие колебания ( $E_{упр.кол}$ ), из-за большого объема вычислений, а также в связи с тем, что их значения на порядок меньше, чем от сил полезного сопротивления и сил инерции.

График суммарной энергии от вышеперечисленных факторов показан на рис. 9.

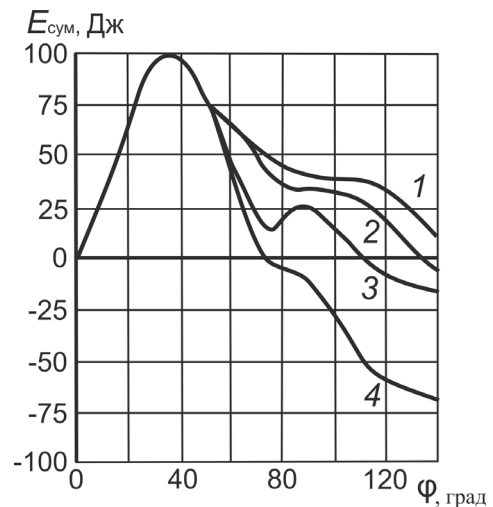


Рис. 9. График суммарной энергии

Для определения конструктивных параметров механизма необходимо знать перемещения ведомого звена. Их можно определить по формуле

$$S(t) = \frac{\int_0^t V(t) dt}{\sigma}, \quad (12)$$

где  $\sigma$  – масштабный коэффициент, связанный с численным интегрированием.

### Результаты и обсуждение

В результате проведенной работы получены графики суммарной энергии, представленные на рис. 9 (варианты 1–4), которые указывают на то, что часть графиков (1–3) для момента прибора уточных нитей (60...80°) находятся в положительной области, а график 4 пересекает нулевую линию и находится в отрицательной области. Графики 1–3 соответствуют наличию положительной энергии, которая необходима для фор-

мирования тканей с усилиями прибора от 2000 и до 4500 Н, а график 4 с усилием прибора 6500 Н указывает на то, что такие ткани при данных параметрах конструкции механизма прибора уточных нитей вырабатываться не могут.

Получены численные значения радиусов-векторов кулачка в виде таблицы (см. таблицу). При выполнении расчетов минимальный радиус кулачка принят равным 90 мм. Значения радиусов-векторов приведены с шагом  $5^\circ$  угла поворота ведущего вала.

### Выводы

1. В результате проведенных исследований установлено, что в настоящее время синтез кулачковых механизмов проводят только по основным критериям, включающим фазовые углы, законы, представленные либо в аналитической форме, либо в виде таблиц профиля.

2. При проектировании механизмов подобного типа учитывают такие параметры, как максимальные углы давления, значения радиусов кривизны профиля, но не учитываются необходимая

энергия для осуществления полезной работы, работа от сил инерции, работа, которая затрачивается как на деформацию самого механизма, так и на составляющие элементы всей машины.

3. Авторами предлагается методика синтеза кулачковых механизмов для технологических машин, включающая в себя определение энергетических затрат:

- от полезной нагрузки;
- сил инерции;
- момента на ведомом валу кулачкового механизма.

4. Теоретические исследования апробированы на модели конкретной машины (станок ткацкий типа СТБ), синтезирован закон движения механизма прибора уточных нитей, предложен новый профиль кулачка в виде таблицы радиусов-векторов.

5. Кривые энергетических затрат, представленные на рис. 9, позволяют разграничивать ассортиментные возможности ткацких машин по величине технологического усилия и рекомендовать предприятиям наиболее рациональные режимы работы оборудования.

Значения радиусов-векторов в зависимости от угла поворота кулачка

№ п/п	Угол профиля, град	Значения радиуса-вектора, мм	№ п/п	Угол профиля, град	Значения радиуса-вектора, мм
1	0	90	16	75	114,619
2	5	90,057	17	80	113,68
3	10	90,034	18	85	112,127
4	15	91,369	19	90	110,000
5	20	92,975	20	95	107,383
6	25	95,251	21	100	104,408
7	30	98,086	22	105	101,024
8	35	101,239	23	110	98,086
9	40	104,408	24	115	95,251
10	45	107,383	25	120	92,977
11	50	110,000	26	125	91,369
12	55	112,127	27	130	90,434
13	60	113,068	28	135	90,057
14	65	114,619	29	140	0,000
15	70	114,933	30	145	0,000



**Список литературы**

1. Ondrášek J. The synthesis of a hook drive cam mechanism // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 92. – P. 320–329. – doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.129.
2. Myszka D.H. *Machines & mechanisms: applied kinematic analysis*. – 4<sup>th</sup> ed. – Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2012. – 376 p. – ISBN-10: 0132157802. – ISBN-13: 978-0132157803.
3. Mott R.L. *Machine elements in mechanical design*. – 5<sup>th</sup> ed. – Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2013. – 816 p. – ISBN-10: 0135077931. – ISBN-13: 978-0135077931.
4. Sateesh N., Rao C.S.P., Janardhan Reddy T.A. Optimisation of cam-follower motion using B-splines // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. – 2009. – Vol. 22, iss. 6. – P. 515–523. – doi: 10.1080/09511920802546814.
5. Vulfson I. *Dynamics of cyclic machines*. – Cham: Springer International Publ., 2015. – 390 p. – ISBN 978-3-319-12633-3. – doi: 10.1007/978-3-319-12634-0.
6. Rothbart H.A. *Cam design handbook*. – New York: McGraw-Hill Professional Publ., 2003. – 606 p. – ISBN-10 0071377573. – ISBN-13: 978-0875841830.
7. Faxin L., Xianzhang F. The design of parallel combination for cam mechanism // *Procedia Environmental Sciences*. – 2011. – Vol. 10, pt. B. – P. 1343–1349. – doi: 10.1016/j.proenv.2011.09.215.
8. Design and analysis of high-speed cam mechanism using Fourier series / C. Zhoua, B. Hua, S. Chenb, L. Mac // *Mechanism and Machine Theory*. – 2016. – Vol. 104. – P. 118–129. – doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.009.
9. Артоболевский И.И. *Теория механизмов и машин: учебник для вузов*. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1988. – 640 с. – ISBN 5-02-013810-X.
10. Вульфсон И.И. *Динамика цикловых машин*. – СПб.: Политехника, 2013. – 425 с. – ISBN 978-5-7325-1024-9.
11. Dresig H., Vul'fson I.I. *Dynamik der mechanismen*. – Wien; New York: Springer, 1989. – 328 p. – ISBN 978-3-7091-9036-4. – doi: 10.1007/978-3-7091-9035-7.
12. Левитский Н.И. *Теория механизмов и машин: учебное пособие для вузов*. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1990. – 592 с. – ISBN 5-02-014188-7.
13. Фролов К.В. *Теория механизмов и машин*. – М.: Высшая школа, 1987. – 496 с.
14. Fomin A., Paramonov M. Synthesis of the four-bar double-constraint mechanisms by the application of the Grubler's method // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 150. – P. 871–877. – doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.034.
15. To the theory of mechanisms subfamilies / A. Fomin, L. Dvornikov, M. Paramonov, A. Jahr // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 124. – P. 012055. – doi: 10.1088/1757-899X/124/1/012055.
16. S&A – Expert system for planar mechanisms design / H. Varbanov, T. Yankova, K. Kulev, S. Lilov // *Expert Systems with Applications*. – 2006. – Vol. 31, iss. 3. – P. 558–569. – doi: 10.1016/j.eswa.2005.09.081.
17. Подгорный Ю.И., Афанасьев Ю.А., Кириллов А.В. *Исследование и выбор параметров при синтезе и эксплуатации механизмов технологических машин: монография*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 196 с.
18. *Исследование и синтез законов движения кулачковых механизмов: монография* / Ю.И. Подгорный, А.В. Кириллов, О.В. Максимчук, М.В. Лукин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 219 с.
19. Алехина Г.Б. *Многокритериальный синтез кулачковых механизмов с неформальным заданием законов движения толкателя: дис. ... канд. техн. наук*: 05.02.18. – Омск, 2000. – 174 с.
20. Рыбникова Е.В. *Динамический синтез кулачковых механизмов с учетом контактного взаимодействия элементов высшей пары: дис. ... канд. техн. наук*: 05.02.18. – Омск, 2005. – 165 с.
21. Лукин М.В. *Синтез законов движения кулачковых механизмов на основе гармонических составляющих ряда Фурье: автореф. дис. ... канд. техн. наук*: 05.02.18. – Новосибирск, 2007. – 16 с.
22. Подгорный Ю.И. *Методы исследования заправок, их синтез и разработка критериев оптимальности условий эксплуатации ткацких станков при формировании плотных тканей: дис. ... д-ра техн. наук*: 05.19.03; 05.02.13: защищена 20.05.1990: утв. 07.12.1990. – Кострома, 1990. – 541 с.
23. Подгорный Ю.И., Кириллов А.В., Максимчук О.В. *Исследование закона движения кулачкового механизма с учетом деформаций конструктивных элементов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. – 2014. – № 3. – С. 115–122.
24. Моделирование несущих систем технологических машин / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, В.Н. Пушкин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2014. – № 2 (63). – С. 91–99.
25. Выбор конструктивных параметров несущих систем машин с учетом технологической нагрузки / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, О.В. Максимчук, Д.В. Лобанов, В.Р. Глейм, А.К. Жигулев, О.В. Саха // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2015. – № 4 (69). – С. 51–60. – doi: 10.17212/1994-6309-2015-4-51-60.
26. Определение жесткостных характеристик и энергии деформации несущих систем технологических машин / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, О.В. Максимчук, Т.Г. Мартынова, Д.В. Лобанов, И.С. Филатов, П.Ю. Скиба // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2016. – № 4 (73). – С. 24–33. – doi: 10.17212/1994-6309-2016-4-24-33.

**OBRABOTKA METALLOV**

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (75), April – June 2017, Pages 17–27

**Cam mechanism designing with account of the technological load and energy costs****Podgornyj Yu. I.**<sup>1,2</sup>, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: pjui@mail.ru**Skeeba V. Yu.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skeeba\_vadim@mail.ru**Kirillov A. V.**<sup>1,3</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kirillovalvs@mail.ru**Maksimchuk O. V.**<sup>2</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ovmak@mail.ru**Skeeba P. Yu.**<sup>1</sup>, Student, e-mail: skeeba@rambler.ru<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation<sup>2</sup>Novosibirsk Technological Institute (branch) Russian State University named after A.N. Kosygin (Technology. Design. Art), 35 Krasny prospect ( 5 Potaninskaya st.), Novosibirsk, 630099, Russian Federation<sup>3</sup>Novosibirsk State Pedagogical University, 28 Viluiskaya st., Novosibirsk, 630126, Russian Federation**Abstract**

The problems of the cam mechanisms designing are discussed. The analysis of scientific literature on this problem indicates that today the synthesis of motion laws is usually performed without account of energy costs. The main criteria including phase angles and laws presented either in the analytic form or as tables of the cam profile are considered. The goal of the present study was to develop the method for synthesis of the motion laws of a cam mechanism with the account of energy costs from the payload, moment of inertia force, elastic forces of the mechanism elements and energy of the slave unit. This study is relevant due to the lack of uniform methodology taking into account energy costs during the mechanism design. A computational model of the slay mechanism of STB loom was used in the study. The values of work used to overcome resistance from the technological load, work from the mechanism inertia forces and energy used for elastic deformations of the mechanism elements were calculated to determine the energy costs of the mechanism. The mathematical package MathCad was used in the calculations. The analysis of the calculation results indicates that certain types of fabrics cannot be produced using existing parameters of the slay mechanism. A method for synthesis of cam mechanisms for technological machines including determination of energy costs from the payload, inertia forces and moment on the slave shaft of the cam mechanism was suggested on the basis of the performed studies. The theoretical studies were tested using a model of a particular machine – STB loom. The motion law of the slay mechanism was synthesized. A new profile of the cam in the form of the radius-vector table was suggested. The obtained results make it possible to discriminate assortment abilities of weaving machines by the values of the technological force and recommend their most efficient operation modes to factories.

**Keywords**

mechanism design, cam mechanism, synthesis of motion law, deformation of construction elements, load-carrying system, technological machine, deformation energy, technological load, STB loom

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-17-27

**References**

1. Ondrášek J. The synthesis of a hook drive cam mechanism. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 92, pp. 320–329. doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.129.
2. Myszka D.H. *Machines & mechanisms: applied kinematic analysis*. 4<sup>th</sup> ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson Publ., 2012. 376 p. ISBN-10: 0132157802. ISBN-13: 978-0132157803.
3. Mott R.L. *Machine elements in mechanical design*. 5<sup>th</sup> ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson Publ., 2013. 816 p. ISBN-10: 0135077931. ISBN-13: 978-0135077931.
4. Sateesh N., Rao C.S.P., Janardhan Reddy T.A. Optimisation of cam-follower motion using B-splines. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2009, vol. 22, iss. 6, pp. 515–523. doi: 10.1080/09511920802546814.
5. Vulfson I. *Dynamics of cyclic machines*. Cham, Springer International Publ., 2015. 390 p. ISBN 978-3-319-12633-3. doi: 10.1007/978-3-319-12634-0.

6. Rothbart H.A. *Cam design handbook*. New York, McGraw-Hill Professional Publ., 2003. 606 p. ISBN-10 0071377573. ISBN-13: 978-0875841830.
7. Faxin L., Xianzhang F. The design of parallel combination for cam mechanism. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, vol. 10, pt. B, pp. 1343–1349. doi: 10.1016/j.proenv.2011.09.215.
8. Zhoua C., Hua B., Chenb S., Mac L. Design and analysis of high-speed cam mechanism using Fourier series. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, vol. 104, pp. 118–129. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.009.
9. Artobolevskii I.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Nauka Publ., 1988. 640 p. ISBN 5-02-013810-X.
10. Vul'fson I.I. *Dinamika tsiklovykh mashin* [Dynamics of cyclic machines]. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 2013. 425 p. ISBN 978-5-7325-1024-9.
11. Dresig H., Vul'fson I.I. *Dynamik der mechanismen*. Wien, New York, Springer, 1989. 328 p. ISBN 978-3-7091-9036-4. doi: 10.1007/978-3-7091-9035-7.
12. Levitskii N.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machine]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Nauka Publ., 1990. 592 p. ISBN 5-02-014188-7.
13. Frolov K.V. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 496 p.
14. Fomin A., Paramonov M. Synthesis of the four-bar double-constraint mechanisms by the application of the Grubler's method. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 871–877. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.034.
15. Fomin A., Dvornikov L., Paramonov M., Jahr A. To the theory of mechanisms subfamilies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 124, p. 012055. doi: 10.1088/1757-899X/124/1/012055.
16. Varbanov H., Yankova T., Kulev K., Lilov S. S&A – Expert system for planar mechanisms design. *Expert Systems with Applications*, 2006, vol. 31, iss. 3, pp. 558–569. doi: 10.1016/j.eswa.2005.09.081.
17. Podgorniy Yu.I., Afanas'ev Yu.A., Kirillov A.V. *Issledovanie i vybor parametrov pri sinteze i ekspluatatsii mekhanizmov tekhnologicheskikh mashin* [Research and selection of parameters in the synthesis and operation mechanisms of technological machines]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2002. 196 p.
18. Podgorniy Yu.I., Kirillov A.V., Maksimchuk O.V., Lukin M.V. *Issledovanie i sintez zakonov dvizheniya kulachkovykh mekhanizmov* [Research and synthesis of the laws of motion of cam mechanisms]. Novosibirsk, NSPU Publ., 2011. 219 p.
19. Alekhina G.B. *Mnogokriterial'nyi sintez kulachkovykh mekhanizmov s neformal'nym zadaniem zakonov dvizheniya tolkatelya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Multicriteria synthesis of cam mechanisms with an informal specification of the laws of motion of the pusher. PhD eng. sci. diss.]. Omsk, 2000. 174 p.
20. Rybnikova E.V. *Dinamicheskii sintez kulachkovykh mekhanizmov s uchetom kontaktnogo vzaimodeistviya elementov vysshei pary*. Diss. kand. tekhn. nauk [Dynamic synthesis of cam mechanisms taking into account the contact interaction of elements of the higher pair. PhD eng. sci. diss.]. Omsk, 2005. 165 p.
21. Lukin M.V. *Sintez zakonov dvizheniya kulachkovykh mekhanizmov na osnove garmonicheskikh sostavlyayushchikh ryada Fur'e*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Synthesis of the laws of motion of cam mechanisms based on the harmonic components of the Fourier series. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2007. 16 p.
22. Podgorniy Yu.I. *Metody issledovaniya zapravok, ikh sintez i razrabotka kriteriev optimal'nosti uslovii ekspluatatsii tkatskikh stankov pri formirovanii plotnykh tkanei*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Research methods refills, their synthesis and development of criteria of optimality conditions looms in the formation of dense tissue. Dr. eng. sci. diss.]. Kostroma, 1990. 541 p.
23. Podgorniy Yu.I., Kirillov A.V., Maksimchuk O.V. *Issledovanie zakona dvizheniya kulachkovogo mekhanizma s uchetom deformatsii konstruktivnykh elementov* [Investigation of the cam mechanism motion law with structural elements deformations]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya "Tekhnicheskie nauki" = Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2014, no. 3, pp. 115–122.
24. Podgorniy Yu.I., Skeebe V.Yu., Kirillov A.V., Pushnin V.N., Erokhin I.A., Kornev D.Yu. *Modelirovanie nesushchikh sistem tekhnologicheskikh mashin* [Modeling of the technological machines support systems]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2014, no. 2 (63), pp. 91–99.
25. Podgorniy Yu.I., Skeebe V.Yu., Kirillov A.V., Maksimchuk O.V., Lobanov D.V., Gleim V.R., Zhigulev A.K., Sakha O.V. *Vybor konstruktivnykh parametrov nesushchikh sistem mashin s uchetom tekhnologicheskoi nagruzki* [Selection of form factors of machine carrying systems in reliance on the process duty]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2015, no. 4 (69), pp. 51–60. doi: 10.17212/1994-6309-2015-4-51-60.



26. Podgornyj Yu.I., Skeebe V.Yu., Kirillov A.V., Maksimchuk O.V., Martynova T.G., Lobanov D.V., Filatov I.S., Skeebe P.Yu. Opredelenie zhestkostnykh kharakteristik i energii deformatsii nesushchikh sistem tekhnologicheskikh mashin [Determination of the rigidity and deformation energy of the technological machine load-carrying systems]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2016, no. 4 (73), pp. 24–33. doi: 10.17212/1994-6309-2016-4-24-33.

### **Funding**

This study was supported by a NSTU grant (project No. ТП-ИТМ-1\_17)

### **Article history**

Received 11 January 2017

Revised 10 February 2017

Accepted 14 April 2017

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕКОРАТИВНОЙ ШКАТУЛКИ ИЗ МЕТАЛЛА

*Ю.В. ВЕСЕЛОВА<sup>1</sup>, канд. пед. наук, доцент*  
*Е.А. ЛОЖКИНА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент*  
*И.А. ФЕДОСЕЕВА<sup>2</sup>, доктор пед. наук, профессор*  
*(<sup>1</sup>НГТУ, г. Новосибирск,*  
*<sup>2</sup>НГПУ, г. Новосибирск)*

Поступила 16 февраля 2017  
Рецензирование 10 марта 2017  
Принята к печати 14 апреля 2017

**Веселова Ю.В.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: wes60@mail.ru

Рассматриваются проблемы проектирования и создания одного из видов ювелирных изделий – декоративной шкатулки для драгоценностей, выполненной из металла. Подробно описана последовательность дизайн-проектирования – от выбора темы до изготовления изделия. Обоснована актуальность разрабатываемого изделия, проанализированы аналоги изделия, представленные на рынке современной продукции с точки зрения художественного решения, материала, конструкции. С учетом анализа достоинств и недостатков существующих аналогов разработан оригинальный эскиз проектируемой шкатулки, отвечающий эстетическим, конструктивным и функциональным требованиям дизайна. При создании шкатулки также были учтены эргономические факторы, предполагающие удобство пользования изделием. Обоснован выбор материала, исходя из свойств которого выбран технологический процесс, необходимый для изготовления данного вида шкатулки. При помощи программы *Inventor* была рассчитана масса изделия, а также произведен расчет на прочность шарнирного соединения шкатулки. Выполнены необходимые чертежи, мастер-модель для литья по выплавляемым моделям. В работе описан технологический процесс изготовления шкатулки, состоящий из трех основных этапов: 1) изготовление корпуса шкатулки; 2) нанесение декоративного покрытия; 3) сборка изделия. Рассматривается технология литья для единичного производства изделия. Реализованным результатом дизайн-проектирования стала изготовленная шкатулка для драгоценностей, основу художественного образа которой представили стилизованные фигуры двух жирафов со сплетенными шеями. Использование стилизованных фигурок животных и птиц для изготовления маленьких металлических шкатулок, украшенных эмалью и драгоценными вставками, считается модным трендом в настоящее время.

**Ключевые слова:** ювелирное изделие, дизайн-проектирование, эскиз, технология литья по выплавляемым моделям, мастер-модель.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-28-37

## Введение

Среди множества ювелирных изделий, представленных на современном рынке, есть отдельная группа – ювелирные украшения для интерьера. Это различного рода сувениры, мелкая пластика, статуэтки, шкатулки, подсвечники, декоративные подставки для книг – все те мелочи,

что украшают быт человека. В наше время высоких технологий с появлением массового производства рынок заполнили различные сувениры, техника, бытовые вещи, имеющие не только низкую стоимость, но зачастую и низкое качество. Причиной тому стало преобладание на рынке продукции, не отличающейся оригинальностью, выполненной как правило из дешевых материа-

лов, имитирующих более дорогие. Такие изделия не требуют больших затрат в производстве, однако качество их оставляет желать лучшего. Поэтому актуальна разработка и создание качественной продукции подобного рода, соответствующей требованиям дизайна – социальным, утилитарно-функциональным, эргономическим и эстетическим. Кроме того, при разработке такой продукции важной составляющей являются экономические требования, учитывающие материальные затраты на производство изделия [1].

Вещи и среда, создаваемые дизайном, служат не только целям удобства и какой-либо пользы, но и эстетическому воздействию, связанному с образом жизни общества, его культурой, типом мышления и деятельности. Основная проблема прежде всего состоит в выборе темы проектирования, так как необходимо найти такой вид ювелирной продукции, который в наименьшей степени был бы представлен в современном ассортименте ювелирного дизайна. Кроме того, выбранное для проектирования изделие должно быть технологично в изготовлении, сочетать в себе оптимальные конструктивные, функциональные и эстетические качества.

Дизайн-проектирование основано на теории проектной культуры, методологии дизайна и проектной деятельности, которая исследовалась теоретиками Всесоюзного научно-исследовательского института технической эстетики (Г.П. Щедровицким, О.И. Генисаретским, В.Л. Глазычевым, А.А. Дороговым, Л.Б. Переверзевым, В.Ф. Рунге, В.И. Пузановым, В.Ф. Сидоренко и др.).

Любые вещи, в том числе и ювелирные изделия, являются, прежде всего, элементом материальной культуры, они обладают совокупностью многих свойств, отражают эстетические идеалы, представления о красоте и пользе их создателя и потребителя. В вещах материализуются черты эпохи, уклад жизни, исторически формирующиеся вкусы. В процессе восприятия необходимо понять функции вещи в живой культуре, ее смысловые оболочки: собственные функции, а также социальные, например вещь, как показатель статуса потребителя [3]. Проектируя конкретную вещь (декоративную шкатулку), авторы ориентировались на научные труды А.Е. Торненко, К.М. Кантора, С.М. Темерина, Е.Н. Лазарева, Ю.Я. Герчука, В.И. Тасалова, Х.Т. Тхагопсоева, в которых рассматривались проблемы истории,

теории и практики материальной культуры, прикладного искусства, дизайна.

В связи с тем что процесс проектирования ювелирного изделия связан с разработкой поисковых эскизов, в своей работе авторы опирались на данные научных трудов В.П. Зинченко, В.С. Кузина, В.К. Лебедко, Л.Г. Медведева, Е.В. Шорохова, Ю.М. Агиева, Н.С. Ищук, О.Е. Колоколовой, Е.Д. Кузнецова, В.Е. Нестеренко, Л.А. Панова, А.И. Сухарева, связанные с проблемами творческого процесса изображения.

Эскизный поиск – это процесс творческий. Здесь актуальным является совмещение аналитической мыслительной деятельности и образного мышления, чему способствуют методы дизайна, основы которых разрабатывались в исследовательских работах Г.С. Альтшуллера, Ю.А. Дмитриева, С.А. Новоселова, В.П. Пархоменко, Т.В. Гудковой и др.

При выборе материалов и технологии изготовления изделия в основу работы легли фундаментальные и прикладные исследования в области художественной обработки металла (В.Ф. Григорьев, И.В. Козлов, М.В. Соколов, А.С. Хворостов), а также труды мастеров-ювелиров: Э. Бреполя, Е. Говорухина, В.И. Марченкова, Овчинникова, В.П. Новикова, В.С. Павлова, К. Фаберже, А.В. Флерова, семьи Чигриных, семьи Г. и Н. Шароновых и др.

Таким образом, целью настоящей работы является проектирование ювелирного изделия для интерьера. Поиск формы изделия, композиции, оптимального цветового решения, конструкции, материала и способа изготовления – основная задача данной работы.

## Проектирование изделия

Разработка изделия происходит в строгой последовательности дизайн-проектирования. В несколько упрощенном определении дизайн можно рассматривать как особенную сферу деятельности по проектированию предметно-пространственной среды в целом, а также отдельных ее компонентов с целью придания результатам проектирования эстетических качеств, оптимизации и гармонизации их взаимодействия с человеком [1]. Побудительный момент любой деятельности – наличие потребностей. Поэтому первым этапом в создании какого-либо объекта является



определение потребности именно в его проектировании. Для этого проводится предпроектное исследование, анализ уже существующих объектов подобного вида.

Второй этап дизайн-проектирования – это обозначение требований к объекту проектирования, после чего происходит выработка первоначальных идей в виде эскизного поиска, анализ эскизов и выбор одного – оптимального. Затем идет этап прогнозирования, т. е. предположение относительно общих количественно-качественных действий. На данном этапе происходит выбор материала и технологии изготовления изделия.

Следующий этап – программирование, происходящее на основе прогноза, на котором происходит относительно детальная разработка содержания (состава) и формы (порядка) действий.

На этапе планирования составляется конструкторская и технологическая документация: выполняются чертежи, составляются операционные и маршрутные карты изготовления изделия. Практически одновременно происходит моделирование объекта, чаще всего – это компьютерное моделирование с использованием программ, на основе которого происходит расчет на прочность, устойчивость и другие параметры, необходимые для изготовления готового продукта. Завершающим этапом является реализация дизайн-проекта, когда изделие изготавливается в соответствии с выбранной технологией.

Выбор темы проектирования происходит на основе исследования современного рынка соответствующей интерьерной ювелирной продукции, а также некоторых социологических методов исследования – опросов, анкетирования. На основании результатов, полученных в ходе исследований, в качестве объекта проектирования была выбрана небольшая шкатулка, в основе формы которой заложена форма животного. В последнее время такие декоративные, а иногда и ювелирные маленькие шкатулочки необычной формы вошли в моду – они могут не только служить украшением интерьера, выступать в качестве статуэтки, но и выполнять свое функциональное назначение: в них хранят драгоценности или другие мелочи. Материалом для изготовления таких шкатулок служит металл, что делает их долговечными и очень прочными, а

эмаль, которой покрыты шкатулки, придает изделию красоту.

Обязательным этапом проектирования любого изделия является анализ его аналогов. Это требуется для усовершенствования формы, подбора требуемого стиля, а также улучшения конструкции изделия в соответствии с требованиями эргономичности.

В процессе анализа аналогов было рассмотрено несколько изделий. Для примера рассмотрим одно из них. Изделие (рис. 1) представляет собой шкатулку в форме совы, сидящей на веточке дерева. Габаритные размеры изделия: 55 × 45 × 80 мм. Шкатулка выполнена в теплой цветовой гамме из металла с золотистым металлическим покрытием и цветной эмалью. Голова инкрустирована стразами желтого цвета. Стоимость такой шкатулки составляет 1 300 руб. (см. рис. 1) [2]. К достоинствам изделия можно отнести:

- интересное дизайнерское решение;
- красивое сочетание цветов;
- части шкатулки расположены так, что не каждый поймет, что это шкатулка, а не просто сувенир;
- отсутствие острых краев;
- устойчивость.

Недостатками изделия являются:

- высокая стоимость;
- малая вместительность.

Разрабатываемое изделие должно быть выполнено в соответствии с основными принципами дизайна, предполагающими единство пользы и красоты. Однако вещи и среда, создаваемые дизайнером, могут служить не только целям удобства и пользы, но эстетическим воздействием на человека. Возможно, поэтому для ювелирного изделия, а также для ряда сувенирной продукции эстетические требования будут превалировать над требованиями функционально-



Рис. 1. Шкатулка «Мудрая совушка» [2]

сти. Ювелирное искусство базируется на принципах эстетического восприятия и творческой деятельности художника.

Техника рисования, безусловно, имеет большое значение для проектировщика. Первоначально эскизы выполняются «от руки». В эскизе решаются проблемы композиции, формы, выразительности фигуры, пропорций, объема, цветовой гармонии будущего изделия. Параллельно прорабатываются вопросы конструкции, функциональности. Здесь большую роль играют творческие методы дизайна, позволяющие выдавать множество вариантов решения проблемы. Затем для качественной визуализации будущего изделия эскизы могут быть выполнены в программе *Corel Draw*.

Для разработки художественно-образного решения были выполнены эскизы пяти вариантов изделия, прототипами которых послужили природные зооморфные формы.

Эскизы выполняются с учетом результатов проведенного анализа достоинств и недостатков представленных выше аналогов.

Нужно заметить, что в процессе разработки эскизов важно правильно найти размер будущего изделия, а также его масштабность. На этом этапе очень важным является соблюдение пропорций при сохранении неделимости восприятия формы. Возможен ввод мелких элементов, а также обобщение, увеличение пластики мелкого объема, что делает размер изделия наиболее удобным для восприятия [4, 5].

Результатом эскизного поиска, как было отмечено выше, становится выбор одного оптимального эскиза, на основе которого и будет вестись разработка изделия. В данном случае был выбран эскиз, под условным названием «Влюбленные жирафы» (рис. 2). На нем изображена пара жирафов со сплетенными шеями. Для выполнения шкатулки была выбрана технология – метод литья по выплавляемым моделям. Предполагалось также декоративное покрытие цветной эмалью различных цветов, имитирующее окрас жирафов. Габаритные размеры сувенирной шкатулки составляют  $47 \times 53 \times 94$ .

### Выбор материалов

Выбор материала производится исходя из технологии изготовления изделия и его эксплу-



Рис. 2. Эскиз шкатулки «Влюбленные жирафы»

ационных характеристик. Традиционно для изготовления ювелирных изделий используются драгоценные металлы – золото, серебро, платина. Главный недостаток описанных материалов – их относительно высокая стоимость. В настоящей работе было принято решение предложить заменить драгоценные материалы их бюджетными аналогами. В основном внешний вид металла обуславливают такие свойства, как цвет и блеск. Именно они характеризуют художественно-эстетические достоинства металлов как материалов. Однако большинство металлов и их сплавов имеют довольно однообразную гамму сероватых, серебристых тонов. Исключение составляют два металла: золото и медь. Первый имеет насыщенный желтый цвет, второй отличается сильным оранжево-красным цветом. В таблице приведены цвета наиболее распространенных в художественной промышленности металлов и сплавов.

Из всего многообразия цветных металлов латунь обладает наиболее близкими к золоту эстетическими свойствами, к тому же ее стоимость относительно невелика.

Латунь – металл золотистого цвета с отличными литейными свойствами. Отрицательное свойство латуни заключается в их склонности к самопроизвольному коррозионному растрескиванию, которое происходит во влажной атмосфере при сохранении в сплаве после деформации остаточных напряжений. Развитию растрескивания способствует присутствие в атмосфере следов аммиака, аммонийных солей, сернистых газов. Это явление также называют сезонной болезнью, так как оно чаще всего происходит

**Цвета наиболее распространенных в художественной промышленности металлов и сплавов**

Металлы и сплавы	Цвет	Металлы и сплавы	Цвет
Чистое золото	Желтый	Чистое серебро	Белый
Низкопробное золото	Желто-красный	Низкопробное серебро	Серо-белый
Сплав золота с серебром	Желто-зеленый	Никель	Серый теплый
Медь	Красный	Хром	Холодный серый
Томпак	Красно-желтый	Алюминий	Тусклый серый
Латунь	Желто-зеленый	Литейный чугун	Серовато-черный
Бронза	Желто-красный	Зеркальный чугун	Серовато-белый

весной и осенью, когда влажность воздуха повышена. Растрескивание происходит из-за предпочтительной коррозии латуней по границам зерен в зоне неравномерного распределения напряжений. Для устранения склонности к растрескиванию проводят легирование латуней, которое позволяет получить более высокие по сравнению с двойными сплавами системы Cu–Zn, механические свойства и лучшую коррозионную стойкость. Временное сопротивление разрыву латуней наиболее эффективно повышает такой металл, как алюминий [7, 8].

Художественные отливки из латуней отличаются своим эстетичным внешним видом. Интересный оттенок металла добавляет отливке художественную ценность. Именно по этим причинам в качестве материала для шкатулки была выбрана латунь.

Для изготовления шкатулки «Влюбленные жирафы» выбрана технология литья по выплавляемым моделям. К основным литейным свойствам сплавов относятся: жидкотекучесть, заполняемость формы, усадка и ликвация. Этим требованиям в полной мере соответствуют литейные латуни: они не склонны к ликвации, имеют сосредоточенную усадку, отливки имеют высокую плотность. Согласно ГОСТ 17711–93 существуют 12 видов литейных латуней:

- латунь свинцовая (марка ЛЦ40С);
- латунь свинцовая (ЛЦ40Сд);
- латунь марганцовая (ЛЦ40Мц1,5);
- латунь марганцово-железная (ЛЦ40Мц3Ж);
- латунь марганцово-алюминиевая (ЛЦ40Мц3А);
- латунь марганцово-свинцовая (ЛЦ38Мц2С2);
- латунь марганцово-свинцово-кремнистая (ЛЦ37Мц2С2К);
- латунь алюминиевая (ЛЦ30А3);
- латунь оловянно-свинцовая (ЛЦ25С2);

– латунь алюминиево-железо-марганцовая (ЛЦ23А6ЖЗМц2);

– латунь кремнистая (ЛЦ16К4);

– латунь кремнисто-свинцовая (ЛЦ 14 КЗСЗ).

Алюминиевая латунь марки ЛЦ30А3 [6] (ЛА67-2,5) подходит для изготовления ответственных деталей, работающих при высоких удельных и знакопеременных нагрузках, при изгибе, а также антифрикционных деталей, что более чем полностью удовлетворяет условиям эксплуатации декоративной шкатулки.

### Расчет на прочность

Масса изделия, рассчитанная в программе *Inventor* с учетом выбранного материала, составляет 339 г. Наиболее нагруженным элементом шкатулки является шарнир, в связи с чем был произведен его расчет на прочность. Анализу подвергались шарниры толщиной 3, 4 и 5 мм. К ним прикладывалась нагрузка, составляющая 1 Н. По результатам моделирования испытание прошли все шарниры. Для большей уверенности в том, что шарнир выдержит и большие нагрузки, было принято решение взять шарнир средней толщины – 4 мм (рис. 3).

На следующем этапе к шарниру толщиной 4 мм была приложена нагрузка, в 10 раз превышающая первоначальную, равная 10 Н. В результате расчета было выявлено, что шарнир может находиться под такой нагрузкой не более 5 мин (рис. 4). Следовательно, шарнир можно использовать при изготовлении шкатулки, так как ее использование при таких нагрузках маловероятно.

Далее были разработаны сборочный чертеж и детали шкатулки. Крепление составных частей шкатулки осуществляется за счет расклепа вытяжной заклепки.



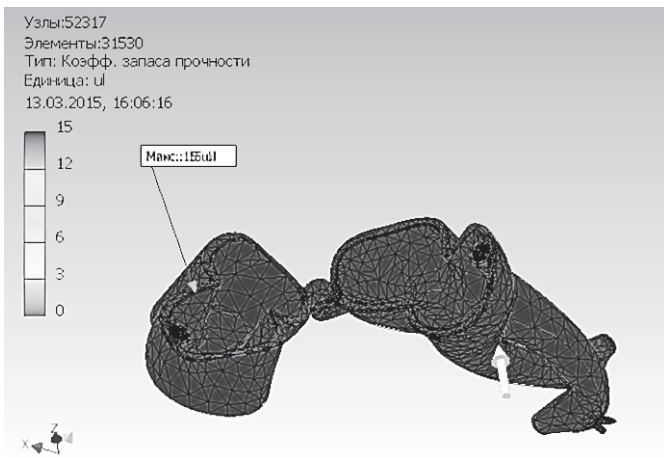


Рис. 3. Нагрузка 1 Н

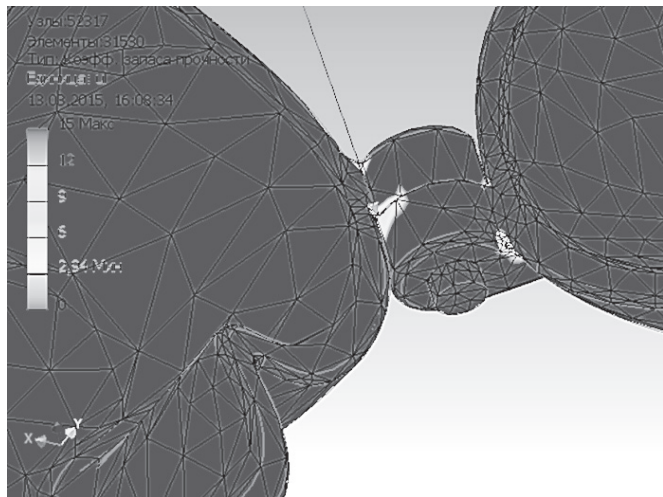


Рис. 4. Нагрузка 10 Н

## Технология изготовления

Технологический процесс изготовления шкатулки «Влюбленные жирафы» состоял из трех основных этапов: изготовление корпуса шкатулки, покрытие декоративным материалом и сборка изделия.

Для изготовления мелких художественных отливок чаще всего применяется литье по выплавляемым моделям. Данный метод позволяет получить отливки высокой точности, обладающие низкой шероховатостью.

Технология литья по выплавляемым моделям имеет ряд специфических особенностей:

- модель выплавляется в процессе изготовления формы и поэтому служит для получения только одной отливки;

- металл заливают в тонкостенные неразъемные формы, получаемые путем нанесения огнеупорного покрытия на модель, сушки покрытия, удаления (вытапливания) модели и последующего прокалывания формы;

- формовочная смесь представляет собой суспензию, состоящую из мелкозернистого огнеупорного материала и связующего раствора;

- применение мелкозернистых пылевидных огнеупорных материалов обеспечивает очень высокое качество поверхности отливки;

- высокая точность отпечатка модели достигается путем повышения температуры заливаемого металла, что требует использования высокоогнеупорных формовочных и связующих материалов [9].

Недостатками являются сложность и длительность процесса производства отливок, а также применение специальной дорогостоящей оснастки [9].

В практике литья по выплавляемым моделям особое место занимает эстрих-процесс. По существу, его возникновение связано с экономической стороной вопроса – более высокая производительность при низкой себестоимости отливок и высоком качестве изделий. Этот метод литья был использован при единичном производстве отливок из латуни. Шероховатость поверхности и точность размеров отливок при этом методе литья не уступают отливкам, полученным стандартным процессом литья по выплавляемым моделям [10].

Мастер-модель – основное звено современного процесса получения нового изделия. Изготовленная вручную или любым другим способом мастер-модель служит точной копией изделия, которое в дальнейшем собираются пустить в производство. В зависимости от метода получения исходным материалом для изготовления мастер-модели может служить полимер или полимерный композит (аддитивный метод), а также дерево, металл, пластик и другие аналогичные материалы (механический метод) [11].

Аддитивный метод («Additive» – добавление) используется на первоначальных этапах быстрого проектирования. Изготовление мастер-модели этим методом считается безотходным. Обычно он реализуется технологией 3D-печати на основе подготовленной компьютерной модели [11].

Механический метод – изготовление мастер-модели путем удаления лишнего материала из заготовки. Этот процесс также поддается автоматизации за счет использования многофункциональных обрабатывающих комплексов или роботизированных установок с последующей доводкой поверхности изделия до нужного состояния [11].

В нашем случае используется комбинированный метод, который включает в себя оба метода, представленных выше.

Для изготовления корпуса шкатулки была изготовлена мастер-модель из папье-маше, в качестве материала для которого использовались бумажные салфетки и клей ПВА. Полученная мастер-модель тщательно шлифовалась и полировалась, а затем покрывалась водостойкой краской (рис. 5).

Следующим этапом было изготовление восковых моделей. Создавалась силиконовая

форма и затем в нее заливался воск. После застывания восковка дорабатывалась и припаивалась к питателям. Далее питатели паялись на общий литник под углом  $90^\circ$ , и изготавливалась форма для литья методом нанесения суспензии и кварцевого песка. Наносилось шесть слоев, каждый из которых просушивался в течение суток.

После этого выплавлялся воск и производилась формовка опоки для большей прочности, и далее – заливка опоки. После застывания отливки детали отрезались от литниковой системы, осуществлялась очистка изделия, а также его шлифовка и полировка. После полировки сверлились отверстия в шарнире, выполнялась сборка изделия путем расклепа заклепки (рис. 6). На последнем этапе производилось нанесение декоративного покрытия. В качестве покрытия была выбрана ювелирная холодная эмаль *RUTASTAR* (рис. 7).



Рис. 5. Мастер-модель. Папье-маше



Рис. 6. Шкатулка после сборки



Рис. 7. Готовое изделие

## Выводы

В результате анализа современной ювелирной продукции в качестве темы дизайн-проекта было выбрано изготовление ювелирной декоративной шкатулки. В работе изложена последовательность изготовления декоративной шкатулки – от начала процесса проектирования до реализации. В рамках настоящего дизайн-проекта рассмотрена актуальность разрабатываемого изделия, оценены художественное решение, материалы и конструкция аналогов изделия, разработан оригинальный эскиз изготавливаемой шкатулки с учетом эстетических, конструктивных, функциональных принципов дизайна. Обоснован выбор материала, показан технологический процесс изготовления данного вида шкатулки. Предложена технология для единичного производства, но не исключена возможность реализации технологии с использованием соответствующего оборудования для мелкосерийного производства. Особо интересным представляется то, что в процессе расчетов была подобрана необходимая толщина шарнира, которая выдержит любые нагрузки вне зависимости от материала.

Таким образом, применение инженерных знаний в процессе дизайн-проектирования актуально и результативно. Удобство пользования, функциональность и привлекательный внешний вид – все эти требования к разрабатываемым объектам могут быть обеспечены только грамотным сочетанием эргономики и дизайна [12–15].

Шкатулка «Влюбленные жирафы» рассмотрена по следующим эргономическим показателям: масса, форма изделия и его функциональные характеристики.

Масса изделия составляет 0,339 кг. Обтекаемая форма изделия не имеет острых углов, что также соответствует эргономическим показателям.

Габаритные размеры изделия составляют 47×53×94 мм, что позволяет шкатулке спокойно поместиться в руке человека.

Изделие отвечает всем основным функциональным характеристикам: пространство для украшений имеет достаточную вместимость для нескольких изделий, магнитная застежка повышает надежность изделия, также высоки эстетические показатели изделия. Оценка соответствия продукции эстетическим требованиям прежде всего зависит от того, насколько утили-

тарные и общественно ценностные характеристики изделия выявлены в его форме. Вместе с тем ювелирное изделие, или изделие декоративно-прикладного искусства, каковым является настоящая шкатулка, может рассматриваться как предметный элемент художественной культуры. Поэтому здесь для создания и оценки данного изделия дизайнер использует законы композиции, тектоники, колористики, т. е. тот арсенал художественных средств и закономерностей, воплощающих в себе опыт эстетического освоения действительности поколениями художников и архитекторов [1].

Нам представляется, что изготовленная декоративная шкатулка будет пользоваться спросом на рынке как оригинальный подарок, памятная статуэтка-сувенир, емкость для хранения украшений.

В качестве материала для данного изделия выбрана латунь ЛЦ30А3, однако выполненная из драгоценных материалов такая шкатулка может стать оригинальным ювелирным украшением для интерьера, а также предметом коллекционирования.

## Список литературы

1. Рунге В.Ф., Сеньковский В.В. Основы теории и методологии дизайна: учебное пособие. – М.: МЗ-Пресс, 2001. – 253 с. – ISBN 5-94073-011-6.
2. Шкатулка «Мудрая совушка» [Электронный ресурс] // Красный куб. – URL: <http://www.redcube.ru/shkatulki-naboru-po-uhodu/shkatulka-mudraya-sovushka-62.I2.043/> (дата обращения: 11.05.2017).
3. Федосеева И.А., Веселова Ю.В. Развитие эстетического отношения к действительности у людей пожилого возраста в процессе занятий изобразительным искусством // Ученые записки Российского государственного социального университета. – 2015. – Т. 14, № 4 (131). – С. 177–185.
4. Голубева О.Л. Основы композиции. – М.: Искусство, 2004. – 119 с. – ISBN 5-85200-417-0.
5. Cook N. Analysis through composition: principles of the Classical style. – Oxford: Oxford University Press, 1996. – 204 p. – ISBN 10: 0198790139. – ISBN 13: 9780198790136.
6. Материаловедение: учебник для вузов / Б.В. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин, Н.М. Рыжов, В.И. Силаева. – 8-е изд., стер. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 646 с. – ISBN 978-5-7038-1860-2.



7. Гелин Ф.Д. Металлические материалы: справочник. – Минск: Вышэйшая школа, 1987. – 368 с.

8. Писарева Н.А., Веселова Ю.В. Изготовление кольца с аметрином методом литья // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2013. – Ч. 4. – С. 275–278.

9. Литье по выплавляемым моделям [Электронный ресурс] // Материаловед: для преподавателей и научных работников. – URL: <http://xn--80aagiccszezsw.xn--plai/uchebniki/specialnyevidy-litya/3-lite-po-vyplavlyаемым-modelyam> (дата обращения: 12.05.2017).

10. Лившиц В.Б. Художественное литье: материалы, технология, практика: учебник для вузов. – М.: Рипол классик, 2004. – 192 с. – ISBN 5-7905-2320-X.

11. Изготовление мастер моделей [Электронный ресурс] // Фолипласт: web-сайт. – URL: <http://www.foliplast.ru/articles/izgotovlenie-master-modeleie.html> (дата обращения: 12.05.2017).

12. Эргономика и дизайн [Электронный ресурс] // Fotokomok.ru. – URL: <http://www.fotokomok.ru/ergonomika-i-dizajn> (дата обращения: 12.05.2017).

13. Soares M., Rebelo F. Ergonomics in design: methods and techniques. – New York: CRC Press: Taylor & Francis Group, 2017. – 508 p. – ISBN 978-149-87-6070-6.

14. Elam K. Geometry of design: studies in proportion and composition. – New York: Princeton Architectural Press, 2001. – 108 p. – ISBN 9781568982496.

15. Salvendy G. Handbook of human factors and ergonomics. – 4th ed. – New Jersey: Wiley Publ., 2012. – 1752 p. – ISBN 978-0470528389. – doi: 10.1002/9781118131350.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (75), April – June 2017, Pages 28–37

### Design and manufacture of decorative metal box

Veselova Yu.V.<sup>1</sup>, Ph.D. (Education), Assistant Professor, e-mail: wes60@mail.ru

Lozhkina E.A.<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: helens\_case@ngs.ru

Fedoseeva I.A.<sup>2</sup>, D.Sc. (Education), Professor, e-mail: fedoseevairina60@gmail.com

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

<sup>2</sup>Novosibirsk State Pedagogical University, 28 Viluiskaya st., Novosibirsk, 630126, Russian Federation

#### Abstract

The paper deals with the problems of designing and creating one of the types of jewelry – decorative jewelry box made of metal. A detailed description of the sequence of design-engineering – from the choice of subjects to its manufacture – is given. The relevance of the product being developed is proved; the analysis of the product analogues is carried out in terms of artistic and material design. An original sketch of decorative jewelry box corresponding to aesthetic, structural and functional design requirements with a regard to an analysis of the strengths and weaknesses of the existing analogues is developed. The ergonomic factors, suggesting the convenience of use of the product are taken into account when creating jewelry box. The choice of material is justified. On the basis of the material properties the production process is selected. The product weight is calculated and the structural analysis of the pivoted fall joint is made involving *Inventor* software product. The necessary drawings, the master model for investment casting are made. The decorative jewelry box production process consisting of three main phases: 1) the production of the jewelry box case, 2) applying a decorative coating, 3) assembling of the jewelry box elements is described. Molding technology for the production of a single product is considered. As a result of design-engineering a jewelry box based on the artistic image of the stylized giraffe's figures with entwined necks is produced. The use of stylized figures of birds and animals for the production of small metal boxes adorned with enamel and precious inserts is a fashion trend at the moment.

#### Keywords

jewel, design, sketch, casting technology, investment casting, master model.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-28-37



## References

1. Runge V.F., Sen'kovskii V.V. *Osnovy teorii i metodologii dizaina* [The basis of the design theory and methodology]. Moscow, M3-Press Publ., 2001. 253 p. ISBN 5-94073-011-6.
2. *Shkatulka "Mudraya sovushka"* [Casket "Wise Owl"]. Available at: <http://www.redcube.ru/shkatulki-nabory-po-uhodu/shkatulka-mudraya-sovushka-62.I2.043/> (accessed 11.05.2017).
3. Fedoseeva I.A., Veselova Yu.V. *Razvitie esteticheskogo otnosheniya k deistvitel'nosti u lyudei pozhilogo vozrasta v protsesse zanyatii izobrazitel'nym iskusstvom* [The development of an aesthetic relationship to reality in the elderly in the course of employment by the fine arts]. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo sotsial'nogo universiteta = Scientific notes of Russian State Social University*, 2015, vol. 14, no. 4 (131), pp. 177–185.
4. Golubeva O.L. *Osnovy kompozitsii* [Composition basics]. Moscow, Iskusstvo Publ., 2004. 119 p. ISBN 5-85200-417-0.
5. Cook N. *Analysis through composition: principles of the Classical style*. Oxford, Oxford University Press, 1996. 204 p. ISBN 10: 0198790139. ISBN 13: 9780198790136.
6. Arzamasov B.V., Makarova V.I., Mukhin G.G., Ryzhov N.M., Silaeva V.I. *Materialovedenie* [Materials science]. 8<sup>th</sup> ed. Moscow, Bauman MsTU Publ., 2008. 646 p. ISBN 978-5-7038-1860-2.
7. Gelin F.D. *Metallicheskie materialy: spravochnik* [Metallic materials: a handbook]. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 1987. 368 p.
8. Pisareva N.A., Veselova Yu.V. [A ring with Ametrine production using casting technology]. *Materialy vs Rossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh "Nauka. Tekhnologii. Innovatsii"* [Proceedings of All-Russian Scientific Conference of Young Scientists "Science. Technologies. Innovations"]. Novosibirsk, 2013, pt. 4, pp. 275–278. (In Russian).
9. *Lit'e po vyplavlyaemym modelyam* [Investment casting]. Available at: <http://xn--80aagicszezsw.xn--plai/uchebniki/specialnye-vidy-litya/3-lite-po-vyplavlyaemym-modelyam> (accessed 12.05.2017).
10. Livshits V.B. *Khudozhestvennoe lit'e: materialy, tekhnologiya, praktika* [Art casting: materials, technology and practice]. Moscow, Ripol klassik Publ., 2004. 192 p. ISBN 5-7905-2320-X.
11. *Izgotovlenie master modelei* [Master models production]. Available at: <http://www.foliplast.ru/articles/izgotovlenie-master-modeleie.html> (accessed 12.05.2017).
12. *Ergonomika i dizajn* [Ergonomics and design]. Available at: <http://www.fotokomok.ru/ergonomika-i-dizajn> (accessed 12.05.2017).
13. Soares M., Rebelo F. *Ergonomics in design: methods and techniques*. New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. 508 p. ISBN 978-149-87-6070-6.
14. Elam K. *Geometry of design: studies in proportion and composition*. New York, Princeton Architectural Press, 2001. 108 p. ISBN 9781568982496.
15. Salvendy G. *Handbook of human factors and ergonomics*. 4<sup>th</sup> ed. New Jersey, Wiley Publ., 2012. 1752 p. doi: 10.1002/9781118131350. ISBN 978-0470528389.

## Article history

Received 16 February 2017

Revised 10 March 2017

Accepted 14 April 2017

# ФОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ\*

*Ю.Ф. ИВАНОВ<sup>1,2</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник*

*В.Е. ГРОМОВ<sup>3</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор*

*О.А. КОНДРАТОВА<sup>3</sup>, канд. физ.-мат. наук, доцент*

*Е.Г. БЕЛОВ<sup>4</sup>, канд. тех. наук*

*В.Б. КОСТЕРЕВ<sup>4</sup>, канд. тех. наук*

*(<sup>1</sup>НИ ТПУ, г. Томск, <sup>2</sup>ИСЭ СО РАН, г. Томск,*

*<sup>3</sup>СИБГИУ, г. Новокузнецк, <sup>4</sup>ООО «Евраз – ЗСМК»)*

Поступила 06 февраля 2017

Рецензирование 01 марта 2017

Принята к печати 14 апреля 2017

**Кондратова О.А.** – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,  
Сибирский государственный индустриальный университет,  
e-mail: okondratova@mail.ru

Методами современного физического материаловедения проведены исследования структуры, дефектной субструктуры, механических и трибологических свойств поверхности двутавровой балки из стали 09Г2С, формирующихся при термомеханическом упрочнении в потоке прокатного стана. Установлено качественное соответствие изменения микротвердости и скалярной плотности дислокаций по сечению профиля полки. Показано, что под действием остаточного тепла объема заготовки происходит релаксация дислокационной структуры, выражающаяся в снижении скалярной плотности дислокаций, разрушении малоугловых границ кристаллов мартенсита, выделении на дислокациях в объеме кристаллов мартенсита и по границам кристаллов частиц карбидной фазы. Отмечено, что природа  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения является ответственной за повышение прочности поверхностного слоя.

**Ключевые слова:** упрочнение, поверхность, структура, дефектная субструктура, микротвердость, трибологические свойства.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-38-44

## Введение

В настоящее время при производстве массовых видов прокатной продукции широко используются технологии термомеханического упрочнения, базирующиеся на результатах фундаментальных исследований механизмов и закономерностей формирования дефектной

субструктуры и структурно-фазовых состояний [1, 2].

Исследование процессов термомеханической обработки должно включать в себя установление связей между механическими свойствами готового продукта и эволюцией структуры, фазового сплава и дислокационной субструктуры для каждого конкретного изделия. Только в этом

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-48-420530 p\_a.

случае возможна разработка оптимальных режимов упрочнения и целенаправленное управление эксплуатационными свойствами. Варьирование технологическими параметрами (скорость и температура прокатки, количество и порядок включения секций принудительного охлаждения и т. д.) определяет изменение температуры во времени в сечении профиля в процессе ускоренного охлаждения, т. е. структурно-фазовое состояние стали. Формирующиеся структуры и субструктуры неоднородны по сечению профиля. Это кардинальным образом влияет на формирование комплекса прочностных и пластических свойств, сопротивление деформированию и разрушению материала [3, 4]. В работах [5–7] показано, что структурно-фазовые состояния, дислокационная субструктура определяют комплекс механических свойств и в конечном итоге

работоспособность и надежность сооружений и конструкций.

Необходимость и актуальность их изучения при термомеханическом упрочнении диктуются как требованиями практики, так и очевидной научной значимостью проблемы.

Цель настоящей работы – выявление закономерностей формирования механических свойств поверхности низкоуглеродистой стали при термомеханическом упрочнении и анализ физических причин этих зависимостей.

### Материал и методы исследования

В качестве материала исследования использовались образцы двутавровой балки ДП 155. Химический состав стали 09Г2С приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали

Материал	Массовая доля элементов, %										
	C	Si	Mn	S	P	Al	Cr	Ni	Cu	V	Ti
09Г2С	0,087	0,62	1,36	0,012	0,019	0,011	–	–	–	0,004	–

**Примечание:** остальное железо.

Упрочнение двутавра проводили по технологии ускоренного охлаждения в линии сортового стана 450 ОАО «ЕВРАЗ – Западно-Сибирский металлургический комбинат». Скорость прокатки – 6,0 м/с, расход воды – 1200 м<sup>3</sup>/ч, давление воды на полку – 2,5 атм, температура перед холодильником – 800...820 °С. Исследования структуры выполнялись на электронном микроскопе JEM 2100 JEOL. Для идентификации фаз применялся дифракционный анализ с использованием темнопольной методики и последующим индицированием микроэлектрограмм. Скалярная плотность дислокаций измерялась методом секущих с поправкой на невидимость дислокаций на микрофотографиях. Методы и методики количественного анализа результатов просвечивающей микроскопии приведены в работах [8–16].

Анализ прочностных свойств поверхностного слоя осуществляли определением микротвердости (микротвердомер ПМТ-4), нанотвердости

материала и модулем Юнга (динамический ультрамикротвердомер (наноиндентор) Shimadzu DUH-211S, нагрузка на индентор 50 мН). Исследования износостойкости материала (определяли коэффициент трения и скорость износа материала) проводили на трибометрах «CSEM Tribometer High Temperature S/N 07-142», CSEM Instruments, Швейцария и «Tribotecnica» (Франция). В качестве контртела использовали шарик из твердого сплава ВК8 диаметром 3 мм. Измерения были проведены по схеме «вращение образца при неподвижном контртеле»; линейная скорость вращения составляла 2,5 см/с; нормальная нагрузка на контртело составляла 5 Н; конечное число оборотов образца – 5000. Износостойкость оценивали величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания. Скорость изнашивания рассчитывали по формуле

$$V = \frac{2\pi RA}{FL} [\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}],$$

где  $R$  – радиус трека [мм];  $A$  – площадь поперечного сечения канавки износа [мм<sup>2</sup>];  $F$  – величина приложенной нагрузки [Н];  $L$  – пройденная шариком контртела дистанция [м].

### Результаты и их обсуждение

При термомеханическом упрочнении балки в поверхностном слое формируется морфологически сложная структура, состоящая из  $\alpha$ -фазы,  $\gamma$ -фазы и карбида железа [17].

Основной фазой является  $\alpha$ -фаза, представленная зернами структурно-свободного феррита (т. е. зернами феррита, не содержащими в объеме частиц цементита), сформировавшимися в результате диффузионного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения; зернами феррита, в объеме которых присутствуют частицы карбида железа преимущественно глобулярной формы (далее зерна «псевдоперлита»). В объеме зерен могут присутствовать кристаллы пластинчатого или пакетного мартенсита, а также «бескарбидного» бейнита. Пластинки «бескарбидного» бейнита расположены параллельно друг другу и образуют пакеты, по морфологическому признаку напоминающие пакетный мартенсит. Поперечные размеры пластин изменяются в пределах от 200 до 400 нм.

При реализации технологии ускоренного охлаждения двутавровой балки в формировании структуры стали задействованы следующие механизмы  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения: 1) механизм диффузионного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения, приводящий к образованию зерен структурно-свободного феррита, зерен феррита, содержащих хаотически распределенные частицы цементита и зерен перлита; 2) при реализации промежуточного механизма  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения формируется бейнитная структура; 3) сдвиговый механизм  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения приводит к формированию мартенситной структуры.

Поперечные размеры пластин изменяются в пределах от 100 нм до 1,8 мкм. При анализе субструктуры кристаллов мартенсита выявляется крапчатый контраст. Наличие данного

контраста свидетельствует о высокой плотности дислокаций, формирующих сетчатую структуру. Последующий «самоотпуск» стали под действием остаточного тепла объема заготовки сопровождается релаксацией дислокационной структуры, выражающейся в снижении скалярной плотности дислокаций, разрушении малоугловых границ кристаллов мартенсита, выделении на дислокациях в объеме кристаллов мартенсита (рис. 1, *а*) и по границам кристаллов (рис. 1, *б*) частиц карбидной фазы. Размеры частиц, расположенных на дислокациях, изменяются в пределах 5...10 нм, расположенных на границах в пределах 10...30 нм.

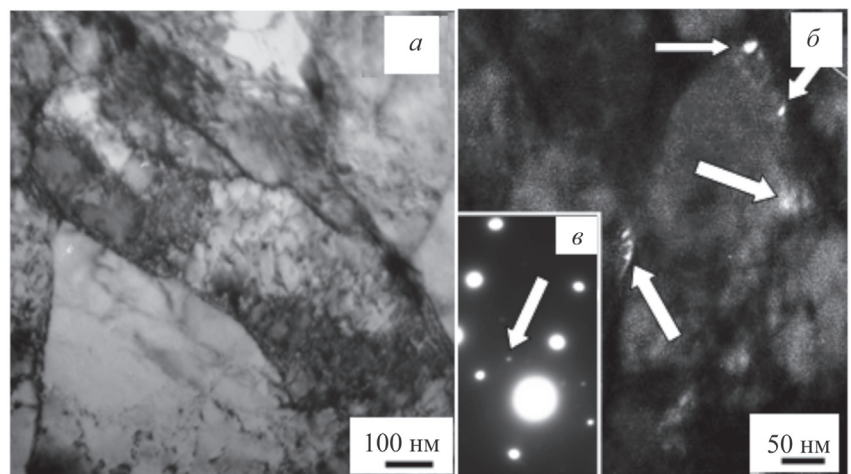


Рис 1. Микроструктура упрочненного слоя полки двутавра: *а* – светлопольное изображение; *б* – темное поле, полученное в рефлексе  $Fe_3C$ , стрелками указаны частицы цементита; *в* – микроэлектроннограмма, стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле

Формирующиеся в поверхностном слое сложные структурно-фазовые состояния должны отвечать за прочностные и трибологические свойства.

В табл. 2 приведены значения нанотвердости и модуля Юнга стали 09Г2С в нетермомеханически упрочненном и термомеханически упрочненном состоянии. Отчетливо видно, что упрочнение стали сопровождается увеличением нанотвердости поверхностного слоя в  $\approx 1,22$  раза при одновременном снижении модуля Юнга в  $\approx 1,18$  раза.

Термоупрочнение стали существенным образом изменяет трибологические характеристики стали, а именно приводит к увеличению износостойкости поверхностного слоя в  $\approx 1,83$  раза и увеличению коэффициента трения в  $\approx 1,36$  (табл. 3).



Таблица 2

Значения нанотвердости и модуля Юнга стали 09Г2С

Характеристика	Средняя
Неупрочненное состояние	
Нанотвердость, ГПа	$2,7 \pm 0,2$
Модуль Юнга, ГПа	$269,6 \pm 17,0$
Термомеханически упрочненное состояние	
Нанотвердость, ГПа	$3,3 \pm 0,2$
Модуль Юнга, ГПа	$228,2 \pm 12,0$

Таблица 3

## Трибологические характеристики стали 09Г2С

Неупрочненное состояние		Термомеханически упрочненное состояние	
$V, 10^{-5}, \text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$	$\mu$	$V, 10^{-5}, \text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$	$\mu$
5,3	0,36	2,9	0,49

**Примечание:**  $V$  – скорость изнашивания стали;  $\mu$  – коэффициент ее трения.

Профиль механических свойств, формирующийся в материале при поверхностном способе обработки, был выявлен при анализе микротвердости (рис. 2, а). Видно, что ускоренное охлаждение водой приводит к полуторакартному увеличению прочности поверхностного слоя стали по отношению к ее объему.

Одной из основных характеристик состояния субструктуры стали является скалярная плотность дислокаций, т. е. плотность дислокаций, распределенных в объеме элементов субструктуры (ячеистой, полосовой и субзеренной структуре). Градиентный характер изменения скалярной плотности дислокаций в стали представлен на рис. 2, б. В зернах феррита скалярная плотность дислокаций монотонно снижается с увеличением расстояния от поверхности охлаждения.

Наблюдаемое качественное соответствие зависимостей  $HV$  и  $\rho$  от расстояния до поверхности обработки обусловлено распределением структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры по сечению полки двутавровой балки.

В условиях термосилового воздействия, как отмечено в работах [5–7, 17], возможно формирование наноразмерного цементита при преобразовании карбидной подсистемы. Механизмами, ответственными за это, являются разрезание цементитных пластин движущимися дислока-

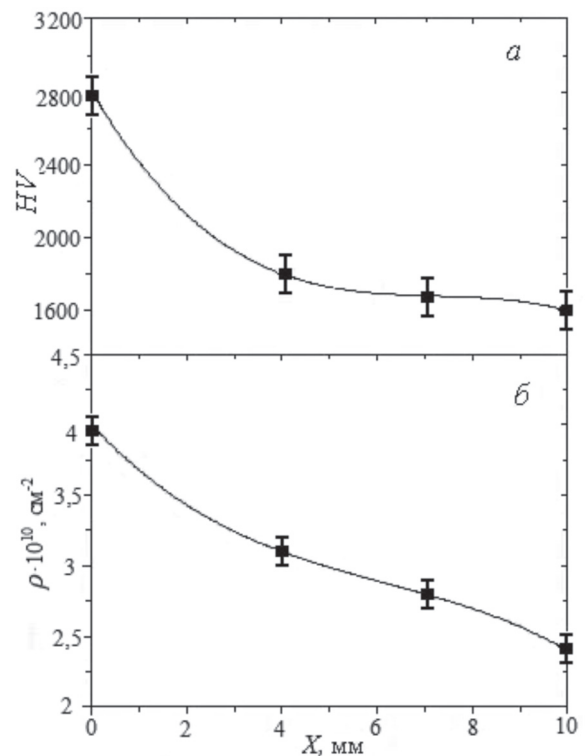


Рис. 2. Зависимости микротвердости полки двутавровой балки после термомеханического упрочнения (а) и скалярной плотности дислокации (б) от расстояния до поверхности обработки

циями; растворение пластин цементита; распад твердого раствора углерода в  $\alpha$ -железе; допревращение остаточного аустенита с образованием частиц карбида железа; реализация диффузионного механизма  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения при высокотемпературной термомеханической обработке.

Эти процессы наиболее интенсивно протекают в поверхностных слоях, подвергнутых упрочняющей обработке.

## Вывод

При термомеханическом упрочнении двутавровой балки из низкоуглеродистой стали 09Г2С формируется градиентная структура, характеризующаяся закономерным изменением фазового состава и параметров субструктуры по мере приближения к поверхности ускоренного охлаждения.

Термомеханическое упрочнение по режимам ОАО «Евраз – Западно-Сибирский металлургический комбинат» сопровождается увеличением нанотвердости поверхностного слоя балки в 1,22 раза при одновременном снижении модуля

Юнга в 1,18 раза. Износостойкость поверхности возрастает на 83 %, а коэффициент трения на 36 %. Выявленные зависимости скалярной плотности дислокаций и микротвердости балочного профиля стали 09Г2С от расстояния до поверхности охлаждения при термомеханическом упрочнении свидетельствуют о снижении этих параметров соответственно в 1,75 и 1,6 раза на глубине 10 мм.

Установлено, что явление повышения прочности поверхностного слоя стали является многофакторным, морфологически многокомпонентным и определяется природой  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения.

### Список литературы

1. Капуткина Л.М., Берштейн М., Займовский В.А. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
2. Тушинский Л.И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов. – Новосибирск: Наука, 1990. – 306 с.
3. Юрьев А.В. Упрочнение строительной арматуры и прокатных валков. – Новосибирск: Наука, 2006. – 292 с.
4. Структурно-фазовые состояния и свойства упрочненных стального проката и чугуновых валков / В.Е. Громов, О.Ю. Ефимов, В.Б. Костерев, А.Б. Юрьев, В.Я. Чинокалов. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2011. – 324 с.
5. Влияние ускоренного охлаждения на формирование структурно-фазовых состояний и механических свойств двутавра / Е.Г. Белов, В.Я. Чинокалов, Л.М. Полторацкий, О.Ю. Ефимов, В.Е. Громов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2009. – № 3. – С. 62–68.
6. Формирование геометрических размеров и механических свойств двутавровой балки для шахтных монорельсовых дорог / Е.Г. Белов, О.Ю. Ефимов, Л.М. Полторацкий, В.Я. Чинокалов, В.Е. Громов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2009. – № 12. – С. 18–21.
7. Формирование структуры и механических свойств при ускоренном охлаждении двутавровой балки / Е.Г. Белов, Л.М. Полторацкий, О.Ю. Ефимов, С.В. Коновалов, В.Е. Громов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2010. – № 2. – С. 33–37.
8. Electron microscopy of thin crystals / P. Hirsch, A. Howie, R. Nicholson, D. Pashley, M. Whelan. – London: Butterworths, 1965. – 574 p. – ISBN 10: 0408185503. – ISBN 13: 9780408185509.
9. Direct observation of fine structure within images of atoms in crystals by transmission electron microscopy / H. Hashimoto, H. Endoh, T. Tanji, A. Ono, E. Watanabe // Journal of the Physical Society of Japan. – 1977. – Vol. 42, iss. 3. – P. 179–186. – doi: 10.1143/JPSJ.42.1073.
10. Reimer L. Transmission electron microscopy: physics of image formation and microanalysis. – 4<sup>th</sup> ed. – Berlin: Springer-Verlag, 1997. – 329 p. – ISBN-10: 3540625682. – ISBN-13: 978-3540625681.
11. Shindo D., Oikawa T. Analytical electron microscopy for materials science. – London: Springer, 2002. – 156 p. – ISBN-10: 4431703365. – ISBN-13: 978-4431703365.
12. Williams D., Carter C. Transmission electron microscopy: a textbook for materials science. – 1<sup>st</sup> ed. – New York: Springer, 1996. – 729 p. – ISBN 978-1-4757-2519-3. – doi: 10.1007/978-1-4757-2519-3.
13. Kumar C.S.S.R. Transmission electron microscopy characterization of nanomaterials. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – 717 p. – ISBN 978-3-642-38933-7. – doi: 10.1007/978-3-642-38934-4.
14. Carter C., Williams D. Transmission electron microscopy. – New York: Springer, 2016. – 518 p. – ISBN 978-3-319-26649-7. – doi: 10.1007/978-3-319-26651-0.
15. Egerton R. Physical principles of electron microscopy. – New York: Springer, 2005. – 202 p.
16. Sample preparation handbook for transmission electron microscopy / J. Ayache, L. Beaunier, J. Boumendil, G. Ehret, D. Laub. – New York: Springer-Verlag, 2010. – 338 p. – ISBN 978-1-4419-5974-4. – doi: 10.1007/978-1-4419-5975-1.
17. Формирование структурно-фазовых состояний дефектной субструктуры и свойств поверхности термомеханически упрочненной низкоуглеродистой стали / В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Е.Г. Белов, В.Б. Костерев, Д.А. Косинов // Успехи физики металлов. – 2016. – Т. 17, вып. 4. – С. 303–341. – doi: 10.15407/ufm.17.04.303.

### Formation of mechanical properties of low alloy steel surface under thermomechanical treatment

**Ivanov Yu.F.**<sup>1,2</sup>, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher, e-mail: yufi55@mail.ru

**Gromov V.E.**<sup>3</sup>, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief of Physics Department,  
e-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

**Kondratova O.A.**<sup>3</sup>, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, e-mail: okondratova@mail.ru

**Belov E.G.**<sup>4</sup>, Ph.D. (Engineering), Chief of rolling production, e-mail: belov\_eg@zsmk.ru

**Kosterev V.B.**<sup>4</sup>, Ph.D. (Engineering), Assistant Managing Director, e-mail: kosterev\_VB@zsmk.ru

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

<sup>2</sup> Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 2/3 Akademicheskoy Avenue,  
Tomsk, 634055, Russian Federation

<sup>3</sup> Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

<sup>4</sup> OJSC EVRAZ – Consolidated West Siberian Metallurgical Plant, 16, Kosmicheskoye Shosse, Novokuznetsk,  
654043, Russian Federation

#### Abstract

Detection of physical mechanisms of formation and evolution of structure-phase states and dislocation substructures in steels is one of the important problems of condensed-state physics and modern material science because it forms the basis of development and formation of effective methods for increasing the service characteristics of articles. Experimental investigations of structures and phase states being formed in a cross-section of articles as a result of thermomechanical treatment are very significant for understanding the physical nature of transformations as they make it possible to change structure and mechanical characteristics purposefully.

Thermomechanical treatment of low carbon steel 09G2S (0.09 wt.% C, 2 wt.% Mn, 1 wt.% Si) is done by rolling of H-beam DP 155 and forced water cooling in the process of rolling on rolling mill 450 open joint-stock company “Evraz – Western Siberian metallurgical combine”

By methods of physical material science the investigations of structure-phase states, defect substructure mechanical and tribological properties of H-beam surface from steel 09G2S being formed as a result of thermomechanical hardening in the process of rolling on rolling mill.

The qualitative correspondence of change in microhardness and scalar dislocation density along the cross-section of H-beam has been established. The processes were analyzed and the analysis of mechanisms contributing to the formation of nano-dimensional cementite phase in the conditions of thermomechanical treatment of low-alloy steel was done. It was shown that the cementite particles were formed:

- in dispersion of cementite plates of pearlite colonies by its cutting with moving dislocations;
- in dissolution of cementite plates of pearlite colonies and its repeated precipitation on dislocations, boundaries of subgrains and grains;
- the decomposition of solid solution of carbon in  $\alpha$ -iron occurring in the conditions of “self-tempering” of martensite leads to formation of particles precipitated in the volume of martensite crystals on dislocations and at boundaries of martensite crystals.
- in diffusion  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformation in the conditions of high degree of deformation and high temperatures of treatment a dispersion of lamellar pearlite structure is observed.

It is established that the phenomenon of increase in hardness of steel surface layer is a multi-factor, morphologically multi-component one and is determined by the nature of  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformation.

#### Keywords

hardening, surface, structure, defect, substructure, microhardness, tribological properties.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-38-44

## References

1. Kaputkina L.M., Bershtein M., Zaimovskii V.A. *Termomekhanicheskaya obrabotka stali* [Thermomechanical treatment of steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 480 p.
2. Tushinskii L.I. *Teoriya i tekhnologiya uprochneniya metallicheskih splavov* [Theory and technology of hardening metal alloys]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 306 p.
3. Yur'ev A.V. *Uprochnenie stroitel'noi armatury i prokatnykh valkov* [Strengthening of building bars and forming rolls]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2006. 292 p.
4. Gromov V.E., Efimov O.Yu., Kosterev V.B., Yur'ev A.B., Chinokalov V.Ya. *Strukturno-fazovye sostoyaniya i svoystva uprochnennykh stal'nogo prokata i chugunnykh valkov* [Structure-phase states and properties of strengthened rolled steel and cast iron rolls]. Novokuznetsk, Inter-Kuzbass Publ., 2011. 324 p.
5. Belov E.G., Chinokalov V.Ya., Poltoratskii L.M., Efimov O.Yu., Gromov V.E. *Vliyanie uskorenogo okhlazhdeniya na formirovanie strukturno-fazovykh sostoyanii i mekhanicheskikh svoystv dvutavra* [Effect of accelerated cooling on formation of structure-phase states and mechanical properties of H-beam]. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya = Problems of ferrous metallurgy and materials science*, 2009, no. 3, pp. 62–68.
6. Belov E.G., Efimov O.Yu., Poltoratskii L.M., Chinokalov V.Ya., Gromov V.E. *Formirovanie geometricheskikh razmerov i mekhanicheskikh svoystv dvutavrovoy balki dlya shakhtnykh monorel'sovykh dorog* [Formation of geometry sizes and mechanical properties of H-beam mining monorails]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya = Steel in Translation*, 2009, no. 12, pp. 18–21. (In Russian).
7. Belov E.G., Poltoratskii L.M., Efimov O.Yu., Konovalov S.V., Gromov V.E. *Formirovanie struktury i mekhanicheskikh svoystv pri uskorennoy okhlazhdenii dvutavrovoy balki* [Formation of structure and mechanical properties in the accelerated cooling of an H beam]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya = Steel in Translation*, 2010, no. 2, pp. 33–37. (In Russian).
8. Hirsch P., Howie A., Nicholson R., Pashley D., Whelan M. *Electron microscopy of thin crystals*. London, Butterworths, 1965. 574 p. ISBN 10: 0408185503. ISBN 13: 9780408185509.
9. Hashimoto H., Endoh H., Tanji T., Ono A., Watanabe E. Direct observation of fine structure within images of atoms in crystals by transmission electron microscopy. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1977, vol. 42, iss. 3, pp. 1073–1074. doi: 10.1143/JPSJ.42.1073.
10. Reimer L. *Transmission electron microscopy: physics of image formation and microanalysis*. 4<sup>th</sup> ed. Berlin, Springer-Verlag, 1997. 584 p. ISBN-10: 3540625682. ISBN-13: 978-3540625681.
11. Shindo D., Oikawa T. *Analytical electron microscopy for materials science*. London, Springer, 2002. 156 p. ISBN-10: 4431703365. ISBN-13: 978-4431703365.
12. Williams D.B., Carter C.B. *Transmission electron microscopy: a textbook for materials science*. 1<sup>st</sup> ed. New York, Springer, 1996. 729 p. ISBN 978-1-4757-2519-3. doi: 10.1007/978-1-4757-2519-3.
13. Kumar C.S.S.R. *Transmission electron microscopy characterization of nanomaterials*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2014. 717 p. ISBN 978-3-642-38933-7. doi: 10.1007/978-3-642-38933-7.
14. Carter C., Williams D. *Transmission electron microscopy*. New York, Springer, 2016. 518 p. ISBN 978-3-319-26649-7. doi: 10.1007/978-3-319-26651-0.
15. Egerton R. *Physical principles of electron microscopy*. New York, Springer, 2005. 202 p.
16. Ayache J., Beaunier L., Boumendil J., Ehret G., Laub D. *Sample preparation handbook for transmission electron microscopy*. New York, Springer-Verlag, 2010. 338 p. ISBN 978-1-4419-5974-4. doi: 10.1007/978-1-4419-5975-1.
17. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Belov E.G., Kosterev V.B., Kosinov D.A. *Formirovanie strukturno-fazovykh sostoyanii defektnoy substruktury i svoystv poverkhnosti termomekhanicheski uprochnennoi nizkouglerodistoi stali* [Formation of structural-phase states, defect substructure and properties of a surface of thermomechanically hardened low-carbon steel]. *Uspekhi fiziki metallov = Progress in Physics of Metals*, 2016, vol. 17, iss. 4, pp. 303–341. doi: 10.15407/ufm.17.04.303.

## Funding

The work is supported by RFBR project № 16-48-420530 p\_a.

## Article history

Received 06 February 2017

Revised 01 March 2017

Accepted 14 April 2017



# ЭЛЕКТРОИСКРОВОЕ СПЕКАНИЕ СМЕСЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ И КОМПОЗИТОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ МАТРИЦАМИ: ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВА СПЕЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ\*

*Д.В. ДУДИНА*<sup>1,2,3</sup>, канд. хим. наук,  
старший научный сотрудник  
(<sup>1</sup>ИГиЛ СО РАН, г. Новосибирск,  
<sup>2</sup>НГТУ, г. Новосибирск,  
<sup>3</sup>ИХТТМ СО РАН, г. Новосибирск)

Поступила 19 февраля 2017  
Рецензирование 09 марта 2017  
Принята к печати 14 апреля 2017

Дудина Д.В. – 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева 15,  
Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,  
e-mail: dina1807@gmail.com

На примерах систем  $Ti_3SiC_2$ -Cu, Fe-Ag, NiO-Ni,  $Cu_2O$ -Cu и Fe-Al проводится анализ некоторых особенностей поведения смесей порошков металлов и композитов с металлическими матрицами при электроискровом спекании. Обсуждаются физико-химические аспекты формирования контактов между композиционными агломератами, полученными механической обработкой порошковых смесей в высокоэнергетической мельнице. Рассматриваются условия эффективного восстановления оксидных пленок, присутствующих на металлических частицах, в условиях электроискрового спекания. В условиях, традиционно используемых для консолидации металлических порошков методом электроискрового спекания, удаление оксидов происходит за счет их восстановления углеродом, присутствующим в камере установки электроискрового спекания. Анализируются возможности метода электроискрового спекания для получения композитов с металлическими матрицами, сочетающих различные механизмы упрочнения, а также для получения пористых материалов с высокими значениями открытой пористости.

**Ключевые слова:** электроискровое спекание, композиты с металлической матрицей, металлы, микроструктура.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-45-54

## Введение

Электроискровое спекание (в англоязычной литературе Spark Plasma Sintering (SPS)) основано на пропускании импульсов постоянного электрического тока через проводящую пресс-форму, в которой находится порошок проводящего или непроводящего материала [1–3]. Интерес к данному методу обусловлен возможностями интен-

сификации спекания и сохранения ценных структурных характеристик материала в спеченном состоянии за счет значительного сокращения времени воздействия по сравнению с традиционными методами спекания. Возможность реализации больших скоростей нагрева позволяет уменьшить общее время нахождения материала при повышенных температурах. Благодаря указанным достоинствам электроискровое спека-

\*Исследования спекания порошковых смесей Fe-Al выполнены в рамках государственного задания ИХТТМ СО РАН (проект 0301-2016-0021).

ние позволяет получать объемные материалы с мелкозернистой структурой, сохранять метастабильные фазы и получать материалы с микроструктурой, недостижимой другими методами компактирования. Для композитов с металлическими матрицами электроискровое спекание представляется перспективным с точки зрения получения материалов с матрицами, имеющими нанокристаллическую структуру [4].

Особенности поведения металлических материалов при электроискровом спекании определяются способностью порошковой заготовки проводить электрический ток, присутствием оксидных пленок на частицах и относительно низкими температурами плавления большинства металлов, делающими возможным плавление областей межчастичных контактов при прохождении электрического тока. В случае малого размера частиц и высокой теплопроводности материала контакты между частицами не перегреваются, но строение контактных зон и состав приповерхностного слоя оказывают влияние на общее сопротивление порошкового компакта [5]. В литературе присутствуют и данные об эрозионных процессах на контактах между металлическими частицами в пористых компактах, полученных электроискровым спеканием [6]. В последнее время уделяется особое внимание образованию контактов между разнородными частицами (частицами различных материалов) при электроискровом спекании [7].

На начальных стадиях электроискрового спекания контакты между частицами металлического порошка являются областями более высокого электрического сопротивления по сравнению с объемом частицы вследствие геометрических эффектов и присутствия оксидных пленок. Уменьшение концентрации оксидов металлов при пропускании электрического тока через систему наночастиц никеля, покрытых оксидной пленкой, наблюдалось в ходе модельных экспериментов, проводившихся в колонне просвечивающего электронного микроскопа [8]. Авторам работы [9] удалось достичь уменьшения концентрации оксидов в материале, спеченном из частично окисленного порошка меди, только при проведении процесса электроискрового спекания в атмосфере водорода. Вопрос об очищении межчастичных контактов частиц металлов от оксидных пленок под воздействием импульсов электрического тока остается предметом дискуссии [10].

В настоящей работе проводится анализ некоторых особенностей поведения смесей металлических порошков и композитов с металлическими матрицами при электроискровом спекании. Экспериментальные данные были получены в последние годы при участии автора. В работе обсуждаются физико-химические аспекты формирования контактов между композиционными агломератами, полученными механической обработкой порошковых смесей в высокоэнергетической мельнице. Рассматриваются возможности восстановления оксидных пленок, присутствующих на металлических частицах, на примерах электроискрового спекания частично окисленных порошков меди и никеля. Анализируются свойства плотных и пористых металлических материалов, формирующиеся благодаря особенностям метода электроискрового спекания.

### Методика проведения исследований

Композиционные порошки  $Ti_3SiC_2-Cu$  с содержанием силикокарбида титана 3–18 об.% были получены при помощи механической обработки смесей в планетарной шаровой мельнице АГО-2 при ускорении мелющих шаров  $200 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$  и  $400 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$  [11]. Композиционные агломераты Fe-50 об.% Ag также были получены обработкой порошковых смесей в мельнице АГО-2 [12]. Для исследования спекания порошков частично окисленных металлов были получены порошки частично окисленных меди и никеля [13]. Для этого порошок меди электролитический (ПМС-1, 99,7 %) выдерживали на воздухе при  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. Порошок никеля карбонильного (99,9 %) выдерживали на воздухе при  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. Для приготовления смесей Fe-50 об.% Al использовали порошки карбонильного железа (99,9 %, Р-10) и алюминия (99,9 %, ПАД-6) [14].

Электроискровое спекание проводили на установке Spark Plasma Sintering SPS Labox 1575 (SINTER LAND Inc., Япония) с использованием графитовой пресс-формы и графитовых пуансонов или пуансонов из вольфрама. Схема установки электроискрового спекания представлена на рис. 1. Скорость нагрева в экспериментах с  $Ti_3SiC_2-Cu$  составляла  $50 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ . Температура спекания композитов  $Ti_3SiC_2-Cu$  составляла  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ . В начале цикла  $Ti_3SiC_2-Cu$  спекания

к образцу было приложено давление 5 МПа. Когда температура образца  $Ti_3SiC_2$ -Cu достигала 300 °С, давление повышалось до 40 МПа. Спекание агломератов состава Fe-50об.% Ag проводили при температуре 600 °С и давлении 40 МПа.

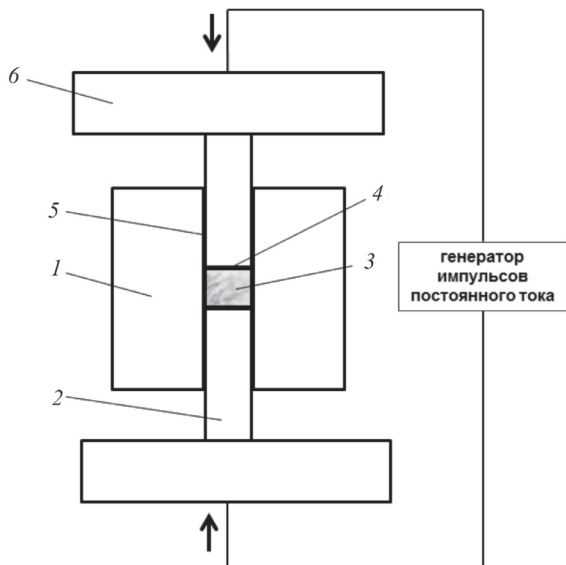


Рис. 1. Схема установки электроискрового спекания:

1 – графитовая пресс-форма; 2 – графитовые пуансоны; 3 – образец; 4, 5 – защитная фольга; 6 – графитовые диски

Спекание частично окисленного порошка никеля проводили при давлении 10 МПа, частично окисленного порошка меди – при 40 МПа. Спекание частично окисленного порошка меди проводили при 700 и 900 °С, частично окисленного порошка никеля – при 800 °С. Скорость нагрева в экспериментах с частично окисленными порошками составляла 70 °С·мин<sup>-1</sup>.

Смеси порошков Fe-50 об.% Al спекали без приложения давления при температурах 700...900 °С. Скорость нагрева в экспериментах с Fe-50 об.% Al составляла 70 °С·мин<sup>-1</sup>. Для защиты пресс-формы и пуансонов от воздействия спекаемого материала использовали графитовую фольгу толщиной 200 мкм. Для частично окисленного порошка никеля проводили сравнительные эксперименты по спеканию в контакте с медной фольгой.

Для проведения рентгеновских исследований порошков и спеченных компактов использовали дифрактометр D8 ADVANCE (Bruker AXS, Германия) с излучением Cu K $\alpha$ . Был проведен полнопрофильный анализ рентге-

нограмм компактов, полученных из порошков  $Ti_3SiC_2$ -Cu, по методу Ритвельда с использованием программы TOPAS 4.2 (Bruker AXS, Германия). Для проведения микроструктурных исследований использовали растровые электронные микроскопы Hitachi TM-1000 Tabletop Microscope (Япония) и Carl Zeiss EVO50 (Германия). Твердость спеченных материалов по Виккерсу определяли при помощи прибора 402-MVD (Wolpert Wilson Instruments, Германия) при нагрузке 100 г. Представляемые значения твердости являются средним значением из 10 измерений. Открытую пористость алюминиды железа FeAl измеряли методом заполнения пор жидкостью. В качестве жидкости использовали этанол.

## Результаты и обсуждение

### 1. Особенности электроискрового спекания композиционных агломератов, полученных механической обработкой порошковых смесей в высокоэнергетической мельнице

#### 1.1. $Ti_3SiC_2$ -Cu

В работе [11] нами были исследованы микроструктурные изменения в компактах, сформированных из композиционных частиц  $Ti_3SiC_2$ -Cu различной морфологии. В случае обработки смесей в мельнице при ускорении шаров 200 м·с<sup>-2</sup> порошковые агломераты (3–5) об.%  $Ti_3SiC_2$ -Cu имеют пластинчатое строение. На рис. 2 показана микроструктура спеченного материала, полученного из порошков 5 об.%  $Ti_3SiC_2$ -Cu, обработанных в мельнице при ускорении шаров 200 м·с<sup>-2</sup>.

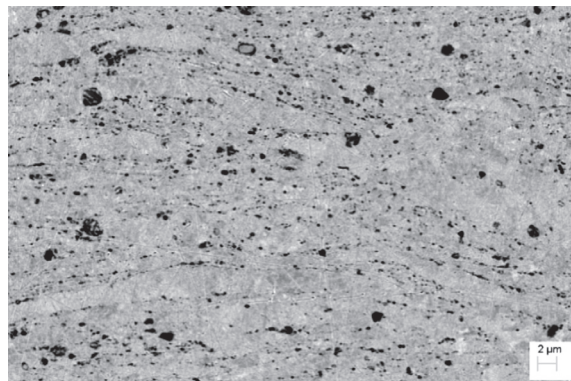
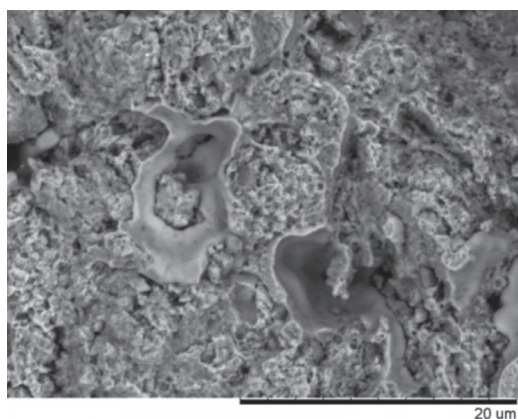


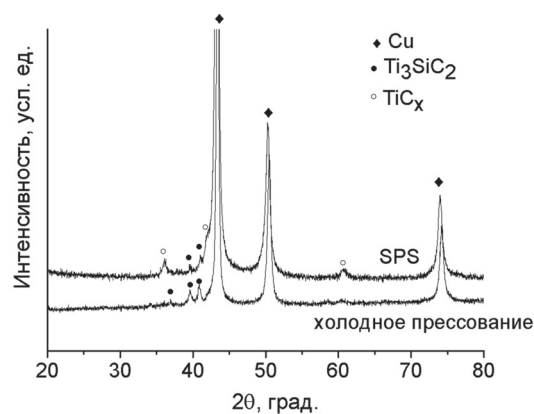
Рис. 2. Структура спеченного компакта, полученного из смеси порошков 5 об.%  $Ti_3SiC_2$ -Cu, обработанной в мельнице при ускорении шаров 200 м·с<sup>-2</sup>, температура спекания 850 °С

При увеличении интенсивности механического воздействия – увеличении ускорения шаров до  $400 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$  – на смеси того же состава морфология и размеры агломератов изменяются. Агломераты становятся более крупными, для них нехарактерно пластинчатое строение, многие частицы имеют близкие размеры в трех измерениях. При увеличении содержания силикокарбида титана в медной матрице до 18 об.% происходит уменьшение размера получаемых агломератов, при этом их структура становится более рыхлой. Частицы состава 18 об.%  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ -Cu имеют неправильную форму и шероховатую поверхность. Эксперименты по электроискровому спеканию порошков 18 об.%  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ -Cu показали, что в материале имеет место локальное плавление медной матрицы на контактах между агломератами (рис. 3, а), не

наблюдавшееся в случае спекания агломератов состава (3–5) об.%  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ -Cu в тех же условиях. Плавление на контактах между агломератами в случае состава 18 об.%  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ -Cu можно объяснить более высоким контактным сопротивлением между композиционными агломератами неправильной формы по сравнению с контактным сопротивлением между частицами составов (3–5) об.%  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ -Cu, имеющих пластинчатое строение. Из рентгенограмм, представленных на рис. 3, б, следует, что в компакте до спекания присутствуют фазы  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  и Cu (рентгенограмма компакта, полученного холодным прессованием), а в процессе спекания образуется дефицитный по углероду карбид титана  $\text{TiC}_x$  – продукт химического взаимодействия меди и силикокарбида титана. Его образование описывается реакцией  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2 + \text{Cu} \rightarrow \text{TiC}_x + \text{Cu}(\text{Si})$ .



а



б

Рис. 3. Скол компакта, полученного электроискровым спеканием композиционных порошков 18 об.%  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ -Cu при  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  (а), рентгенограммы компактов, полученных прессованием при комнатной температуре (холодное прессование) и электроискровым спеканием при  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  (б)

В табл. 1 представлены относительная плотность и твердость композитов, полученных из порошков  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ -Cu, а также размер кристаллитов, параметр решетки и уровень микроискажений решетки меди. Параметр решетки меди в исходном порошке электролитической меди составляет  $3,615 \text{ \AA}$ . Увеличение параметра решетки меди свидетельствует о растворении в ней кремния в процессе спекания. В композитах 5 об.%  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ -Cu размеры кристаллитов оказываются меньше, чем в композитах 3 об.%  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ -Cu, что связано с замедлением роста кристаллитов меди

при спекании в присутствии дисперсных частиц. Композиты  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ -Cu, полученные в более интенсивных режимах механической обработки, проявляют более высокие значения твердости, более высокий уровень микроискажений решетки меди и меньший размер кристаллитов. Важно отметить, что сохранение малого размера кристаллитов металлов при компактировании является существенным преимуществом метода электроискрового спекания.

При сохранении размера зерна металлической матрицы на уровне нескольких десятков



Таблица 1

Относительная плотность композитов  $D$ , полученных электроискровым спеканием порошков  $Ti_3SiC_2-Cu$  при  $850\text{ }^\circ\text{C}$ , параметр решетки меди, размер кристаллитов меди, микроискажения решетки меди  $\epsilon$  и твердость по Виккерсу

Состав	Ускорение шаров, $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$	$D$ , %	Параметр решетки меди, $\text{Å}$	Размер кристаллитов меди, нм	$\epsilon$ , %	Твердость по Виккерсу, МПа
3 об.% $Ti_3SiC_2-Cu$	200	95	3,621	92	0,16	1350
5 об.% $Ti_3SiC_2-Cu$	200	92	3,625	76	0,22	1500
3 об.% $Ti_3SiC_2-Cu$	400	92	3,618	55	0,33	2000
5 об.% $Ti_3SiC_2-Cu$	400	89	3,622	50	0,31	1900
18 об.% $Ti_3SiC_2-Cu$	400	82	3,630	20	0,10	2900

нанометров упрочнение композиционного материала будет достигаться за счет присутствия дисперсных частиц и мелкокристаллического состояния матрицы. В табл. 2 представлены оценки вкладов различных механизмов упрочнения в композитах (3–5) об.%  $Ti_3SiC_2-Cu$ . Предел текучести материала рассчитан из величин твердости с учетом соотношения [15]

$$H = 3\sigma,$$

где  $H$  – твердость материала;  $\sigma$  – предел текучести. Предел текучести меди составляет 80 МПа. Величина упрочнения дисперсными частицами по механизму Орована [16] оценивалась как

$$\Delta\sigma = \varphi Gb/(L - d),$$

где  $\varphi$  – коэффициент, равный 2;  $G$  – модуль сдвига матрицы (модуль сдвига меди составляет 47,7 ГПа);  $b$  – вектор Бюргера матрицы (для меди вектор Бюргера составляет 2.555  $\text{Å}$ );  $L$  – расстояние

между частицами;  $d$  – диаметр частиц. Расстояние между частицами рассчитывалось как

$$L = d(\pi/6f)^{1/3},$$

где  $f$  – объемная доля частиц. Расчеты проведены для дисперсных частиц размером 200 нм (см. рис. 2). Из данных табл. 2 можно заключить, что в полученных композитах наиболее существенным является суммарный вклад дислокационного и зернограничного упрочнения.

## 1.2. Fe-Ag

Исследованы микроструктурные изменения при электроискровом спекании композиционных порошков Ag-50 об.% Fe, полученных механической обработкой смесей порошков железа и серебра в планетарной шаровой мельнице АГО-2 [12]. В условиях электроискрового спекания плавление серебра имело локальный характер, как и в случае спекания агломератов состава 18 об.%  $Ti_3SiC_2-Cu$ . Как видно из рис. 4, обла-

Таблица 2

Механизмы упрочнения в композитах, полученных электроискровым спеканием композиционных порошков (3–5 об.%) $Ti_3SiC_2-Cu$

Состав	Ускорение шаров, $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$	Твердость по Виккерсу, МПа	Предел текучести (оценка), МПа	Суммарное упрочнение, МПа	Упрочнение дисперсными частицами, МПа	Дислокационное и зернограничное упрочнение, МПа
3 об.% $Ti_3SiC_2-Cu$	200	1350	450	370	70	300
5 об.% $Ti_3SiC_2-Cu$	200	1500	500	420	110	310
3 об.% $Ti_3SiC_2-Cu$	400	2000	670	590	70	520
5 об.% $Ti_3SiC_2-Cu$	400	1900	630	550	110	440

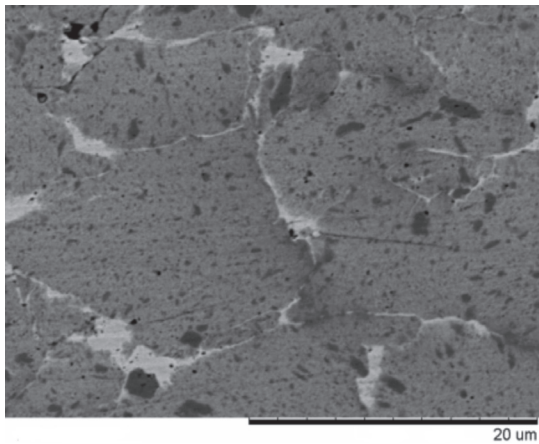


Рис. 4. Микроструктура компакта, полученного электроискровым спеканием порошковых агломератов Fe-50об.% Ag, температура спекания 600 °С, давление 40 МПа

сти, обогащенные серебром (светлые области), распределены в компактном материале по границам композиционных агломератов. Поскольку перераспределение фаз происходило только в ограниченном объеме материала, растворение железа из спекленного композита в соляной кислоте позволило получить нанопористое серебро, представляющее интерес как материал мембран.

## 2. Электроискровое спекание частично окисленных металлических порошков

### 2.1. Спекание частично окисленного порошка меди (система $Cu_2O-Cu$ )

Содержание  $Cu_2O$  в частично окисленном медном порошке составляло 50 об.%. Было установлено, что уменьшение содержания оксида (до 40 об.%) происходит только в слое материала,

прилегающего непосредственно к графитовой фольге во время спекания, как следует из рентгенограмм, представленных на рис. 5, а и б. После удаления графитовой фольги шлифованием торца компакта на соответствующей рентгенограмме соотношение интенсивностей рефлексов  $Cu_2O$  и  $Cu$  соответствует частично окисленному порошку до спекания.

На рис. 6 показан скол компакта, полученного из частично окисленного порошка меди спеканием при 900 °С. В верхней части рисунка показан торец компакта и графитовая фольга, находившаяся в контакте с компактом во время спекания. Торцевой слой компакта отличается от объема компакта и состоит из металлической меди вследствие восстановления  $Cu_2O$  углеродом. Таким образом, в случае электроискрового спекания частично окисленного порошка меди восстановление оксида  $Cu_2O$  имеет место только в приповерхностном слое компакта, непосредственно контактировавшего с графитовой фольгой. Концентрация оксида меди в центральной части компакта не изменяется.

### 2.2. Спекание частично окисленного порошка никеля (система NiO-Ni)

Были исследованы фазовые и микроструктурные превращения при электроискровом спекании частично окисленного порошка никеля в контакте с графитовой и медной фольгами [13]. В случае контакта с графитом восстановление оксида NiO происходит в слое, толщина которого соизмерима с толщиной компакта. Установлено, что восстановление оксида никеля NiO при

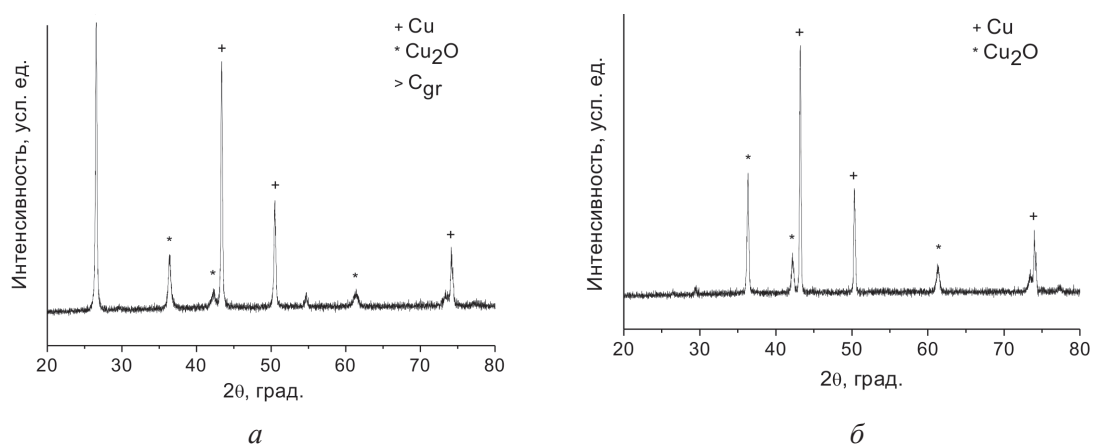


Рис. 5. Рентгенограммы компакта, спекленного методом электроискрового спекания из частично окисленного порошка меди при 700 °С, 40 МПа: графитовая фольга, прилегавшая к торцу компакта во время спекания, сохранена (а), графитовая фольга удалена шлифованием (б)

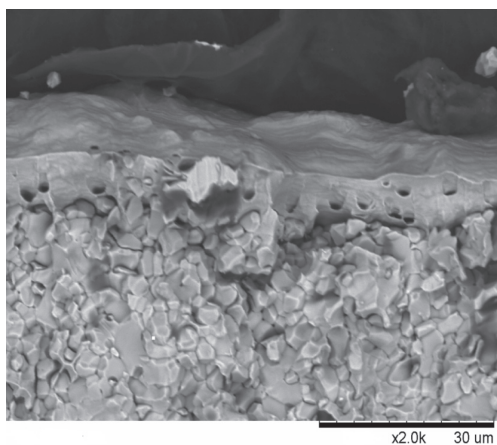


Рис. 6. Скол компакта, полученного из частично окисленного порошка меди электроискровым спеканием при 900 °С, 40 МПа

электроискровом спекании происходит в случае контакта спекаемого материала с графитовой фольгой и не происходит в случае наличия барьерного слоя из медной фольги между компактом и графитовым пуансоном.

Различия в поведении частично окисленной меди и частично окисленного никеля при спекании в условиях контакта с графитовой фольгой объясняются существенной растворимостью углерода в никеле и отсутствием растворимости углерода в меди. Таким образом, уменьшение концентрации оксидов при электроискровом спекании частично окисленных порошков металлов в режимах, обычно используемых для компактирования металлических порошков, не связано с действием электрического тока, а определяется восстановлением оксидов металлов углеродом графитовой оснастки и/или графитовой фольги.

### 3. Реакционное электроискровое спекание без приложения давления для получения материалов с высокой пористостью (на примере получения пористого алюминид железа FeAl)

Основными преимуществами электроискрового спекания для синтеза пористых материалов являются возможности высоких скоростей нагрева (за счет протекания электрического тока непосредственно через образец) и относительно высоких скоростей охлаждения образцов (за счет используемого в установках электроискрового спекания систем водяного охлаждения), позволяющих осуществлять синтез и минимизировать усадку компакта.

В системе Fe-50 об.% Al в условиях электроискрового спекания и горячего прессования

имеет место одна и та же последовательность фазовых превращений с ростом температуры спекания:  $Fe+Al \rightarrow Fe+Fe_2Al_5 \rightarrow Fe+FeAl \rightarrow FeAl$  [14]. Реакционное электроискровое спекание смесей порошков железа и алюминия при 700, 800 и 900 °С позволяет получить пористые материалы FeAl с общей пористостью 47, 47, 53 % и открытой пористостью 41, 41, 46 % соответственно. Для сравнения были проведены эксперименты на установке горячего прессования. Монофазный алюминид железа FeAl, полученный в условиях горячего пресса при 800 °С, имел открытую пористость, равную 33 %. В работе [17] были получены алюминид железа FeAl с открытой пористостью 45...49 % с использованием порообразующих агентов, разлагающихся в процессе спекания с образованием газообразных продуктов. Преимущества синтеза, проведенного в данной работе, заключается в том, что высокие значения открытой пористости были получены без использования порообразующих агентов. Таким образом, реакционное электроискровое спекание смесей порошков железа и алюминия позволяет получить пористый алюминид железа FeAl с высокими значениями открытой пористости.

## Выводы

1. При электроискровом спекании композиционных порошков, полученных механической обработкой компонентов в планетарной шаровой мельнице и представляющих собой агломераты неправильной формы, плавление материала и локальные химические реакции происходят по границам агломератов.

2. В композитах  $Ti_3SiC_2$ -Cu, содержащих (3–5) об.%  $Ti_3SiC_2$  и полученных из порошков, обработанных в мельнице в высокоэнергетическом режиме, наиболее существенным является суммарный вклад дислокационного и зернограничного упрочнения. Упрочнение по данным механизмам в спеченных композитах оказывается возможным благодаря тому, что при электроискровом спекании сохраняются высокие концентрации дефектов в медной матрице и ее нанокристаллическая структура.

3. Установлено, что уменьшение концентрации оксидов при электроискровом спекании в режимах, обычно используемых при компакти-



ровании металлических порошков, не связано с действием электрического тока, а определяется диффузией углерода материала оснастки или графитовой фольги в объем компакта при спекании и восстановлением оксидов металлов углеродом.

4. На примере синтеза пористого алюминида железа FeAl показано, что реакционное электроискровое спекание смесей порошков металлов без приложения давления позволяет получить пористые материалы с высокими значениями открытой пористости.

### Благодарность

Автор выражает благодарность канд. физ.-мат. наук В.И. Мали, канд. физ.-мат. наук А.Г. Анисимову, д-р хим наук Б.Б. Бохонову и д-р техн наук В.А. Батаеву за обсуждение полученных результатов, а также А.В. Ухиной за помощь в исследованиях спекания частично окисленных порошков металлов.

### Список литературы

1. *Groza J.R., Zavalianos A.* Nanostructured bulk solids by field activated sintering // *Reviews on Advanced Materials Science.* – 2003. – Vol. 5. – P. 24–33.
2. *Munir Z.A., Anselmi-Tamburini U., Ohyanagi M.* The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: a review of the spark plasma sintering method // *Journal of Materials Science.* – 2006. – Vol. 41, iss. 3. – P. 763–777. – doi: 10.1007/s10853-006-6555-2.
3. Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering / R. Orrù, R. Licheri, A.M. Locci, A. Cincotti, G. Cao // *Materials Science & Engineering: R: Reports.* – 2009. – Vol. 63, iss. 4–6. – P. 127–287. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mser.2008.09.003>.
4. Spark plasma sintering of metals and metal matrix nanocomposites: a review / N. Saheb, Z. Iqbal, A. Khalil, A.S. Hakeem, N.A. Aqeeli, T. Laoui, A. Al-Qutub, R. Kirchner // *Journal of Nanomaterials.* – 2012. – Vol. 2012. – Art. 983470. – 13 p. – doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2012/983470>.
5. The influence of premolding load on the electrical behavior in the initial stage of electric current activated sintering of carbonyl iron powders / Y. Ye, X. Li, K. Hu, Y. Lai, Y. Li // *Journal of Applied Physics.* – 2013. – Vol. 113, iss. 21. – P. 214902. – doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4808339>.
6. *Aman Y., Garnier V., Djurado E.* Pressure-less spark plasma sintering effect on non-conventional necking process during the initial stage of sintering of copper and alumina // *Journal of Materials Science.* – 2012. – Vol. 47, iss. 15. – P. 5766–5773. – doi: 10.1007/s10853-012-6469-0.
7. *Никулина А.А.* Формирование неоднородной структуры железоуглеродистых сплавов спеканием частиц разнородных сталей // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* – 2016. – № 3 (72). – С. 52–61. – doi: 10.17212/1994-6309-2016-3-52-61.
8. *Bonifacio C.S., Holland T.B., Benthem K. van.* Evidence of surface cleaning during electric field assisted sintering // *Scripta Materialia.* – 2013. – Vol. 69, iss. 11–12. – P. 769–772. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.08.018>.
9. Oxide reduction effects in SPS processing of Cu atomized powder containing oxide inclusions / R. Collet, S. le Gallet, F. Charlot, S. Lay, J.M. Chaix, F. Bernard // *Materials Chemistry and Physics.* – 2016. – Vol. 173. – P. 498–507. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.02.044>.
10. The critical role of heating rate in enabling the removal of surface oxide films during spark plasma sintering of Al-based bulk metallic glass powder / X.P. Li, M. Yan, H. Imai, K. Kondoh, G.B. Schaffer, M. Qian // *Journal of Non-Crystalline Solids.* – 2013. – Vol. 375. P. 95–98. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.05.001>.
11.  $Ti_3SiC_2$ -Cu composites by mechanical milling and Spark Plasma Sintering: possible microstructure formation scenarios / D.V. Dudina, V.I. Mali, A.G. Anisimov, N.V. Bulina, M.A. Korchagin, O.I. Lomovsky, I.A. Bataev, V.A. Bataev // *Metals & Materials International.* – 2013. – Vol. 19, iss. 6. – P. 1235–1241. – doi: 10.1007/s12540-013-6015-x.
12. *Bokhonov B.B., Dudina D.V.* Recrystallisation-accompanied phase separation in Ag-Fe and Ag-Ni nanocomposites: a route to structure tailoring of nanoporous silver // *RSC Advances.* – 2013. – Vol. 3, iss. 31. – P. 12655–12661. – doi: 10.1039/C3RA41377B.
13. *Dudina D.V., Bokhonov B.B.* Elimination of oxide films during Spark Plasma Sintering of metallic powders: a case study using partially oxidized nickel // *Advanced Powder Technology.* – 2017. – Vol. 28, iss. 2. – P. 641–647. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2016.12.001>.
14. *Dudina D.V., Bokhonov B.B., Mukherjee A K.* Formation of aluminum particles with shell morphology during pressureless Spark Plasma Sintering of Fe-Al mixtures: current-related or Kirkendall effect? // *Materials.* – 2016. – Vol. 9, iss. 5. – P. 375. – doi: 10.3390/ma9050375.
15. *Zhang P., Li S.X., Zhang Z.F.* General relationship between strength and hardness // *Materials Science & Engineering: A.* – 2011. – Vol. 529. – P. 62–73. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.061>.



16. Miller W.S., Humphreys F.J. Strengthening mechanisms in particulate metal matrix composites // *Scripta Metallurgica & Materialia*. – 1991. – Vol. 25, iss. 1. – P. 33–38. – doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0956-716X\(91\)90349-6](http://dx.doi.org/10.1016/0956-716X(91)90349-6).

17. Karczewski K., Stępniewski W.J., Józwiak S. Highly-porous FeAl intermetallic foams formed via sintering with Eosin Y as a gas releasing agent // *Materials Letters*. – 2016. – Vol. 178. – P. 268–271. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2016.05.047>.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (75), April – June 2017, Pages 45–54

### Spark Plasma Sintering of the mixtures of metallic powders and metal matrix composites: Peculiarities of the structure formation and properties of the sintered materials

Dudina D. V.<sup>1,2,3</sup>, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, e-mail: [dina1807@gmail.com](mailto:dina1807@gmail.com)

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

<sup>3</sup>Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 18 Kutateladze st., Novosibirsk, 630128, Russian Federation

#### Abstract

The peculiarities of the behavior of the powder mixtures of metals and metal matrix composites during Spark Plasma Sintering (SPS) using  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2\text{-Cu}$ , Fe-Ag, NiO-Ni,  $\text{Cu}_2\text{O-Cu}$ , and Fe-Al systems as examples are analyzed in the work. The physical and chemical aspects of the formation of contacts between composite agglomerates obtained by mechanical treatment of the powder mixtures in a high-energy ball mill and the possibilities of the SPS method for the production of metal matrix composites combining different strengthening mechanisms are discussed. In the  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2\text{-Cu}$  composites obtained by mechanical milling and SPS, the copper matrix remains in the nanocrystalline state, and the total contribution of dislocation and grain boundary strengthening is greater than the contribution of dispersion strengthening. Microstructural studies of the sintered  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2\text{-Cu}$  and Fe-Ag compacts show that during SPS of mechanically milled powders, areas of inter-agglomerate contacts can experience melting. In the systems capable of interfacial interactions, the latter preferentially occur at the inter-agglomerate contacts. The conditions for the efficient reduction of oxide films present on the surface of metallic particles during the SPS using a partially oxidized copper powder containing  $\text{Cu}_2\text{O}$  and a partially oxidized nickel powder containing NiO are examined. It is found that under the SPS conditions commonly used in the consolidation practice of metallic powders, elimination of oxide films present on the surface of metallic powders is due to chemical reduction of the oxides by carbon. It is experimentally shown, that reactive pressureless SPS can produce porous materials of high open porosity.

#### Keywords

spark plasma sintering, metal matrix composites, metals, microstructure.

DOI: [10.17212/1994-6309-2017-2-45-54](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2017-2-45-54)

#### References

1. Groza J.R., Zavaliangos A. Nanostructured bulk solids by field activated sintering. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2003, vol. 5, pp. 24–33.

2. Munir Z.A., Anselmi-Tamburini U., Ohyanagi M. The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: a review of the spark plasma sintering method. *Journal of Materials Science*, 2006, vol. 41, iss. 3, pp. 763–777. doi: [10.1007/s10853-006-6555-2](https://doi.org/10.1007/s10853-006-6555-2).

3. Orrù R., Licheri R., Locci A.M., Cincotti A., Cao G.C. Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2009, vol. 63, iss. 4–6, pp. 127–287. doi: [10.1016/j.mser.2008.09.003](https://doi.org/10.1016/j.mser.2008.09.003).

4. Saheb N., Iqbal Z., Khalil A., Hakeem A.S., Aqeeli N.A., Laoui T., Al-Qutub A., Kirchner R. Spark plasma sintering of metals and metal matrix nanocomposites: a review. *Journal of Nanomaterials*, 2012, vol. 2012, art. 983470. 13 p. doi: 10.1155/2012/983470.
5. Ye Y., Li X., Hu K., Lai Y., Li Y. The influence of premolding load on the electrical behavior in the initial stage of electric current activated sintering of carbonyl iron powders. *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, iss. 21, p. 214902. doi: 10.1063/1.4808339.
6. Aman Y., Garnier V., Djurado E. Pressure-less spark plasma sintering effect on non-conventional necking process during the initial stage of sintering of copper and alumina. *Journal of Materials Science*, 2012, vol. 47, iss. 15, pp. 5766–5773. doi: 10.1007/s10853-012-6469-0.
7. Nikulina A.A. Formirovanie neodnorodnoi struktury zhelezouglerodistykh splavov spekaniem chastits raznorodnykh staley [Formation of heterogeneous iron-carbon alloys structure by sintering of dissimilar particles]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2016, no. 3 (72), pp. 52–61. doi: 10.17212/1994-6309-2016-3-52-61.
8. Bonifacio C.S., Holland T.B., Benthem K. van. Evidence of surface cleaning during electric field assisted sintering. *Scripta Materialia*, 2013, vol. 69, iss. 11–12, pp. 769–772. doi: 10.1016/j.scriptamat.2013.08.018.
9. Collet R., Le Gallet S., Charlot F., Lay S., Chaix J.M., Bernard F. Oxide reduction effects in SPS processing of Cu atomized powder containing oxide inclusions. *Materials Chemistry and Physics*, 2016, vol. 173, pp. 498–507. doi: 10.1016/j.matchemphys.2016.02.044.
10. Li X.P., Yan M., Imai H., Kondoh K., Schaffer G.B., Qian M. The critical role of heating rate in enabling the removal of surface oxide films during spark plasma sintering of Al-based bulk metallic glass powder. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2013, vol. 375, pp. 95–98. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2013.05.001.
11. Dudina D.V., Mali V.I., Anisimov A.G., Bulina N.V., Korchagin M.A., Lomovsky O.I., Bataev I.A., Bataev V.A. Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>-Cu composites by mechanical milling and Spark Plasma Sintering: possible microstructure formation scenarios. *Metals & Materials International*, 2013, vol. 19, iss. 6, pp. 1235–1241. doi: 10.1007/s12540-013-6015-x.
12. Bokhonov B.B., Dudina D.V. Recrystallisation-accompanied phase separation in Ag–Fe and Ag–Ni nanocomposites: a route to structure tailoring of nanoporous silver. *RSC Advances*, 2013, vol. 3, iss. 31, pp. 12655–12661. doi: 10.1039/C3RA41377B.
13. Dudina D.V., Bokhonov B.B. Elimination of oxide films during Spark Plasma Sintering of metallic powders: a case study using partially oxidized nickel. *Advanced Powder Technology*, 2017, vol. 28, iss. 2, pp. 641–647. doi: 10.1016/j.apt.2016.12.001.
14. Dudina D.V., Bokhonov B.B., Mukherjee A.K. Formation of aluminum particles with shell morphology during pressureless Spark Plasma Sintering of Fe-Al mixtures: current-related or Kirkendall effect? *Materials*, 2016, vol. 9, iss. 5, p. 375. doi: 10.3390/ma9050375.
15. Zhang P., Li S.X., Zhang Z.F. General relationship between strength and hardness. *Materials Science & Engineering: A*, 2011, vol. 529, pp. 62–73. doi: 10.1016/j.msea.2011.08.061.
16. Miller W.S., Humphreys F.J. Strengthening mechanisms in particulate metal matrix composites. *Scripta Metallurgica & Materialia*, 1991, vol. 25, iss. 1, pp. 33–38. doi: 10.1016/0956-716X(91)90349-6.
17. Karczewski K., Stepniowski W.J., Józwiak S. Highly-porous FeAl intermetallic foams formed via sintering with Eosin Y as a gas releasing agent. *Materials Letters*, 2016, vol. 178, pp. 268–271. doi: 10.1016/j.matlet.2016.05.047.

### Acknowledgements

The author is grateful to Dr. V.I. Mali, Dr. A.G. Anisimov, Prof. B.B. Bokhonov and Prof. V.A. Bataev for discussions and Ms. A.V. Ukhina for her help in conducting studies of sintering of partially oxidized metal powders.

### Funding

Studies of sintering of Fe-Al powder mixtures were conducted within the state assignment to ISSCM SB RAS (project 0301-2016-0021).

### Article history

Received 19 February 2017

Revised 09 March 2017

Accepted 14 April 2017

УДК 621.785.53:621.787.4

# ВЛИЯНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО И ГАЗОЦИКЛИЧЕСКОГО ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ\*

*А.В. МАКАРОВ<sup>1,2</sup>, доктор техн. наук, ст. науч. сотрудник,  
зав. отделом и лабораторией*

*Н.В. ГАВРИЛОВ<sup>3</sup>, член-корр. РАН, доктор техн. наук,  
зав. лабораторией*

*Г.В. САМОЙЛОВА<sup>1</sup>, аспирант*

*А.С. МАМАЕВ<sup>3</sup>, канд. техн. наук, науч. сотрудник*

*А.Л. ОСИНЦЕВА<sup>2</sup>, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник*

*Р.А. САВРАЙ<sup>2</sup>, канд. техн. наук, зав. лабораторией*

*(<sup>1</sup>ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург,*

*<sup>2</sup>ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург,*

*<sup>3</sup>ИЭФ УрО РАН, г. Екатеринбург)*

Поступила 10 марта 2017

Рецензирование 10 апреля 2017

Принята к печати 10 мая 2017

**Макаров А.В.** – 620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18,  
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,  
e-mail: av-mak@yandex.ru

Изучено влияние комбинированной обработки, включающей наноструктурирующую фрикционную обработку скользящим индентором и последующее непрерывное и газоциклическое азотирование в плазме низкоэнергетического электронного пучка при температурах 450 и 500 °С, на состояние поверхностного слоя аустенитной стали AISI 321 (04X17H8T). Особенностью непрерывного азотирования при высокой плотности потока ионов азота на поверхность и температуре 500 °С диффузионно-активной наноструктурированной поверхности со структурой  $\alpha'$  мартенсита деформации является интенсивное образование пор и блистеров. Улучшение качества (уменьшение блистеринга, порообразования и шероховатости) азотированной поверхности стали, предварительно упрочненной фрикционной обработкой, достигается проведением азотирования в газоциклическом режиме и снижением температуры азотирования от 500 до 450 °С. Однако газоциклическое азотирование обеспечивает меньший уровень упрочнения наноструктурированной поверхности стали по сравнению с непрерывным азотированием.

**Ключевые слова:** аустенитная нержавеющая сталь, фрикционная обработка, электронный пучок, плазма, газоциклическое азотирование, мартенсит деформации, микротвердость, шероховатость, поры.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-55-66

\* Работа выполнена по теме «Структура» № 01201463331 (проект № 15-9-12-45) при поддержке РФФИ (проект № 15-08-07947). Электронная сканирующая микроскопия, профилометрия и микродюрметрия выполнены в ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

## Введение

Азотирование позволяет эффективно повышать твердость, износостойкость, усталостную прочность и коррозионную стойкость термически неупрочняемых аустенитных хромоникелевых сталей [1], которые находят широкое применение в нефтегазовой, химической и других отраслях промышленности.

Скорость роста упрочненных слоев определяется не только плотностью потока активных частиц (молекул и атомов азота в возбужденном и ионизованном состоянии), поступающих на поверхность азотируемых изделий, но и скоростью диффузии атомарного азота в объем материала, зависящей от температуры, элементного и фазового состава материала, а также от способа предварительной обработки поверхности [2].

Высокие концентрации активных частиц азота могут быть достигнуты в результате повышения интенсивности плазмохимических процессов при генерации плазмы с высокой плотностью заряженных частиц. Одним из способов генерации плазмы с плотностью  $10^9 \dots 10^{12} \text{ см}^{-3}$  является применение низкоэнергетического (до 1 кэВ) электронного пучка, который характеризуется меньшим уровнем потерь энергии на нагрев электронов и на возбуждение нейтралов по сравнению с газовым разрядом [3]. Наряду с эффективной генерацией плазмы электронный пучок может одновременно производить нагрев изделий, причем регулированием параметров пучка и отрицательного потенциала погруженных в плазму изделий можно изменять температуру изделий без использования дополнительного внешнего нагрева. Так, применение широкого ( $80 \text{ см}^2$ ) пучка электронов с энергией до 500 эВ обеспечило высокую (до  $6 \text{ мА/см}^2$ ) плотность ионного тока на поверхности аустенитной нержавеющей стали и формирование упрочненных слоев толщиной до 33 мкм за один час при давлении газовой смеси 3 Па ( $\text{Ar:N}_2 = 1:1$ ) и температуре обработки  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  [4].

К недостаткам ионно-плазменного азотирования можно отнести рост средней величины микронеоднородностей на поверхности нержавеющей стали, который обусловлен высокой концентрацией внедренного азота и появлением фаз с увеличенным параметром решетки. Это приводит к формированию своеобразной мор-

фологии поверхности, на которой наблюдается большое количество дефектов, образованных вследствие пластической деформации сдвига [5, 6]. Величина параметра шероховатости  $Ra$  возрастает с увеличением температуры обработки и может превышать 0,7 мкм [5], что неприемлемо в случае применения азотирования на финишном этапе обработки.

Уменьшение исходного размера зерен способствует формированию поверхности с меньшей шероховатостью. Кардинальное снижение размера зерна нержавеющей стали (с 5...50 мкм до 100 нм) обеспечивается наноструктурирующей деформационной обработкой (НДО) поверхности методом SMAT (surface mechanical attrition treatment) [7]. Кроме того, нанокристаллические материалы с большой протяженностью межзеренных границ обладают повышенными коэффициентами диффузии азота [8, 9]. Это позволяет увеличить скорость роста азотированного слоя на предварительно наноструктурированной поверхности [10, 11]. В метастабильных сталях НДО приводит также к образованию мартенситной фазы с более высоким коэффициентом диффузии азота, чем у плотно упакованной  $\gamma$ -фазы [12]. При этом НДО снижает коэффициент трения и повышает износостойкость азотированной поверхности железа [13].

Практически значимыми способами НДО являются наноструктурирующие фрикционные обработки, обеспечивающие одновременно эффективное деформационное упрочнение, повышение трибологических свойств аустенитных хромоникелевых сталей и формирование качественных поверхностей с низкой шероховатостью [14–18]. Таким образом, сочетание НДО методом фрикционной обработки с последующим ионно-плазменным азотированием может создать условия для ускоренного формирования упрочненных слоев с большей чем при азотировании без НДО толщиной и твердостью, однако шероховатость поверхности при этом будет зависеть от режимов плазменного азотирования. В частности, известно, что снижение шероховатости азотированной поверхности аустенитной стали, не подвергавшейся НДО, достигается применением метода газоциклического азотирования в плазме электронного пучка [19].

Цель настоящей работы – исследование влияния комбинированной обработки, включающей



наноструктурирующую фрикционную обработку скользящим индентором и последующее непрерывное и газоциклическое азотирование в плазме электронного пучка при температурах 450 и 500 °С, на упрочнение и качество поверхности аустенитной стали AISI 321 (04X17H8T).

### Методика экспериментального исследования

Исследовали коррозионностойкую аустенитную сталь 04X17H8T (аналог AISI 321) состава в масс. %: 0,04С; 16,77Cr; 8,44Ni; 1,15Mn; 0,67Si; 0,32Ti; 0,31Cu; 0,26Mo; 0,12Co; 0,12V; 0,04P; 0,03Nb; 0,005S. Образцы размером 40×20×10 мм вырезали из листовой стали методом электроискровой резки и подвергали закалке от 1100 °С с охлаждением в воде, механическому шлифованию, электролитическому полированию и фрикционной обработке. Фрикционную обработку проводили скользящим индентором из синтетического алмаза с радиусом полусферы  $R = 3$  мм в безокислительной среде аргона (рис. 1) при технологических условиях, исключая значительный фрикционный нагрев обрабатываемой поверхности: нагрузка на индентор  $P = 294$  Н, одиночное сканирование индентором при смещении на 0,02 мм на каждый двойной ход возвратно-поступательного движения. Далее образцы подвергали химической очистке в ультразвуковой ванне в ацетоне в течение 10 мин и помещали в вакуумную камеру для последующей ионно-плазменной обработки.

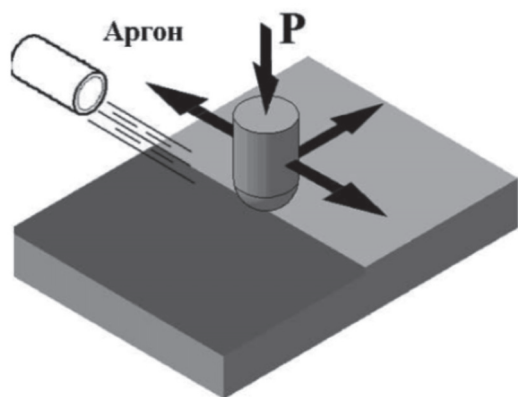


Рис. 1. Схема фрикционной обработки образца полусферическим индентором в среде аргона

Схема лабораторной установки для азотирования представлена на рис. 2. Источник электронов с плазменным катодом на основе тлеющего разряда низкого давления, аналогичный описанному в [20], электродная система которого состоит из полого катода 1 и полого анода 2, применяли для генерации плазмы в объеме вакуумной камеры. Ускоряющее напряжение  $U_a = 120$  В прикладывали между сеткой 3 и заземленными стенками рабочей камеры 4. Пучок электронов 5 круглого сечения площадью 80 см<sup>2</sup> формировался в двойном слое пространственного заряда, образуемом вблизи сетки. Держатель образцов 6, к которому прикладывали отрицательное напряжение смещения  $U_b = 120...200$  В, был установлен на расстоянии 150 мм от сетки. Температуру образцов 7 измеряли термопарой. Камера откачивалась турбомолекулярным насосом nEXT240 (Edwards) до давления  $2 \times 10^{-2}$  Па. Двухканальная система напуска газа (Bronkhorst) обеспечивала регулируемую подачу газов в камеру через электродную систему электронного источника. Давление смеси аргона с азотом ( $Ar/N_2 = 1/1$ ) составляло 3 Па. Использовали азот особой чистоты (99,999 %) и аргон высокой чистоты (99,998 %).

На начальном этапе образцы подвергали ионному распылению в течение 30 мин в аргонной плазме потоком ионов с плотностью тока 1...2 мА/см<sup>2</sup> и энергией 200...500 эВ, для того чтобы удалить с поверхности нержавеющей стали оксидные пленки, которые препятству-

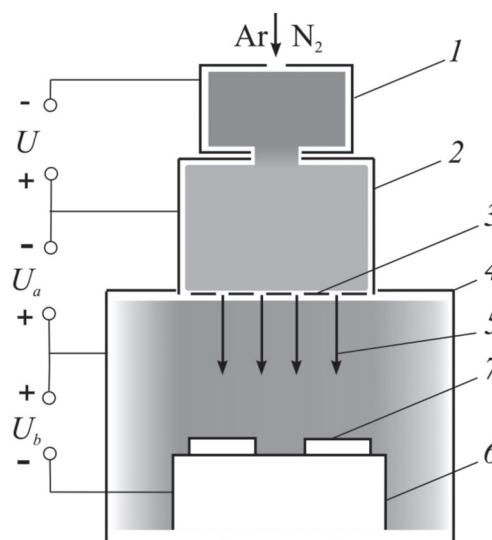


Рис. 2. Схема установки для азотирования

ют диффузии азота в объем материала, а также обеспечить нагрев образцов до температуры 450...500 °С.

Азотирование проводили в двух режимах: непрерывном и газоциклическом. В непрерывном режиме азотирования в течение всей длительности процесса (4 ч) в камеру подавалась смесь аргона и азота. При газоциклическом азотировании процесс состоял из восьми чередующихся полуциклов азотирования и деазотирования длительностью по 30 мин каждый. В первом полуцикле в камеру подавали смесь аргона и азота (аналогично непрерывному режиму азотирования), а во втором полуцикле подача азота прекращалась. Деазотирование проводили в среде аргона при давлении 1,5 Па. Поддержание постоянной температуры образцов на уровне 450 или 500 °С и удаление постоянно образующихся на поверхности стали оксидных слоев обеспечивалось бомбардировкой поверхности ионами, ускоренными до энергии 120 эВ (во время азотирования) или 200 эВ (во время деазотирования), при токе электронного пучка 3...4 А и плотности ионного тока на поверхности образцов 2...4 мА/см<sup>2</sup> соответственно.

Исследование поверхностей осуществляли на электронном сканирующем микроскопе Tescan VEGA II XMU. Расчет площадей, занимаемых порами и блистерами, видимыми на SEM-изображениях, производили с помощью программного комплекса ImageJ 1.50i. Шероховатость поверхности образцов изучали на опти-

ческом профилометре Wyko NT-1100. Микротвердость поверхности образцов измеряли на приборе SHIMADZU HNV-G21DT при нагрузке 0,245 Н. Фазовый состав образцов определяли на рентгеновском дифрактометре SHIMADZU XRD-7000 в  $\text{CrK}\alpha$ -излучении.

## Результаты и обсуждение

Исследования на электронном сканирующем микроскопе показывают, что в результате непрерывного азотирования при  $T_A = 500$  °С на поверхности закаленной стали происходит деформация («вспучивание», развороты) крупных зерен и субзерен (рис. 3, а) вследствие образования преимущественно по их границам большого количества нитридных фаз. Согласно данным оптической профилометрии азотирование повышает шероховатость поверхности крупнокристаллических образцов. Если после электролитического полирования среднеарифметическое отклонение профиля  $Ra$  составляло 0,08 мкм, то после азотирования при  $T_A = 500$  °С параметр  $Ra$  возрастает на порядок – до 0,80 мкм (рис. 3, б). Однако на азотированной поверхности не появляются дефекты сплошности в виде надрывов металла, трещин или пор (см. рис. 3).

Фрикционная обработка скользящими инденторами формирует в поверхностном слое аустенитных хромоникелевых сталей нанокристаллические и субмикрокристаллические структуры [14–18]. По данным рентгенострук-

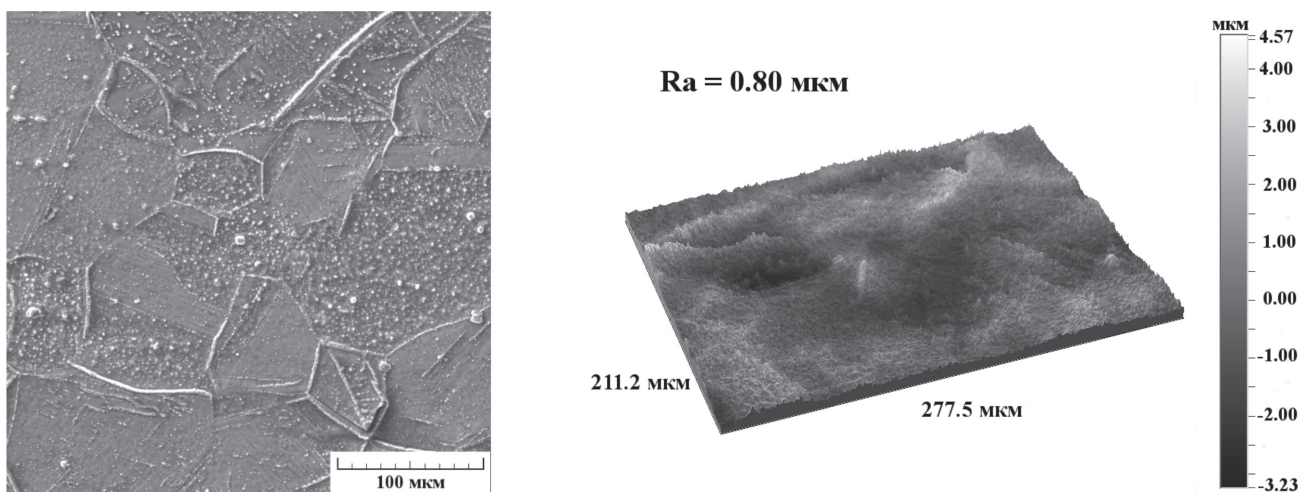


Рис. 3. Изображение на электронном сканирующем микроскопе (а) и трехмерная профилограмма (б) поверхности закаленной крупнокристаллической стали 04X17H8T после электрополировки и непрерывного азотирования в плазме электронного пучка при  $T_A = 500$  °С

турного анализа (рис. 4, а) фрикционная обработка аустенитной стали 04X17H8T приводит к возникновению на поверхности 95 об. %  $\alpha'$  мартенсита деформации и росту микротвердости до 780  $HV_{0,025}$  (при исходной твердости закаленной электрополированной стали 190  $HV_{0,025}$ ). После фрикционной обработки и непрерывного азотирования при  $T_A = 500$  и 450 °С основными фазами поверхностных слоев стали являются  $\epsilon$ -фаза  $Fe_{2,3}N$ ,  $\gamma'$  – фаза, соответствующая твердому раствору на базе нитрида  $Fe_4N$ , а также включения нитрида хрома CrN (рис. 4, б, в).

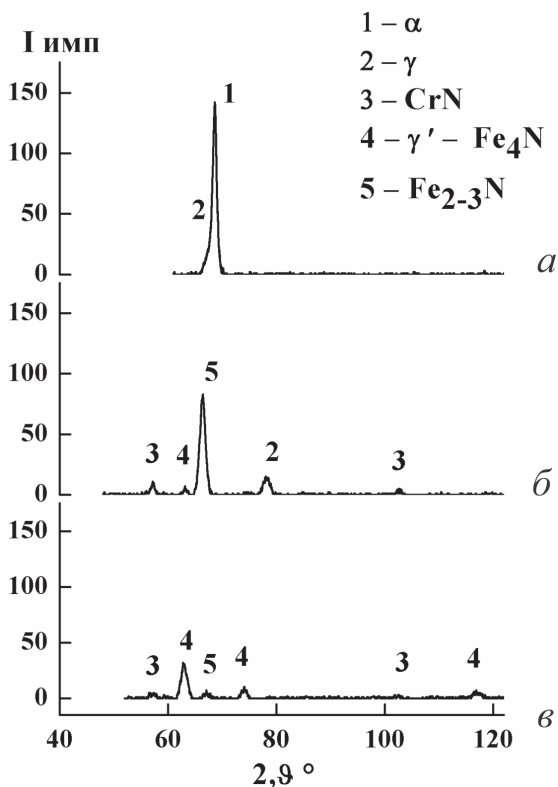


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы поверхности стали 04X17H8T после закалки, фрикционной обработки (а) и последующего непрерывного азотирования в плазме электронного пучка при  $T_A = 500$  °С (б) и 450 °С (в)

На рис. 5 и 6, а, б показано, что после непрерывного азотирования при температуре 500 °С на поверхности деформированной фрикционной обработкой стали возникают многочисленные поры и блистеры. Выраженный блистеринг проявляется в образовании на поверхности вспучиваний металла. Возникновение наблюдаемых дефектов поверхности можно объяснить ускоренной диффузией азота в наноструктури-

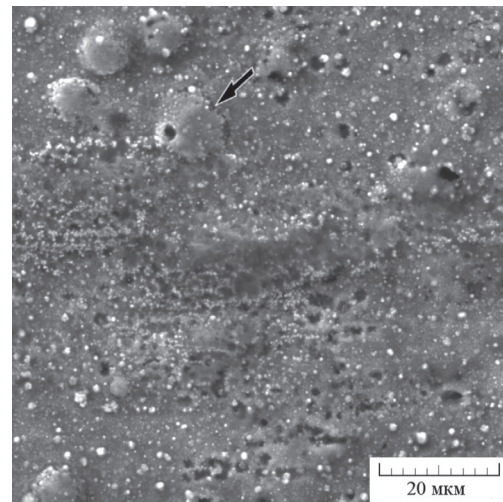
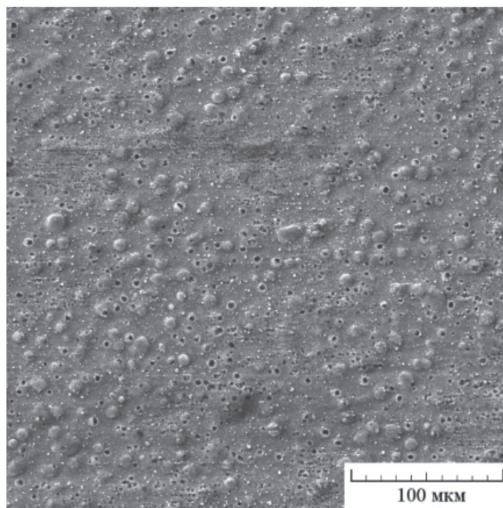


Рис. 5. Блистеры и поры на поверхности стали 04X17H8T после фрикционной обработки с последующим непрерывным азотированием в плазме электронного пучка при температуре  $T_A = 500$  °С (электронная сканирующая микроскопия)

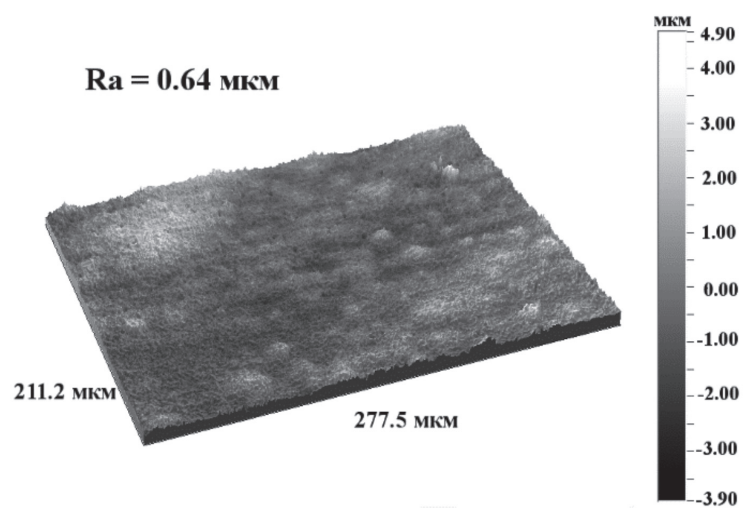
рованную поверхность. Различия в коэффициенте диффузии азота в наноструктурированном слое и в объеме металла приводят к накоплению азота в приповерхностном слое небольшой толщины. Этому способствует также наличие в слое структуры  $\alpha'$  мартенсита деформации с менее плотно упакованной ОЦК-кристаллической решеткой по сравнению в ГЦК-решеткой аустенита [12]. Высокие концентрации азота, превышающие предел растворимости азота в металле, приводят к формированию в поверхностном слое стали повышенного количества  $\epsilon$ -фазы и большой концентрации газообразного азота, скопления которого приводят к образованию пор, крупных блистеров и разрывам металла приповерхностного слоя (на рис. 5 стрелкой указана обусловленная блистерингом микротрещина).

Подобный эффект образования в приповерхностном слое газовых полостей отмечается и при имплантации больших доз ионов инертного газа (гелия или аргона), обладающих высокой энергией (десятки-сотни килоэлектронвольт) в металлические поверхности. В частности, блистеринг наблюдался в нержавеющей аустенитной стали 12X18H10T, предварительно облученной низкоэнергетическими альфа-частицами ( $E = 40$  кэВ) до высоких ( $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ) флюенсов [21].

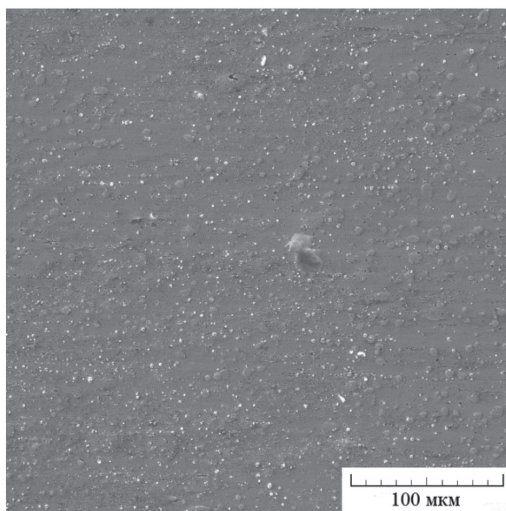




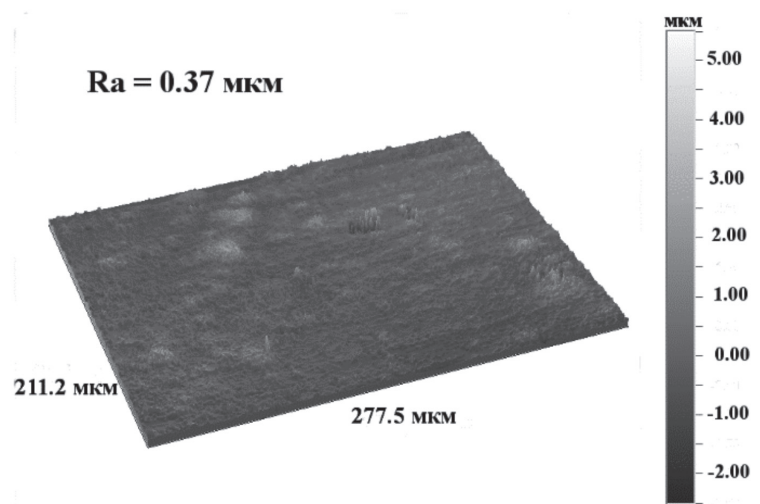
а



б



в



г

Рис. 6. Изображения на электронном сканирующем микроскопе (а, в) и трехмерные профилограммы (б, г) поверхности стали 04X17Н8Т после фрикционной обработки с последующим непрерывным азотированием в плазме электронного пучка при температурах  $T_A = 500\text{ }^\circ\text{C}$  (а, б) и  $T_A = 450\text{ }^\circ\text{C}$  (в, г)

Схожий механизм образования блистеров был обнаружен в работе [22], где в результате высокотемпературного окисления на поверхности азотированного слоя формировалась оксидная пленка, которая препятствовала выходу азота из объема металла в атмосферу. Таким образом, под поверхностью растущей оксидной пленки формировались пузыри из газообразного азота. Согласно [23] вспучивание слоя, вызванное большой концентрацией азота и образованием повышенного количества  $\epsilon$ -фазы, обуславливает его выкрашивание при последующей механической обработке, что должно негативно сказаться на износостойкости упрочненного слоя. Блистеринг

не только повышает шероховатость наноструктурированной поверхности до  $Ra = 0,64\text{ мкм}$  после азотирования при  $T_A = 500\text{ }^\circ\text{C}$  (см. рис. 6, б), но и ослабляет металл поверхностного слоя, вносит в него значительную поврежденность. Поэтому поиск путей устранения блистеринга и порообразования при азотировании в плазме электронного пучка диффузионно активных наноструктурированных поверхностей является первоочередной задачей.

Для решения проблемы блистеринга при азотировании поверхности аустенитной стали 04X17Н8Т, подвергнутой фрикционной обработке, применялись два способа. Первый – это



снижение температуры обработки. Результаты, представленные на рис. 6 и в табл. 1, показывают, что при уменьшении температуры азотирования от 500 до 450 °С размер и количество блистеров и открытых пор заметно снижается. Уменьшается также параметр шероховатости азотированной поверхности до  $Ra = 0,36$  мкм для  $T_A = 450$  °С (табл. 2). Однако, как известно, снижение температуры обработки существенно уменьшает скорость роста упрочненных слоев [5].

Другой способ устранения блистеринга и порообразования состоял в применении газоциклического азотирования (ГЦА), обеспечивающего снижение концентрации азота в азо-

тированном слое в результате диффузии азота в объем металла и выхода азота на поверхность на этапе деазотирования [24]. В работе [19] было исследовано влияние газоциклического азотирования на изменение рельефа поверхности недеформированной крупнокристаллической аустенитной стали и показано, что периодическое снижение насыщающей способности среды, которое достигается за счет прекращения подачи азота в рабочую камеру, позволяет существенно снизить величину  $Ra$ . Однако в сравнении с непрерывным режимом азотирования (НА) при одинаковых значениях температуры и времени обработки режим ГЦА обеспечивает формирование упрочненных слоев с меньшей толщиной и микротвердостью [19].

**Характеристики блистеров и пор на поверхности стали 04X17H8T после фрикционной обработки (ФО) с последующим непрерывным азотированием (НА) и газоциклическим азотированием (ГЦА)**

Обработка	$T_A$ , °С	$S_b$ , мкм <sup>2</sup>	$S_{ba}$ , %	$S_p$ , мкм <sup>2</sup>	$S_{pa}$ , %
ФО + НА	500	80	7,2	3	3,7
ФО + НА	450	15	5,3	1	0,3
ФО + ГЦА	500	0	0	2	1,3
ФО + ГЦА	450	0	0	1	0,03

Обозначения:

$T_A$  – температура азотирования;

$S_b$  – средняя площадь поверхности, занимаемая одним блистером;

$S_{ba}$  – площадь поверхности, занимаемая блистерами;

$S_p$  – средняя площадь поверхности, занимаемая одной порой;

$S_{pa}$  – площадь поверхности, занимаемая порами.

Таблица 2

**Влияние фрикционной обработки (ФО) и последующего непрерывного азотирования (НА) и газоциклического азотирования (ГЦА) при температурах  $T_A$  на параметр шероховатости  $Ra$  и микротвердость  $HV0,025$  поверхности стали 04X17H8T**

Обработка	$T_A$ , °С	$Ra$ , мкм	$HV0,025$
ФО	–	0,10	780
ФО + НА	500	0,64	1370
ФО + НА	450	0,36	1450
ФО + ГЦА	500	0,46	1160
ФО + ГЦА	450	0,32	1200

Таблица 1 Результаты, представленные на рис. 7 и в табл. 1 и 2, свидетельствуют, что режим газоциклического азотирования наноструктурированной фрикционной обработкой поверхности обеспечивает по сравнению с режимом непрерывного азотирования снижение параметра шероховатости  $Ra$  (в 1,35 раза для температуры азотирования  $T_A = 500$  °С), при этом блистеры исчезают полностью, а количество пор снижается в 3...10 раз. Анализ полученных электронной сканирующей микроскопией изображений поверхности с помощью программного комплекса ImageJ 1.50i показал, что площадь поверхности, занимаемая порами, снизилась с 3,7 до 1,3 % для  $T_A = 500$  °С и с 0,3 до 0,03 % для  $T_A = 450$  °С (см. табл. 1).

Согласно данным табл. 2 после газоциклического азотирования на наноструктурированной фрикционной обработкой поверхности стали достигается меньший уровень микротвердости (1160...1200 HV0,025), чем после непрерывного азотирования (1370...1450 HV0,025). Это указывает на более низкую концентрацию азота в приповерхностном слое после газоциклического азотирования. Тем не менее полученный в режиме ГЦА «пониженный» уровень микротвердости превосходит твердость исходной закаленной стали в 6 раз, а стали, подвергнутой только фрикционной обработке, в 1,5 раза.

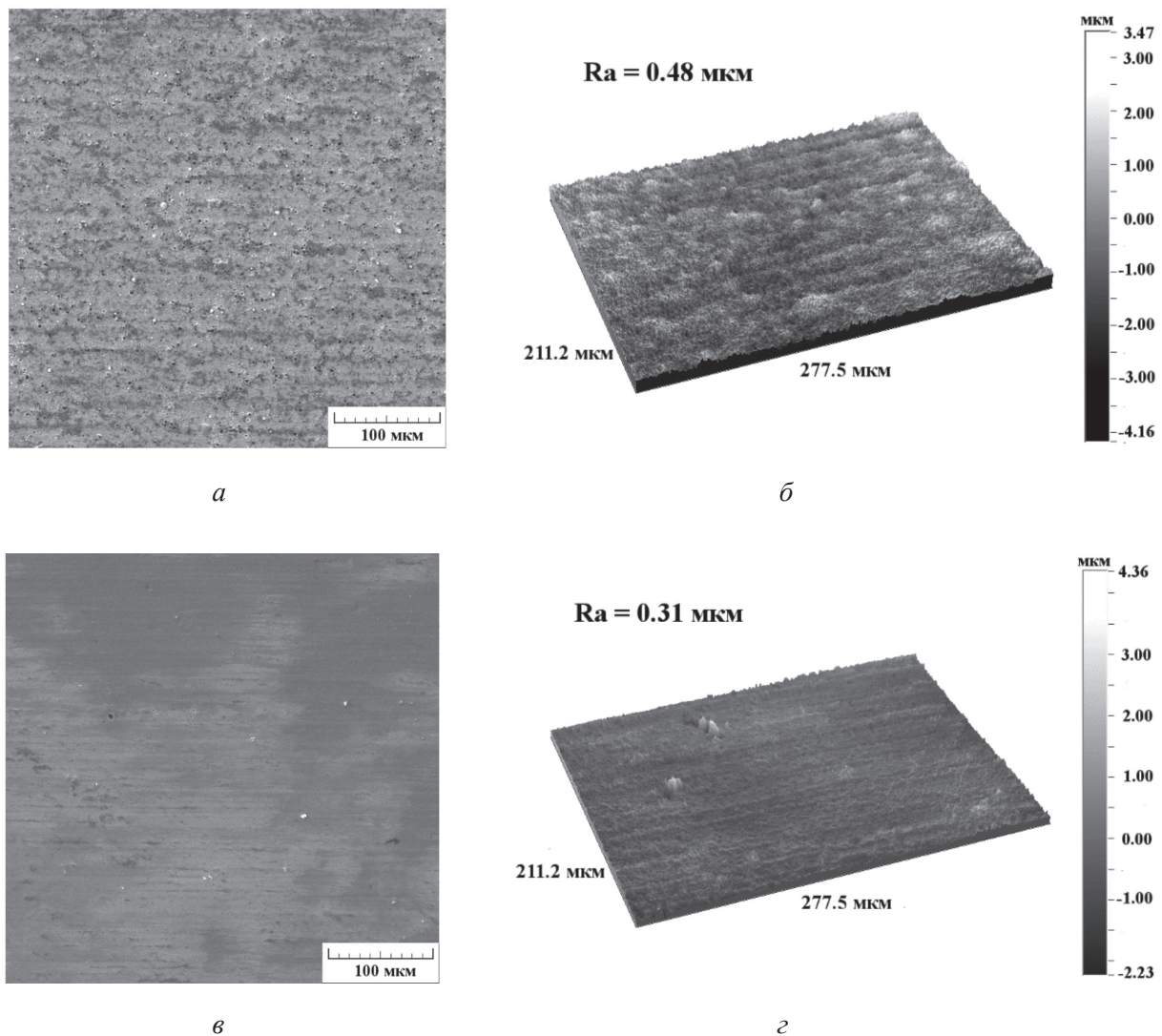


Рис. 7. Изображения на электронном сканирующем микроскопе (а, в) и трехмерные профилограммы (б, г) поверхности стали 04X17H8T после фрикционной обработки с последующим газоциклическим азотированием в плазме электронного пучка при температурах  $T_A = 500$  °C (а, б) и  $T_A = 450$  °C (в, г)

## Выводы

1. После непрерывного азотирования в плазме низкоэнергетического электронного пучка при температуре 500 °C на поверхности метастабильной аустенитной стали 04X17H8T, подвергнутой наноструктурирующей фрикционной обработке, наблюдается порообразование и выраженный блистеринг, который проявляется в возникновении многочисленных вспучиваний на поверхности металла. Это является, по-видимому, следствием ускоренной диффузии азота в наноструктурированную поверхность со структурой  $\alpha'$  мартенсита деформации. При азотировании крупнокристаллической стали такой эффект отсутствует.

2. Улучшение качества поверхности азотированной стали, упрочненной фрикционной обработкой (уменьшение блистеринга, порообразования и шероховатости), достигается проведением газоциклического азотирования, включающего чередующиеся полуциклы азотирования в смеси аргона и азота и деазотирования (без подачи азота), а также снижением температуры азотирования от 500 до 450 °C.

3. Микротвердость стали с наноструктурированной поверхностью после газоциклического азотирования составляет (1160...1200  $HV_{0,025}$ ), что ниже, чем после непрерывного азотирования (1370...1450  $HV_{0,025}$ ).

## Список литературы

1. *Rolinski E.* Plasma-assisted nitriding and nitrocarburizing of steel and other ferrous alloys // *Thermochemical Surface Engineering of Steels: Improving Materials Performance.* – 2015. – P. 413–457.

2. Role of surface mechanical attrition treatment and chemical etching on plasma nitriding behavior of AISI 304L steel / A.M. Gatey, S.S. Hosmani, C.A. Figueroa, S.B. Arya, R.P. Singh // *Surface and Coatings Technology.* – 2016. – Vol. 304. – P. 413–424.

3. *Leonhardt D., Walton S.G., Fernsler R.F.* Fundamentals and applications of a plasma-processing system based on electron-beam ionization // *Physics of Plasmas.* – 2007. – Vol. 14. – P. 057103. – doi: 10.1063/1.2712424.

4. *Gavrilov N.V., Menshakov A.I.* Effect of the electron beam and ion flux parameters on the rate of plasma nitriding of an austenitic stainless steel // *Technical Physics.* – 2012. – Vol. 57, iss. 3. – P. 399–404. – doi: 10.1134/S1063784212030073.

5. Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment temperature / F. Borgioli, A. Fossati, E. Galvanetto, T. Bacci // *Surface and Coatings Technology.* – 2005. – Vol. 200, iss. 7. – P. 2474–2480. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.07.110.

6. Plasma nitriding of 316L austenitic stainless steel: Experimental investigation of fatigue life and surface evolution / J.C. Stinville, P. Villechaise, C. Templier, J.P. Riviere, M. Drouet // *Surface and Coatings Technology.* – 2010. – Vol. 204, iss. 12–13. – P. 1947–1951. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2009.09.052.

7. Surface nanocrystallization by surface mechanical attrition treatment and its effect on structure and properties of plasma nitrided AISI 321 stainless steel / Y. Lin, J. Lu, L. Wang, T. Xu, Q. Xue // *Acta Materialia.* – 2006. – Vol. 54, iss. 20. – P. 5599–5605. – doi: 10.1016/j.actamat.2006.08.014.

8. *Gleiter H.* Nanocrystalline materials // *Progress in Materials Science.* – 1989. – Vol. 33, iss. 4. – P. 223–315. – doi: 10.1016/0079-6425(89)90001-7.

9. *Lu K.* Nanocrystalline metals crystallized from amorphous solids: nanocrystallization, structure, and properties // *Materials Science and Engineering R-Reports.* – 1996. – Vol. 16, iss. 4. – P. 161–221. – doi: 10.1016/0927-796X(95)00187-5.

10. Nitriding iron at lower temperatures / W.P. Tong, N.R. Tao, Z.B. Wang, J. Lu, K. Lu // *Science.* – 2003. – Vol. 299, iss. 5607. – P. 686–688. – doi: 10.1126/science.1080216.

11. Gaseous nitriding of iron with a nanostructured surface layer / W.P. Tong, C.Z. Liu, W. Wang, N.R. Tao, Z.B. Wang, L. Zuo, J.C. He // *Scripta Materialia.* – 2007. – Vol. 57, iss. 6. – P. 533–536. – doi: 10.1016/j.scriptamat.2007.05.017.

12. Plasma nitriding of AISI 304 stainless steel: role of surface mechanical attrition treatment / T. Balusamy, T.S.N.S. Narayanan, K. Ravichandran, I.S. Park, M.H. Lee // *Materials Characterization.* – 2013. – Vol. 85. – P. 38–47. – doi: 10.1016/j.matchar.2013.08.009.

13. Study on wear and friction resistance of nanocrystalline Fe nitrided at low temperature / W.P. Tong, J. Sun, L. Zuo, J.C. He, J. Lu // *Wear.* – 2011. – Vol. 271, iss. 5–6. – P. 653–657. – doi: 10.1016/j.wear.2010.11.024.

14. *Baraz V.R., Kartak B.R., Mineeva O.N.* Special features of friction hardening of austenitic steel with unstable  $\gamma$ -phase // *Metal science and Heat Treatment.* – 2011. – Vol. 52, iss. 9. – P. 473–475. – doi: 10.1007/s11041-010-9302-x.

15. Повышение трибологических свойств аустенитной стали 12X18H10T наноструктурирующей фрикционной обработкой / А.В. Макаров, П.А. Скорынина, А.Л. Осинцева, А.С. Юровских, Р.А. Саврай // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* – 2015. – № 4 (69). – С. 80–92. doi: 10.17212/1994-6309-2015-4-80-92.

16. *Baraz V.R., Fedorenko O.N.* Special features of friction treatment of steels of the spring class // *Metal Science and Heat Treatment.* – 2016. – Vol. 57, iss. 11. – P. 652–655. – doi: 10.1007/s11041-016-9937-3.

17. Eddy-current control of the phase composition and hardness of metastable austenitic steel after different regimes of nanostructuring frictional treatment / A.V. Makarov, E.S. Gorkunov, P.A. Skorynina, L.Kh. Kogan, A.S. Yurovskikh, A.L. Osintseva // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* – 2016. – Vol. 52, iss. 11. – P. 627–637. – doi: 10.1134/S1061830916110048.

18. Наноструктурирующие комбинированные фрикционно-термические обработки аустенитной стали 12X18H10T / А.В. Макаров, П.А. Скорынина, Е.Г. Волкова, А.Л. Осинцева // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета.* – 2016. – № 4 (38). – С. 30–37. – doi: 10.18323/2073-5073-2016-4-30-37.

19. *Мамаев А.С., Чукин А.В.* Газоциклическое плазменное азотирование нержавеющей стали // *Известия вузов. Физика.* – 2016. – Т. 59, № 9-2. – С. 244–249.

20. *Gavrilov N.V., Mamaev A.S.* Low-temperature nitriding of titanium in low-energy electron beam excited plasma // *Technical Physics Letters.* – 2009. – Vol. 35, iss. 8. – P. 713–716. – doi: 10.1134/S1063785009080082.

21. Блистеринг и  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -превращения при отжиге стали 12X18H10T, облученной низкоэнергетическими альфа-частицами / С.Б. Кислицин, М.Ф. Верещак, И.А. Манакова, А.Н. Озерной, Д.А. Сатпаев, Ю.Ж. Тулеушев // *Вопросы атомной науки и техники.* – 2013. – № 2 (84). – С. 17–22.

22. Effect of nitrogen on blister growth process during high temperature oxidation of steel / Y. Kondo,



H. Tanei, K. Ushioda, M. Maeda, Y. Abe // ISIJ International. – 2012. – Vol. 52, N 9. – P. 1644–1648. – doi: 10.2355/isijinternational.52.1644.

23. Теория и технология азотирования / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, Г.-И. Шпис, З. Бемер. – М.: Металлургия, 1991. – 320 с.

24. *Belashova I.S., Shashkov A.O.* Kinetics of growth of the diffusion layer in nitriding by the thermogase-cyclic method // Metal Science and Heat Treatment. – 2012. – Vol. 54, iss. 5. – P. 315–319. – doi: 10.1007/s11041-012-9504-5.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (75), April – June 2017, Pages 55–66

### Effect of a continuous and gas-cyclic plasma nitriding on the quality of nanostructured austenitic stainless steel

**Makarov A. V.**<sup>1,2</sup>, D.Sc. (Engineering), Senior Researcher, Head of department, Head of laboratory, e-mail: av-mak@yandex.ru

**Gavrilov N. V.**<sup>3</sup>, Corresponding member of RAS, D.Sc. (Engineering), Head of laboratory, e-mail: gavrilov@iep.uran.ru

**Samoylova G.V.**<sup>1</sup>, Ph.D. student, e-mail: alisova@mail.ru

**Mamaev A. S.**<sup>3</sup>, Ph.D. (Engineering), Researcher, e-mail: asm@iep.uran.ru

**Osintseva A.L.**<sup>2</sup>, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, e-mail: lkm@imach.uran.ru

**Savrai R.A.**<sup>2</sup>, Ph.D. (Engineering), Head of laboratory, e-mail: ras@imach.uran.ru

<sup>1</sup> M.N. Miheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 18 S. Kovalevskoy st., Ekaterinburg, 620990, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Engineering Science Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya str., Ekaterinburg, 630049, Russian Federation

<sup>3</sup> Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 106 Amundsen St., Ekaterinburg, 620016, Russian Federation

#### Abstract

Plasma nitriding is an effective method of the austenitic stainless chromium-nickel steels hardening. Usage of the low-energy electron beams (to 1 keV), that is typical for plasma generator, provides smaller loss of energy then usage of gas discharges. Low-energy electron beams allow change current density and ion energy independently of one another without using additional external heating devices. The lack of ion-plasma nitriding is deterioration of nitrided surface quality. Nanostructured deformation processing could be applied before nitriding with the aim of increasing growth rate of nitrided layer and reduction of nitrided surface roughness. In the paper, the influence of combined processing including nanostructuring frictional treatment by sliding indenter and following continuous and gas-cyclic plasma nitriding in electron-beam plasma at a temperature of 450 °C and 500 °C on hardening and surface quality of austenitic steel AISI 321 (0.04 wt.% C; 16,77 wt.% Cr; 8,44 wt.% Ni; 1,15 wt.% Mn; 0,67 wt.% Si; 0,32 wt.% Ti; 0,31 wt.% Cu; 0,26 wt.% Mo; 0,12 wt.% Co; 0,12 wt.% V; 0,04 wt.% P; 0,03 wt.% Nb; 0,005 wt.% S; and Fe for balance) is studied.

It is established that friction treatment leads to occurrence of 95 vol. %  $\alpha'$  strain-induced martensite and increasing of microhardness to 780 HV<sup>0.025</sup> on nitrided surface. On the nanostructured by frictional treatment surface of metastable austenitic steel AISI 321 (in contrast to nitrided coarse-grained steel) after continuous plasma nitriding in electron-beam plasma pore formation and intensive blistering is observed. Blistering is characterized by forming of steam blows and surface blowout. Obvious blistering appears due to advanced nitrogen diffusion into nanostructured surface with  $\alpha'$  strain-induced martensitic structure.

Improvement in quality of the nitrided steel surface, hardened by frictional treatment (decreasing of blistering, pore formation and roughness), is achieved by means of: 1) gas-cyclic plasma nitriding is carried out at the conditions of periodic alternation nitriding semicycles in mixture of argon and nitrogen and denitriding (without nitrogen supply); 2) nitriding temperature decreasing from 500 °C to 450 °C. However after gas-cyclic plasma nitriding of nano-



structured surface lower micro-hardness level (1 160...1 200 HV<sup>0.025</sup>) then after continuous nitriding (1 370...1 450 HV<sup>0.025</sup>) is observed.

### Keywords

austenitic stainless steel, frictional treatment, electron beam, plasma, gas-cyclic nitriding, strain-induced martensite, microhardness, roughness, pores.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-55-66

### References

1. Rolinski E. Plasma-assisted nitriding and nitrocarburizing of steel and other ferrous alloys. *Thermochemical Surface Engineering of Steels: Improving Materials Performance*, 2015, pp. 413–457. doi: 10.1533/9780857096524.3.413.
2. Gatey A.M., Hosmani S.S., Figueroa C.A., Arya S.B., Singh R.P. Role of surface mechanical attrition treatment and chemical etching on plasma nitriding behavior of AISI 304L steel. *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 304, pp. 413–424. doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.020.
3. Leonhardt D., Walton S.G., Fernsler R.F. Fundamentals and applications of a plasma-processing system based on electron-beam ionization. *Physics of Plasmas*, 2007, vol. 14, p. 057103. doi: 10.1063/1.2712424.
4. Gavrilov N.V., Menshakov A.I. Effect of the electron beam and ion flux parameters on the rate of plasma nitriding of an austenitic stainless steel. *Technical Physics*, 2012, vol. 57, iss. 3, pp. 399–404. doi: 10.1134/S1063784212030073.
5. Borgioli F., Fossati A., Galvanetto E., Bacci T. Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment temperature. *Surface and Coatings Technology*, 2005, vol. 200, iss. 7, pp. 2474–2480. doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.07.110.
6. Stinville J.C., Villechaise P., Templier C., Riviere J.P., Drouet M. Plasma nitriding of 316L austenitic stainless steel: experimental investigation of fatigue life and surface evolution. *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 204, iss. 12–13, pp. 1947–1951. doi: 10.1016/j.surfcoat.2009.09.052.
7. Lin Y., Lu J., Wang L., Xu T., Xue Q. Surface nanocrystallization by surface mechanical attrition treatment and its effect on structure and properties of plasma nitrided AISI 321 stainless steel. *Acta Materialia*, 2006, vol. 54, iss. 20, pp. 5599–5605. doi: 10.1016/j.actamat.2006.08.014.
8. Gleiter H. Nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*, 1989, vol. 33, iss. 4, pp. 223–315. doi: 10.1016/0079-6425(89)90001-7.
9. Lu K. Nanocrystalline metals crystallized from amorphous solids: nanocrystallization, structure, and properties. *Materials Science and Engineering R-Reports*, 1996, vol. 16, iss. 4, pp. 161–221. doi: 10.1016/0927-796X(95)00187-5.
10. Tong W.P., Tao N.R., Wang Z.B., Lu J., Lu K. Nitriding iron at lower temperatures. *Science*, 2003, vol. 299, iss. 5607, pp. 686–688. doi: 10.1126/science.1080216.
11. Tong W.P., Liu C.Z., Wang W., Tao N.R., Wang Z.B., Zuo L., He J.C. Gaseous nitriding of iron with a nanostructured surface layer. *Scripta Materialia*, 2007, vol. 57, iss. 6, pp. 533–536. doi: 10.1016/j.scriptamat.2007.05.017.
12. Balusamy T., Narayanan T.S.N.S., Ravichandran K., Park I.S., Lee M.H. Plasma nitriding of AISI 304 stainless steel: role of surface mechanical attrition treatment. *Materials Characterization*, 2013, vol. 85, pp. 38–47. doi: 10.1016/j.matchar.2013.08.009.
13. Tong W.P., Sun J., Zuo L., He J.C., Lu J. Study on wear and friction resistance of nanocrystalline Fe nitrided at low temperature. *Wear*, 2011, vol. 271, iss. 5–6, pp. 653–657. doi: 10.1016/j.wear.2010.11.024.
14. Baraz V.R., Kartak B.R., Mineeva O.N. Special features of friction hardening of austenitic steel with unstable  $\gamma$ -phase. *Metal science and Heat Treatment*, 2011, vol. 52, iss. 9, pp. 473–475. doi: 10.1007/s11041-010-9302-x.
15. Makarov A.V., Osintseva A.L., Yurovskikh A.S., Savrai R.A. Povyshenie tribologicheskikh svoistv austenitnoi stali 12Kh18N10T nanostrukturiruyushchei friktsionnoi obrabotkoi [Improving the tribological properties of austenitic 12Kh18N10T steel by nanostructuring frictional treatment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2015, no. 4 (69), pp. 80–92. doi: 10.17212/1994-6309-2015-4-80-92.
16. Baraz V.R., Fedorenko O.N. Special features of friction treatment of steels of the spring class. *Metal Science and Heat Treatment*, 2016, vol. 57, iss. 11, pp. 652–655. doi: 10.1007/s11041-016-9937-3.
17. Makarov A.V., Gorkunov E.S., Skorynina P.A., Kogan L.Kh., Yurovskikh A.S., Osintseva A.L. Eddy-current control of the phase composition and hardness of metastable austenitic steel after different regimes of nanostructur-

ing frictional treatment. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, iss. 11, pp. 627–637. doi: 10.1134/S1061830916110048.

18. Makarov A.V., Skorynina P.A., Volkova E.G., Osintseva A.L. Nanostrukturiruyushchie kombinirovannye friktsionno-termicheskie obrabotki austenitnoi stali 12Kh18N10T [Nanostructuring combined frictional-thermal treatment of 12Kh18N10N austenitic steel]. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta = Vector of sciences. Togliatti State University*, 2016, no. 4 (38), pp. 30–37. doi: 10.18323/2073-5073-2016-4-30-37.

19. Mamaev A.S., Chukin A.V. Gazotsiklichesкое plazmennoe azotirovanie nerzhaveyushchei stali [Gas-cyclic plasma nitriding of stainless steel]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika = Russian Physics Journal*, 2016, vol. 59, no. 9-2, pp. 244–249. (In Russian).

20. Gavrilov N.V., Mamaev A.S. Low-temperature nitriding of titanium in low-energy electron beam excited plasma. *Technical Physics Letters*, 2009, vol. 35, iss. 8, pp. 713–716. doi: 10.1134/S1063785009080082.

21. Kislitsin S.B., Vereshchak M.F., Manakova I.A., Ozernoi A.N., Satpaev D.A., Tuleushev Yu.Zh. Blistering i  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -prevrashcheniya pri otzhige stali 12Kh18N10T, obluchennoi nizkoenergeticheskimi  $\alpha'$ -chastitsami [Blistering and  $\alpha' \leftrightarrow \gamma$  phase transitions at annealing of stainless steel C12Cr18Ni10Ti irradiated by low energy alpha-particles]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki = Problems of atomic science and technology*, 2013, no. 2 (84), pp. 17–22.

22. Kondo Y., Tanei H., Ushioda K., Maeda M., Abe Y. Effect of nitrogen on blister growth process during high temperature oxidation of steel. *ISIJ International*, 2012, vol. 52, no. 9, pp. 1644–1648. doi: 10.2355/isijinternational.52.1644.

23. Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D., Shpis G.-I., Bemer Z. *Teoriya i tekhnologiya azotirovaniya* [Theory and technology of nitriding]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 320 p.

24. Belashova I.S., Shashkov A.O. Kinetics of growth of the diffusion layer in nitriding by the thermogasocyclic method. *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 54, iss. 5, pp. 315–319. doi: 10.1007/s11041-012-9504-5.

### Funding

The work is done on the topic "Structure" No. 01201463331 (project No. 15-9-12-45) with the support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 15-08-07947). Electronic scanning microscopy, profilometry and microhardness testing were carried out in the Center of Plastometry, IMAS, UrB RAS.

### Article history

Received 10 March 2017

Revised 10 April 2017

Accepted 10 May 2017

# ВЛИЯНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СТАЛИ РАЗРУШЕНИЮ ПРИ МНОГОКРАТНОМ ДИНАМИЧЕСКОМ СЖАТИИ

*А.И. ПОПЕЛЮХ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент*  
*С.В. ВЕСЕЛОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент*  
*Д.Д. МУНКУЕВА<sup>1</sup>, магистрант*  
*В.В. ТИМОНИН<sup>2</sup>, канд. техн. наук, зав. лабораторией*  
*В.Н.КАРПОВ<sup>2</sup>, научный сотрудник*  
*(<sup>1</sup>НГТУ, г. Новосибирск,*  
*<sup>2</sup>ИГД СО РАН, г. Новосибирск)*

Поступила 10 марта 2017

Рецензирование 10 апреля 2017

Принята к печати 10 мая 2017

**Попелюх А.И.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
Новосибирский государственный технический университет  
e-mail: aip13@mail.

Ресурс работы высокопроизводительных ударных машин, как правило, не превышает нескольких десятков часов машинного времени. Научные исследования показывают, что процесс разрушения деталей горных машин часто инициируют неметаллические включения и внутренние дефекты структуры стали. Одним из наиболее перспективных научных методов оценки влияния неметаллических включений является математическое моделирование. В работе проанализированы размер, форма и морфология неметаллических включений в десяти плавках стали 45. На основании полученных результатов проведено математическое моделирование интенсивности поля напряжений вблизи дефектов различного типа в условиях нагружения образцов динамическим сжатием. Достоверность данных численного моделирования подтверждена измерением фактической величины зональных напряжений первого рода методом рентгеноструктурного анализа. Установлено, что при динамическом сжатии вблизи пор и низкопрочных включений в основном материале формируются области с высоким уровнем локальных напряжений, при этом вблизи высокопрочных включений в граничной области основного материала величина напряжений незначительна. Для изготовления деталей ударных механизмов предложено использовать стали, в структуре которых при выплавке формируются включения, твердость которых превышает твердость матрицы.

**Ключевые слова:** сталь, неметаллические включения, внутренние напряжения, разрушение, надежность.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-67–78

## Введение

В настоящее время наиболее перспективные способы бурения основаны на использовании оборудования ударного действия. Высокая энергия ударных импульсов позволяет эффективно разрушать горную породу, однако одновременно является причиной быстрого разрушения дета-

лей ударных машин, ресурс которых обычно не превышает нескольких десятков часов машинного времени [1]. Традиционно ответственные детали ударных механизмов изготавливают из среднеуглеродистых сталей, которые упрочняют закалкой с последующим низким отпускком. Исследования усталостного разрушения высокопрочных сталей свидетельствуют, что

инициатором процесса часто выступают неметаллические включения и внутренние дефекты структуры [2,3,4]. Появление трещин вблизи включений может быть обусловлено различными факторами: концентрацией напряжений из-за различий в жесткости материала основы и включения; фазовым наклепом и изменением химического состава материала в граничных областях и т. д. Проведенные ранее на кафедре материаловедения в машиностроении НГТУ исследования показали, что в условиях циклического нагружения ударными импульсами сжатия зарубежные стали с низкой загрязненностью неметаллическими включениями по показателю усталостной долговечности более чем в три раза превосходят стали российского производства (при аналогичном химическом составе и сопоставимых прочностных характеристиках) [5, 6, 19]. Однако в условиях массового производства применение дорогостоящих сталей с высокой степенью чистоты является экономически нерациональным. Наиболее целесообразно использование сталей с такой степенью загрязненности включениями, при которой будут обеспечены требуемые технологические и эксплуатационные свойства деталей.

Существуют различные точки зрения о степени влияния морфологии, размера, формы и распределения неметаллических включений на показатели сопротивления стали усталостному разрушению. В ряде научных работ утверждается, что наибольшее влияние на процесс разрушения оказывает тип включений [7, 8]. Другая группа исследователей считает, что в наибольшей степени на свойства стали оказывает форма и распределение включений, а морфология включений играет второстепенную роль [9, 10, 11]. Наличие полярных точек зрения обусловлено тем, что на усталостные свойства стали влияет большое количество факторов: свойства включений и их адгезия с матрицей, характер нагружения, прочностные характеристики основного материала и т. д. Традиционный подход к оценке влияния включений на свойства стали требует подготовки значительного количества экспериментальных образцов и предполагает выплавку сталей заданного уровня загрязненности, что является сложной технологической задачей. Одним из наиболее перспективных научных методов оценки влияния неметаллических

включений является математическое моделирование.

Исследования, выполненные Y. Murakami, T. Endo, A. Заславским, В. Финкелем, М. Штрелем и другими исследователями [11–18], свидетельствуют, что при воздействии растягивающих напряжений зарождение трещин, как правило, происходит на границе включения и матричного материала или в самом материале включения. Затем трещины распространяются в материал основы, после чего происходит окончательное разрушение. Прочность границы включения и матрицы обычно значительно ниже, чем прочность включений и самой матрицы. Таким образом, при приложении внешней растягивающей нагрузки, превышающей прочность граничного слоя, включение становится механически эквивалентным поре или трещине. Данный научный подход экспериментально подтвержден в работах [11, 12]. Однако вышеуказанный принцип не может быть применен для анализа влияния неметаллических включений в условиях действия поля сжимающих напряжений. Даже при условии низкой прочности граничного слоя включение транслирует действие сжимающей силы в основной объем материала, поэтому характер распределения напряжений в граничных с включением областях существенным образом отличается от поля напряжений, создаваемых порой. В научной литературе аспекты влияния неметаллических включений на свойства стали при сжатии в основном оценены во взаимосвязи с технологическими процессами горячей обработки металлов давлением, при этом вопросы усталостного разрушения сталей при циклическом нагружении сжимающими напряжениями, не превышающими предел текучести стали, остаются слабо изученной областью. Цель исследований заключалась в оценке поля интенсивности напряжений вблизи неметаллических включений в условиях воздействия циклических сжимающих напряжений и разработке рекомендаций по применению сталей различной загрязненности для изготовления деталей ударных механизмов.

## Материалы и методы исследования

Оценку влияния неметаллических включений на механические свойства стали в услови-



ях нагружения динамическим сжатием проводили в несколько этапов. На начальном этапе при помощи методов металлографического и микроспектрального анализа были проанализированы размер, форма и морфология неметаллических включений в десяти плавках стали 45, которая находит широкое применение при изготовлении деталей ударных машин. Полученные результаты были использованы в качестве исходных данных для математического моделирования дефектов при расчете интенсивности поля напряжений вблизи включений различного размера, формы и морфологии. На заключительном этапе оценивали достоверность полученных математических моделей рентгеноструктурными исследованиями внутренних напряжений в модельных образцах из технически чистого железа с различным типом дефектов.

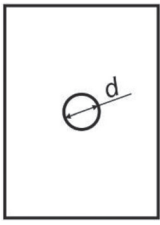
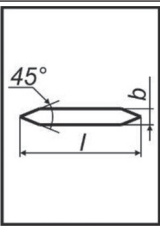
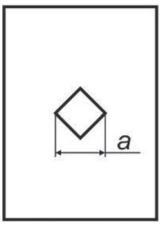
Металлографические исследования образцов из различных плавки стали 45 проводили на оптическом микроскопе Carl Zeiss AxioObserver A1m при увеличении от 25 до 1000 крат. Максимальные показатели загрязненности стали для каждого типа включений оценивали по методу Ш1 в соответствии с ГОСТ 1778. Идентификацию включений осуществляли на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO 50 XVP, оснащенный микроанализатором EDS X-Act.

Численный эксперимент проводили с использованием метода конечных элементов в программном пакете ANSYS Workbench 15.0. Модели с различными типами дефектов были выполнены в программной среде SolidWorks. В центре плоского образца размером  $35 \times 25 \times 3$  мм имитировали (создавали) дефекты цилиндрической и ромбической формы, а также в виде включений строчечного типа (табл. 1). Моделировали нагружение сжимающей силой, действующей параллельно оси образца. Расчетная величина сжимающих напряжений была равна 200 МПа для стали 45 и 105 МПа для армко-железа, что составляет 80 % от условного предела текучести основного материала. Механические свойства стали 45 и армко-железа были предварительно определены экспериментально на измерительном комплексе Instron 3369 в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 25.503–80. Размеры включений варьировали в диапазоне от 200 нм до 2 мм. Внутренний объем дефекта был заполнен пластичным

физическим материалом. Моделирование проводили в программной среде SolidWorks. В центре плоского образца размером  $35 \times 25 \times 3$  мм имитировали (создавали) дефекты цилиндрической и ромбической формы, а также в виде включений строчечного типа (табл. 1). Моделировали нагружение сжимающей силой, действующей параллельно оси образца. Расчетная величина сжимающих напряжений была равна 200 МПа для стали 45 и 105 МПа для армко-железа, что составляет 80 % от условного предела текучести основного материала. Механические свойства стали 45 и армко-железа были предварительно определены экспериментально на измерительном комплексе Instron 3369 в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 25.503–80. Размеры включений варьировали в диапазоне от 200 нм до 2 мм. Внутренний объем дефекта был заполнен пластичным

Таблица 1

## Виды моделируемых включений

Вид включения	Форма включения	Размер включения	Состав включения
Цилиндр		Диаметр 200 нм, 10 мкм, 50 мкм, 1, мм, 2 мм	Пора (воздух)
			Сульфид марганца
			Оксид алюминия
Строчка		Длина $l = 1000$ мкм, толщина $b = 20$ мкм	Сульфид марганца
Ромб		Длина диагонали $a = 50$ мкм	Пора (воздух)
			Сульфид марганца
			Оксид алюминия

Свойства материалов, используемых для математического моделирования

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент термического расширения, 1/°C	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести на сжатие / растяжение, МПа	Предел прочности на сжатие / растяжение, МПа
Сталь 45	7826	0,000012	210	0,28	245 / 245	– / 470
Армко-железо	7826	0,000012	210	0,28	140/140	– / 250
Медь М1	8940	0,0000165	130	0,35	120 / 120	– / 230
MnS	4000	0,0000181	90	0,3	–	–
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3950	0,000005	367	0,25	300 / 2100	300 / 2100

включением сульфида марганца MnS, твердым оксидом алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или оставался незаполненным (пора). Данные о свойствах включений были получены из литературных источников [9, 15] (табл. 2). В связи с тем что распределение напряжений вблизи включений строчечного типа зависит от ориентации включения относительно направления действия внешней нагрузки, строчечные включения располагали параллельно, перпендикулярно и под углом 45° относительно направления действия внешней сжимающей силы.

Подготовка конечно-элементной модели (построение 3D-модели образца, назначение типа конечных элементов (КЭ) и создание регулярной КЭ-сетки) осуществлялась в программном комплексе ANSYS. Генератором ANSYS Meshing была сформирована гексаэдрическая КЭ-сетка с использованием следующих типов конечных элементов: *Solid bodies* – твердые тела моделировали 8-узловыми тетраэдрами SOLID 45; *Surface bodies* поверхностные тела моделировали 4-узловыми 4-угольными оболочковыми элементами – SHELL 63; *Line bodies* – линейные тела моделировали 2-узловыми линейными элементами LINK 8. Размер конечных элементов варьировался в интервале 50 нм...1 мм. Общее количество элементов (*Elements*) составляло 340 000. При моделировании использовалась модель изотропного поведения тел (*Isotropic Elasticity*). На основании данных [9, 15], приведенных в табл. 2, в совокупности с функционалом компонента системы ANSYS Engineering Data была подго-

товлена база с описанием всего комплекса физико-механических характеристик материалов. Результатом моделирования являлись картины распределения интенсивности полей напряжений вблизи дефектов различной формы, размера и морфологии.

Проверку достоверности данных математического моделирования проводили при помощи рентгеноструктурного анализа зональных напряжений с последующим сравнением результатов с данными математического моделирования. В качестве модельного материала использовали образцы из армко-железа, являющегося гомогенным материалом, у которого в отличие от стали 45 в α-фазе не возникают дополнительные внутренние напряжения, связанные с фазовым наклепом. С целью получения равновесной структуры с минимальным уровнем внутренних напряжений образцы подвергали отжигу в вакуумной печи. Определение напряжений в образцах производилось на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA. Перед съемкой рентгенограмм проводилась подготовка поверхности образцов. После механического шлифования и полирования для удаления наклепанного слоя с анализируемой поверхности проводили дополнительную операцию электрополирования со съемом поверхностного слоя на глубину 400...500 мкм. Напряжения определяли в образцах как в исходном (ненагруженном) состоянии, так и в образцах, подвергнутых одноосевому сжатию. Для создания сжимающих напряжений образцы устанавливали в приспособление (рис. 1)

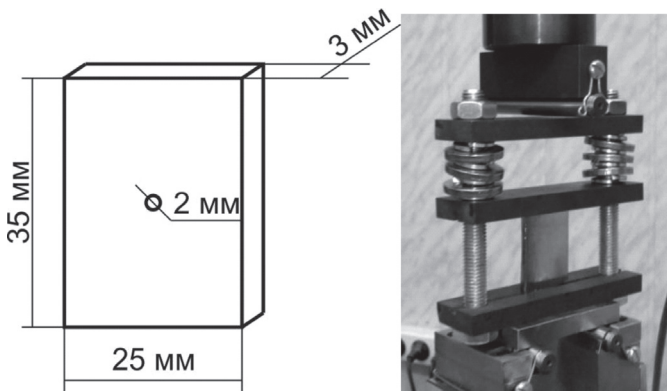


Рис. 1. Схема образца и внешний вид приспособления для создания сжимающих напряжений

и на испытательном комплексе Instron 3369 нагружали сжимающим усилием 8000 Н ( $\sigma_{сж} = 105$  МПа), которое фиксировали затяжкой упругих элементов. Измерение величины напряжений производилась по методу  $\sin^2\psi$ . [19, 20]. Для съемки рентгенограмм использовалась фокусировка по Брэггу–Брентано. Так как методика определения напряжений первого рода предполагает наклон и поворот анализируемой плоскости образца относительно оси гониометра, для исключения дефокусировки на анализируемую поверхность образца наносили эталонный материал, обеспечивающий реперный рефлекс на рентгенограммах. В качестве эталона использовали отожженное сусальное золото, в котором отсутствовали остаточные напряжения. Съемку производили с использованием рентгеновской трубки с хромовым анодом (излучение  $\text{CrK}_{\alpha 1/\alpha 2}$  [5]) при напряжении 40 кВ и токе 30 мА. Углы наклона образца  $\psi$  составили 0, 10, 15, 20, 30, 35, 40, 45 и 50,8°. Образец устанавливали таким образом, чтобы обеспечить измерение напряжений вдоль оси приложения нагрузки. Рентгенограммы, полученные при всех углах  $\psi$ , позволили определить знак и величину главных нормальных напряжений в плоскости образца. Шаг сканирования был равен 0,05°, время накопления в каждой позиции 60 с. Угловой диапазон съемки рентгенограммы  $2\theta$  составлял 150...162° и обеспечивал регистрацию рефлексов семейств плоскостей (211)  $\alpha$  – железа и (222) золота. Анализируемая область на образце представляла собой круг диаметром до 5 мм в непосредственной близости от моделируемого дефекта.

После измерения внутренних напряжений в образцах без дефектов в их центральной части

высверливали сквозное цилиндрическое отверстие диаметром 2 мм, имитирующее пору. Образцы повторно нагружали в приспособлении сжимающей силой, проводили съемку на дифрактометре и определяли уровень внутренних напряжений в исследуемой области вблизи дефекта. На финальной стадии исследования внутрь отверстия без зазора и натяга помещали цилиндр из алюмооксидной керамики, свойства которой аналогичны свойствам твердых неметаллических включений на основе шпинелей  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , или цилиндр из меди марки М1, которая по своим свойствам близка к сульфиду марганца MnS. Это позволило моделировать напряженное состояние материала вблизи пустых пор, твердых хрупких или пластичных низкопрочных включений. Затем полученные результаты сравнивали с расчетными данными, полученными в результате математического моделирования.

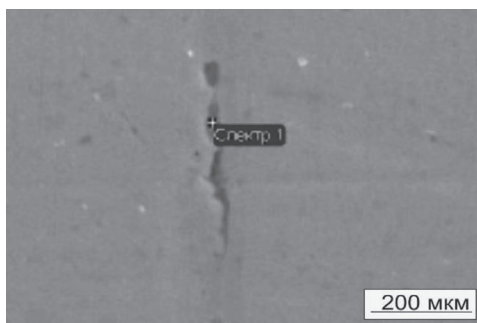
## Результаты исследования

В связи с тем что процесс разрушения обычно инициируют наиболее крупные включения, на начальной стадии исследования были определены максимальные показатели загрязненности и размеры каждого типа включений в десяти плавках стали 45 (табл. 3). Результаты металлографического исследования показывают, что во всех анализируемых образцах присутствуют как точечные включения оксидов, нитридов и силикатов, так и строчечные включения сульфида марганца. Наибольшая степень загрязнения выявлена для включений на основе точечных оксидов и пластичных сульфидов (рис. 2). Размер точечных неметаллических включений достигает 100 мкм. Длина пластичных включений может достигать 1 мм. Кроме включений сферических и строчечных включений в стали обнаружены включения ромбической формы размером до 50 мкм. Результаты микроспектрального анализа показали, что включения сферической формы могут состоять как из оксидов на основе алюминия, железа и магния, так и иметь в своем составе преимущественно сульфид марганца. Включения ромбической формы обладают высокой твердостью и, как правило, имеют сложный химический состав, включающий в себя оксиды алюминия, титана и кальция, а также сульфид марганца. Пластичные вытянутые включения

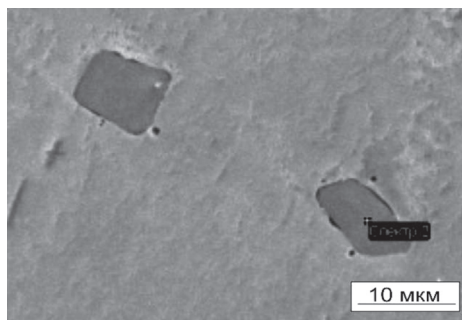
Таблица 3

**Показатели максимальной загрязненности стали 45 включениями различного типа в десяти анализируемых плавках**

Оценка в баллах по ГОСТ 1778 и максимальный размер включений							
Оксиды строчечные	Оксиды точечные	Силикаты хрупкие	Силикаты пластичные	Силикаты недеформирующиеся	Сульфиды пластичные	Нитриды и карбонитриды строчечные	Нитриды и карбонитриды точечные
4б	5а	3б	3а	4б	5а	2а	2а



а



б

Рис. 2. Строчечные (а) и точечные (б) включения в стали 45

состоят преимущественно из сульфида марганца. Результаты металлографических исследований были использованы в дальнейшем для задания параметров математических моделей.

Результаты исследований, проведенных ранее на кафедре материаловедения в машиностроении НГТУ, свидетельствуют, что в условиях многократного динамического сжатия разрушение материала происходит в результате накопления повреждений вблизи дефектов и

концентраторов напряжения [20]. Данные математического моделирования (табл. 4, рис. 3 и 4) позволяют сделать вывод, что даже в условиях сжатия вблизи дефектов в материале формируются локальные области растягивающих напряжений. Максимальный уровень эквивалентных напряжений, равный 2920 МПа, зафиксирован вблизи дефектов строчечного типа в случае их ориентации перпендикулярно действию внешней силы. Вблизи дефектов в форме ромба максимальный расчетный уровень напряжений достигает 680 МПа. На границе дефекта круглой формы максимальная величина эквивалентных напряжений составляют 600 МПа.

Результаты численного эксперимента показывают, что существенное влияние на интенсивность поля напряжений оказывает морфология неметаллических включений. Наибольший уровень эквивалентных напряжений зафиксирован у дефектов в виде пор (табл. 4). Вблизи пластичных неметаллических включений величина эквивалентных напряжений в 1,8...2 раза ниже. Распределение напряжений вблизи жестких и прочных включений оксидов алюминия является принципиально иным. Напряжения локализуются в материале включения, а в основном материале их уровень минимален. Оксидные включения обладают высокой прочностью, поэтому вероятность их разрушения при локализации поля напряжений в материале включения незначительна. Таким образом, на основании расчетных данных можно утверждать, что в условиях нагружения многократным динамическим



**Расчетные максимальные значения эквивалентных напряжений вблизи дефектов различного типа**

Форма включения	Размер и ориентация	Изменение максимальной величины эквивалентных напряжений в стали 45 и материале включения (при среднем уровне напряжений 200 МПа)					
		Образец с порой		Образец с включением $Al_2O_3$		Образец с включением MnS	
		в основном материале, МПа	в материале дефекта, МПа	в основном материале, МПа	в материале дефекта, МПа	в основном материале, МПа	в материале дефекта, МПа
Круглая	200 мкм	+378	–	–34	+148	+110	–54
	50 мкм	+376	–	–30	+128	+110	–54
	10 мкм	+400	–	–28	+108	+116	–56
	1 мкм	+374	–	–40	+140	+110	–60
	200 нм	+378	–	–30	+150	+110	–60
Ромбическая	50 мкм	+680	–	–46	+140	+130	–20
Строчечная	0°	+2720	–	*	*	+120	–42
	45°	+2360	–	*	*	+90	–16
	90°	+154	–	*	*	+50	–96

\* Моделирование не проводили, так как в стали дефекты подобного типа не встречаются

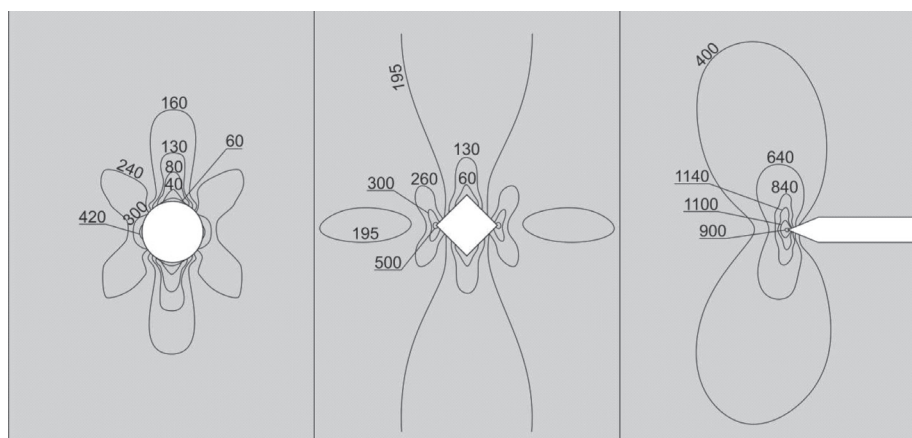


Рис. 3. Поле интенсивности напряжений вблизи полого дефекта различной формы

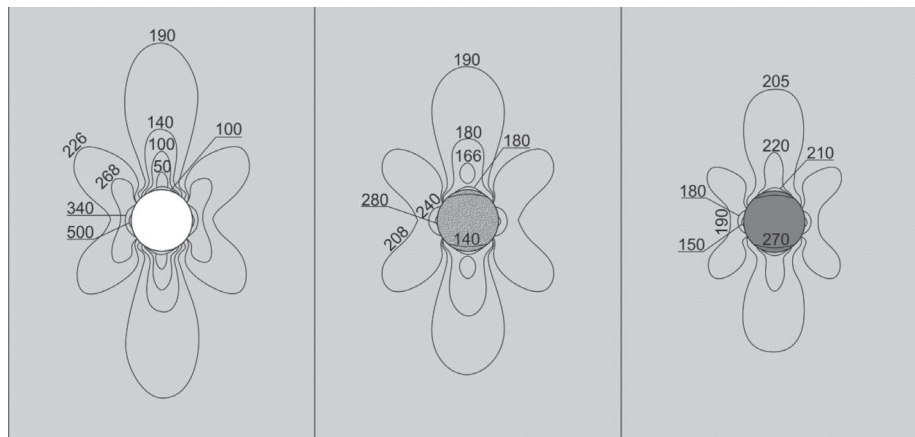


Рис. 4. Распределение полей интенсивности напряжений вблизи включений различного типа:

*a* – пустое отверстие; *б* – твердое включение  $Al_2O_3$ ; *в* – мягкое включение  $MnS$

сжатием у дефектов в виде пор и пластичных низкопрочных включений возникают локальные напряжения высокого уровня, которые могут являться причиной зарождения и распространения усталостных трещин в стали. Высокие показатели долговечности детали ударных машин, работающих в условиях динамического сжатия, могут быть обеспечены в случае применения сталей, в структуре которых при выплавке формируются включения, твердость которых превышает твердость матрицы или высокочистых сталей с малым содержанием неметаллических включений.

Для проверки достоверности данных численного эксперимента был использован метод рентгеноструктурного анализа зональных напряжений первого рода. В образцах из технически чистого железа последовательно создавали различные типы дефектов и проводили оценку напряженно-деформированного состояния.

Результаты рентгеноструктурного анализа подтверждают достоверность результатов математического моделирования (табл. 5). В ненагруженных образцах зафиксированный максимальный уровень напряжений составлял 5 МПа, что не превышало погрешность используемого рентгенографического метода. В сжатом состоянии в образце без дефекта измеренное фактическое значение напряжений составляло 95 МПа при расчетном уровне напряжений, равном 105 МПа. Как уже было отмечено ранее, метод не позволяет определять внутренние напряжения в непосредственной близости от границы дефекта, поэтому зафиксированная величина локальных напряжений отличалась от максимальных расчетных значений. Вблизи пустого отверстия цилиндрической формы при расчетном значении 165 МПа зафиксирован уровень напряжений, равный 158 МПа, что на 50 % превышает средний показатель по сечению образца. В образце

Таблица 5

**Фактические и расчетные значения напряжений в образцах из армко-железа с различным типом дефектов**

Форма включения	Размер и ориентация	Значение локальных напряжений в исследуемой области образца (при среднем уровне эквивалентных напряжений 105 МПа)					
		Пора		Дефект с керамикой $Al_2O_3$		Дефект с медью M1	
		расчет, МПа	факт, МПа	расчет, МПа	факт, МПа	расчет, МПа	факт, МПа
Круглая	2 мм	165	158	86	82	140	128

с отверстием, заполненным медью, был зарегистрирован уровень напряжений в 128 МПа. Согласно результатам расшифровки рентгенограмм при заполнении отверстия алюмооксидной керамикой и нагружении образца сжимающей силой величина напряжений в стали в месте измерения составляла 82 МПа, что приблизительно на 20 % меньше среднего уровня напряжений в основном материале. Таким образом, результаты рентгеновской дифрактометрии подтверждают предположение, что в условиях сжатия наличие в стали пор и пластичных низкопрочных включений приводит к значительному росту локальных напряжений в основном материале вблизи дефектов. Уровень локальных напряжений вблизи твердых высокопрочных включений ниже среднего показателя напряжений в стали.

### Выводы

1. Выпускаемая в настоящее время сталь 45 содержит в своей структуре значительное количество неметаллических включений, преимущественно в виде точечных оксидов и пластичных сульфидов. Размер точечных неметаллических включений достигает 100 мкм, длина пластичных включений может достигать 1 мм.

2. В условиях динамического сжатия морфология включений оказывает значительное влияние на характер поля интенсивности напряжений, возникающих вблизи неметаллических включений и дефектов в стали, поэтому применение подхода, при котором в расчетах включение принимается механически эквивалентным поре или трещине при данном виде нагружения является неправомерным.

3. Результаты математического моделирования и рентгеноструктурного анализа зональных напряжений показали, что при динамическом сжатии вблизи пор и низкопрочных включений в основном материале формируются области с локальными напряжениями, величина которых может превышать предел текучести стали. Распределение напряжений вблизи жестких и прочных включений оксидов алюминия является принципиально иным. Напряжения максимального уровня локализируются в материале включения, при этом в граничной области основного материала величина напряжений невысока.

4. Для изготовления деталей горных машин, работающих в условиях многократного циклического нагружения сжатием, предпочтительно применение сталей, в структуре которых при выплавке формируются включения, твердость которых превышает твердость матрицы, или применение высокочистых сталей с малым содержанием неметаллических включений.

### Список литературы

1. Downhole high-pressure air hammers for open pit mining / A.A. Repin, B.N. Smolyanitsky, S.E. Alekseev, A.I. Popelyukh, V.V. Timonin, V.N. Karpov // *Journal of Mining Science*. – 2014. – Vol. 50, no. 5. – P. 929–937. – doi: 10.1134/S1062739114050123.

2. *Murakami Y., Nomoto T., Ueda T.* Factors influencing the mechanism of superlong fatigue failure in steels // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. – 1999. – Vol. 22, iss. 7. – P. 581–590. – doi: 10.1046/j.1460-2695.1999.00187.x.

3. *Bergengren Y., Larsson M., Melander A.* The influence of machining defects and inclusions on the fatigue properties of a hardened spring steel // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. – 1995. – Vol. 18, iss. 10. – P. 1071–1087. – doi: 10.1111/j.1460-2695.1995.tb00840.x.

4. Estimation of maximum inclusion size and fatigue strength in high-strength ADF1 steel / J.M. Zhang, J.F. Zhang, Z.G. Yang, G.Y. Li, G. Yao, S.X. Li, W.J. Hui, Y.Q. Weng // *Materials Science and Engineering: A*. – 2005. – Vol. 394, iss. 1–2. – P. 126–131. – doi: 10.1016/j.msea.2004.11.015.

5. Influence of nonmetallic inclusions on endurance of percussive machines / A.A. Repin, S.E. Alekseev, A.I. Popelyukh, A.M. Teplykh // *Journal of Mining Science*. – 2011. – Vol. 47, iss. 6. – P. 798–807. – doi: 10.1134/S1062739147060128.

6. Исследование конструктивной прочности материалов после комбинированного упрочнения и специальных видов сварки / А.В. Плохов, А.И. Попелюх, С.В. Веселов, А.Г. Тюрин, А.А. Никулина. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – 392 с. – ISBN 978-5-7782-2635-7.

7. Influence of inclusion size on fatigue behavior of high strength steels in the gigacycle fatigue regime / J.M. Zhang, S.X. Li, Z.G. Yang, G.Y. Li, W.J. Hui, Y.Q. Weng // *International Journal of Fatigue*. – 2007. – Vol. 29, iss. 4. – P. 765–771. – doi: 10.1016/j.ijfatigue.2006.06.004.

8. *Dominguez G.M.A.* Prediction of very high cycle fatigue failure for high strength steels, based on the inclusion geometrical properties // *Mechanics of Materials*. – 2008. – Vol. 40, iss. 8. – P. 636–640. – doi: 10.1016/j.mechmat.2008.03.001.

9. On the critical inclusion size of high strength steels under ultra-high cycle fatigue / Z.G. Yang, J.M. Zhang, S.X. Li, G.Y. Li, Q.Y. Wang, W.J. Hui, Y.Q. Weng // *Materials Science and Engineering: A*. – 2006. – Vol. 427, iss. 1–2. – P. 167–174. – doi: 10.1016/j.msea.2006.04.068.
10. *Явойский В.И., Рубенчик Ю.И., Оженко А.П.* Неметаллические включения и свойства стали. – М.: Металлургия, 1980. – 284 с.
11. *Murakami Y.* Metal fatigue: effects of small defects and nonmetallic inclusions. – Amsterdam: Elsevier, 2002. – 369 p. – ISBN 9780080440644.
12. Influence of non-metallic inclusions on the fatigue properties of heavily cold drawn steel wires / K. Lambrighs, I. Verpoest, B. Verlinden, M. Wevers // *Procedia Engineering*. – 2010. – Vol. 2, iss. 1. – P. 173–181. – doi: 10.1016/j.proeng.2010.03.019.
13. *Lankford J.* Initiation and early growth of fatigue cracks in high strength steel // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1977. – Vol. 9, iss. 3. – P. 617–624. – doi: 10.1016/0013-7944(77)90074-1.
14. The fatigue behaviors of zero-inclusion and commercial 42CrMo steels in the super-long fatigue life regime / Z.G. Yang, S.X. Li, J.M. Zhang, J.F. Zhang, G.Y. Li, Z.B. Li, W.J. Hui, Y.Q. Weng // *Acta Materialia*. – 2004. – Vol. 52, iss. 18. – P. 5235–5241. – doi: 10.1016/j.actamat.2004.06.031.
15. *Заславский А.Я.* Современные автоматные стали. Состав, включения, свойства. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 205 с. – ISBN 5-696-03332-6.
16. *Шлис Х.И.* Поведение неметаллических включений в стали при кристаллизации и деформации. – М.: Металлургия, 1971. – 125 с.
17. *Финкель В.М.* Физические основы торможения разрушения. – М.: Металлургия, 1977. – 359 с.
18. *Штрель М.А.* Прочность сплавов. Ч. 1. Дефекты решетки. – М.: Металлургия, 1982. – 280 с.
19. *Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н.* Рентгенографический и электронно-оптический анализ. – М.: МИСИС, 2002. – 360 с. – ISBN 5-87623-096-0.
20. *Комяк Н.И., Мясников Ю.Г.* Рентгеновские методы и аппаратура для определения напряжений. – Л.: Машиностроение, 1972. – 87 с.
21. Specific features of the nucleation and growth of fatigue cracks in steel under cyclic dynamic compression / A.I. Popelyukh, P.A. Popelyukh, A.A. Bataev, A.A. Nikulina, A.I. Smirnov // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2016. – Vol. 117, iss. 3. – P. 279–287. – doi: 10.1134/S0031918X1603011X.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (75), April – June 2017, Pages 67–78

### Influence of nonmetallic inclusions on the fracture resistance of steel under fatigue dynamic compression conditions

**Popelyukh A. I.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: aip13@mail.ru  
**Veselov S. V.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: veselov\_s@inbox.ru  
**Munkueva D. D.**<sup>1</sup>, Master's Degree student, e-mail: 19darima94@mail.ru  
**Timonin V. V.**<sup>2</sup>, Ph.D. (Engineering), Head of Laboratory, e-mail: timonin2005@ngs.ru  
**Karpov V. N.**<sup>2</sup>, Researcher, e-mail: kvn184@yandex.ru

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

<sup>2</sup>Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the RAS, 54 Krasny ave., Novosibirsk, 630091, Russian Federation

#### Abstract

Impact machines are one of the most productive types of equipment for the rock destruction. They provide high drilling speed but generally have low durability and reliability. Modern researches show that the process of mining machines parts fracture often is initiated by nonmetallic inclusions and internal defects in the structure of steel. However, nowadays the question concerning the degree of the influence of the nonmetallic inclusions morphology, size, shape and distribution on the steel fatigue failure resistance is still not clear. The traditional approach to solving the problem of the inclusions influence on steel properties requires the preparation of a significant number of experimental samples, so mathematical modeling is a promising method for assessing the influence of nonmetallic inclusions. The purpose of the research was to estimate the stresses intensity field near nonmetallic inclusions under



the influence of cyclic compressive stresses and to develop recommendations for the usage of steels with various impurities for the impact machines parts manufacture. The effect of nonmetallic inclusions under dynamic loading conditions was evaluated in several stages. At the initial stage, using the methods of metallographic and microspectral analysis, the size, shape and morphology of nonmetallic inclusions in ten melt of 45 steel were determined. The obtained results were used as input data for the software package ANSYS Workbench 15.0 for calculating the stress field intensity the near inclusions. The reliability of the obtained mathematical models was checked by measuring the internal stresses by the X-ray diffraction analysis with ARL X'TRA diffractometer. Metallographic studies have shown that the main types of inclusions in the steel are point oxides, whose size can reach up to 100 microns and plastic sulphides up to 1 mm in length. The results of numerical simulation show that under dynamic compression conditions an application of the approach in which the inclusion is assumed to be mechanically equivalent to the pore or crack is incorrect. Under the dynamic compression condition near the pores and low-strength inclusions in the base material regions with a high level of local stresses are formed. The maximum value of the equivalent stresses was revealed near the elongated defects in the case of their orientation perpendicular to the action of the external force. Stress distribution near hard and strong oxides inclusions is significantly different. The maximum stresses are localized in the inclusion, while the stress magnitude is insignificant in the boundary region between the inclusion and base material. To verify the reliability of the data of the numerical experiment, XRD analysis was used for zonal stresses measuring. The results of X-ray diffractometry confirm the assumption that under compression conditions the presence of pores in the steel and plastic low-strength inclusions leads to a 50 % increase of local stresses of the main material near the defects. The stress level near the solid high-strength inclusions in the base material is 20 % lower than the average level. The results of the research show that it is desirable to make the details of impact machines using the steels whose structure contains inclusions which hardness exceeds the hardness of the matrix or apply high-purity steels with a low content of nonmetallic inclusions.

### Keywords

steel, impact machines, dynamic compression, nonmetallic inclusions, X-ray diffraction.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-67-78

### References

1. Repin A.A., Smolyanitsky B.N., Alekseev S.E., Popelyukh A.I., Timonin V.V., Karpov V.N. Downhole high-pressure air hammers for open pit mining. *Journal of Mining Science*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 929–937. doi: 10.1134/S1062739114050123.
2. Murakami Y., Nomoto T., Ueda T. Factors influencing the mechanism of super long fatigue failure in steels. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1999, vol. 22, iss. 7, pp. 581–590. doi: 10.1046/j.1460-2695.1999.00187.x.
3. Bergengren Y., Larsson M., Melander A. The influence of machining defects and inclusions on the fatigue properties of a hardened spring steel. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1995, vol. 18, iss. 10, pp. 1071–1087. doi: 10.1111/j.1460-2695.1995.tb00840.x.
4. Zhang J.M., Zhang J.F., Yang Z.G., Li G.Y., Yao G., Li S.X., Hui W.J., Weng Y.Q. Estimation of maximum inclusion size and fatigue strength in high-strength ADF1 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, vol. 394, iss. 1–2, pp. 126–131. doi: 10.1016/j.msea.2004.11.015.
5. Repin A.A., Alekseev S.E., Popelyukh A.I., Teplykh A.M. Influence of nonmetallic inclusions on endurance of percussive machines. *Journal of Mining Science*, 2011, vol. 47, iss. 6, pp. 798–806. doi: 10.1134/S1062739147060128.
6. Plokhov A.V., Popelyukh A.I., Veselov S.V., Tyurin A.G., Nikulina A.A. *Issledovanie konstruktivnoi prochnosti materialov posle kombinirovannogo uprochneniya i spetsial'nykh vidov svarki* [Research into structural strength of materials after combined hardening and special kinds of welding]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2015. 392 p. ISBN 978-5-7782-2635-7.
7. Zhang J.M., Li S.X., Yang Z.G., Li G.Y., Hui W.J., Weng Y.Q. Influence of inclusion size on fatigue behavior of high strength steels in the gigacycle fatigue regime. *International Journal of Fatigue*, 2007, vol. 29, iss. 4, pp. 765–771. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2006.06.004.
8. Dominguez G.M.A. Prediction of very high cycle fatigue failure for high strength steels based on the inclusion geometrical properties. *Mechanics of Materials*, 2008, vol. 40, iss. 8, pp. 636–640. doi: 10.1016/j.mechmat.2008.03.001.
9. Yang Z.G., Zhang J.M., Li S.X., Li G.Y., Wang Q.Y., Hui W.J., Weng Y.Q. On the critical inclusion size of high strength steels under ultra-high cycle fatigue. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, vol. 427, iss. 1–2, pp. 167–174. doi: 10.1016/j.msea.2006.04.068.

10. Yavoiskii V.I., Rubenchik Yu.I., Okenko A.P. *Nemetallicheskie vklyucheniya i svoistva stali* [Nonmetallic inclusions and properties of steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 284 p.
11. Murakami Y. *Metal fatigue: effects of small defects and nonmetallic inclusions*. Amsterdam, Elsevier, 2002. 384 p. ISBN 9780080440644.
12. Lambrihgs K., Verpoest I., Verlinden B., Wevers M. Influence of non-metallic inclusions on the fatigue properties of heavily cold drawn steel wire. *Procedia Engineering*, 2010, vol. 2, iss. 1, pp. 173–181. doi: 10.1016/j.proeng.2010.03.019.
13. Lankford J. Initiation and early growth of fatigue cracks in high strength steel. *Engineering Fracture Mechanics*, 1977, vol. 9, iss. 3, pp. 617–624. doi: 10.1016/0013-7944(77)90074-1.
14. Yang Z.G., Li S.X., Zhang J.M., Zhang J.F., Li G.Y., Li Z.B., Hui W.J., Weng Y.Q. The fatigue behaviors of zero-inclusion and commercial 42CrMo steels in the super-long fatigue life regime. *Acta Materialia*, 2004, vol. 52, iss. 18, pp. 5235–5241. doi: 10.1016/j.actamat.2004.06.031.
15. Zaslavskii A.Ya. *Sovremennye avtomatnye stali. Sostav, vklyucheniya, svoistva* [Modern automatic steel. Composition, inclusions, properties]. Chelyabinsk, SuSTU Publ., 2005. 205 p. ISBN 5-696-03332-6.
16. Spies H.-J. *Verhalten von nichtmetallischen Einschlüssen im Stahl bei der Erstarrung und Umformung*. Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1968 (Russ. ed.: Shpis Kh.I. *Povedenie nemetallicheskih vklyuchenii v stali pri kristallizatsii i deformatsii*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971. 125 p.).
17. Finkel V.M. *Fizicheskie osnovy tormozheniya razrusheniya* [Physical basis of inhibition of fracture]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 359 p.
18. Shtremel' M.A. *Prochnost' spлавov*. Ch. 1. *Defekty reshetki* [Strength of alloys. Pt. 1. Lattice defects]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 280 p.
19. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. *Rentgenograficheskii i elektronno-opticheskii analiz* [X-ray and electron-optical analysis]. Moscow, MISIS Publ., 2002. 360 p. ISBN 5-87623-096-0.
20. Komyak N.I., Myasnikov Yu.G. *Rentgenovskie metody i apparatura dlya opredeleniya napryazhenii* [X-ray methods and equipment for determining stresses]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 87 p.
21. Popelyukh A.I., Popelyukh P.A., Bataev A.A., Nikulina A.A., Smirnov A.I. Specific features of the nucleation and growth of fatigue cracks in steel under cyclic dynamic compression. *The Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, iss. 3, pp. 279–287. doi: 10.1134/S0031918X1603011X.

#### Article history

Received 10 March 2017

Revised 10 April 2017

Accepted 10 May 2017

## 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 во введении 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 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 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; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

### **6.2. Результаты экспериментов**

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

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

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

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

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

## **7. Обсуждение**

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



## **8. Выводы**

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

## **9. Список литературы**

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

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

***В.Г. Атапин, В.Ю. Скиба,  
Редакционный совет и редакция журнала  
«Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)»***

## ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

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

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

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

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

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

### Пример авторского резюме на русском языке

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

### Это же авторское резюме на английском языке

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

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

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

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

**Results:** As an approach of noninvasive functional imaging, quantitative magnetic resonance spectroscopic imaging (MRSI) measured abnormalities of mitochondrial and energetic dysfunction (via  $^1\text{H}$  or  $^{31}\text{P}$  spectroscopy) are related to several pathophysiologic indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative  $^{13}\text{C}$ -glucose turnover studies show a profound decrease in neurotransmitter (glutamate-glutamine) cycling relative to oxidation in the sclerotic hippocampus. Increased extracellular glutamate (which has long been associated with increased seizure likelihood) is significantly linked with declining energetics as measured by  $^{31}\text{P}$ MR, as well as with increased EEG measures of Teager energy, further arguing for a direct role of glutamate with hyperexcitability.

**Discussion:** Given the important contribution that metabolic performance makes toward excitability in brain, it is not surprising that numerous aspects of mitochondrial and energetic state link significantly with electrophysiologic and microdialysis measures in human epilepsy. This may be of particular relevance with the self-propagating nature of mitochondrial injury, but may also help define the conditions for which interventions may be developed. © 2008 International League Against Epilepsy.

### Фрагменты из рекомендаций авторам журналов издательства Emerald

Авторское резюме (реферат, abstract) является кратким резюме большей по объему работы, имеющей научный характер, которое публикуется в отрыве от основного текста и, следовательно, само по себе должно быть понятным без ссылки на саму публикацию. Оно должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Авторское резюме выполняет функцию справочного инструмента (для библиотеки, реферативной службы), позволяющего читателю понять, следует ли ему читать или не читать полный текст.

Авторское резюме включает следующее.

1. Цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью.

2. Кратко излагая основные факты работы, помните следующие моменты:

- следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;
- не включать несущественные детали;

– вы пишете для компетентной аудитории, поэтому можете использовать техническую (специальную) терминологию вашей дисциплины, четко излагая свое мнение, а также имейте в виду, что вы пишете для международной аудитории;

– текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т. д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.), либо разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать один из другого;

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

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

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

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

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



## 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 всех 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. 137 ВЦ, зам. гл. редактора 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*. Формат оригиналов – А4. 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.

**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].

#### 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 повторов, 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:** 15–25 наименований источников (оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.05–2008 «Библиографическая ссылка»), не более 30 % собственных статей, не менее 50 % – литература за последние 10 лет, обязательно включайте иностранные источники (желательно не менее 50 %). Если работа была издана и на русском, и на английском (или других) языках, то в **Списке литературы** и в **References** лучше давать ссылку на переводную работу.

**9. Англоязычный блок статьи** подготавливается на следующей странице, сразу же после русскоязычного списка литературы. Правила оформления данного раздела работы представлены ниже.

**10. Сведения для РИНЦ.**

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ АНГЛОЯЗЫЧНОГО БЛОКА СТАТЬИ

Обращаем особое внимание наших авторов, что в связи с планируемой подготовкой журнала к включению в международные базы данных библиографического описания и научного цитирования *Web of Science* и *Scopus* с 2014 г. существенно изменены правила оформления представляемых рукописей. Главная цель изменений состоит в том, чтобы сделать основные положения и выводы публикуемых в журнале статей доступными для широкой зарубежной аудитории, не владеющей русским языком. Особое значение теперь приобретают англоязычная аннотация к статье (*Abstract*) и список использованной автором литературы (*References*), поскольку именно они, а не текст самой статьи находят отражение в системах *Scopus* и *Web of Science*. По своему содержанию и информативности *Abstract* и *References* должны привлечь внимание зарубежных читателей к теме статьи. Соответственно в интересах автора со всей ответственностью подойти к подготовке этих блоков статьи и обеспечить их максимально высокое качество.

**Англоязычная часть статьи должна включать в себя:**

**заголовок (Title)**, переведенный с русского языка. В переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен и других объектов, имеющих собственные названия; также не используется непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это также касается авторских аннотаций и ключевых слов;

**аффилиация (Affiliation)**. Для каждого автора указывается: *Фамилия* и первые буквы *Имени* и *Отчества, степень, звание, должность, адрес электронной почты (e-mail)*, адресные данные [*официальное название организации на английском языке, которую он представляет, полный почтовый адрес организации (включая название улицы, город, почтовый индекс, страна)*]. Для указания степени, звания и должности можно воспользоваться справочными материалами, представленными на сайте журнала: [http://journals.nstu.ru/files/2\\_4/affiliation.doc](http://journals.nstu.ru/files/2_4/affiliation.doc);

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

**ключевые слова (Keywords);**

**список литературы (References)**. Ссылки на источники в англоязычном списке должны совпадать со ссылками, представленными в русскоязычном списке использованной литературы.

Список **всей** использованной в статье литературы дается на **латинице** (источники на англ., фр., нем. и других языках – в оригинале, русскоязычные источники необходимо транслитерировать и переводить (правила оформления см. ниже)). Для автоматической транслитерации в латиницу рекомендуется обращаться на сайт <http://translit.ru> (стандарт транслитерации – **BSI**; настройка перед транслитерацией).

**Информация об источниках финансирования исследования (Funding)** (гранты, если необходимо).

**Внимание!** Авторам запрещается предоставлять переводы заголовков статей, аннотаций, ключевых слов и информации об источниках финансирования, подготовленные с помощью электронных переводных систем (работы с ошибками и некорректным переводом будут отклонены).

### ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ В АНГЛОЯЗЫЧНОМ БЛОКЕ СТАТЬИ\*

Списки литературы в российских журналах включают в себя большое разнообразие русскоязычных источников: журналы, материалы конференций, сборники, монографии, патенты, диссертации, отчеты, законы, постановления и пр. Поэтому постоянно возникают вопросы, как готовить для *References* описание этих публикаций.

Для подготовки описания этих видов документов необходимо учитывать тот факт, что эти публикации отсутствуют в системе и не предназначены для установления соответствий между публикациями и ссылками на них. Однако они также должны быть обязательно представлены в романском алфавите. Поэтому их описание можно делать достаточно короткими. Исключение составляют переводные книги, в основном монографии.

Если готовить ссылки в *References* с пониманием цели их представления в системе, тогда существует ряд правил, выполняя которые можно получить максимальное число связанных с публикациями ссылок в журнале. К таким правилам можно отнести следующее:

1) представлять в *References* вместо русскоязычного варианта описания журнала описание его переводной версии, которая, скорее всего, будет или уже представлена в *Scopus*;

2) так как известно, что описания включаемых в зарубежные индексы цитирования и другие базы данных публикаций даются по их англоязычному блоку, то в самом идеальном случае в *References* можно включать переводное название статьи в том виде, как оно указано в журнале (и потом – в базе данных). В таком случае транслитерация заглавия статьи не требуется, но указывается в скобках после ее описания язык публикации (**in Russian**);

3) представлять в *References* вместо переводного издания книги (монографии) описание оригинальной ее версии, так как индексы цитирования все больше включают книг в свои ресурсы, в т.ч. *Scopus*. Переводная версия может быть описана так же, как дополнительные сведения (в скобках), см. пример ниже;

4) представление в *References* только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо, так как делает такое описание совершенно нечитаемым (еще как-то понятным для русскоязычного читателя, но не понятным по содержанию больше никому). Поэтому, если нужно сократить описание, то лучше приводить его переводное описание с указанием в скобках (**in Russian**). Это в большей степени относится к анонимным (не авторским) произведениям: законодательным, нормативным документам, а также к патентам, диссертациям, отчетам и другим нетипичным для индексов цитирования документам;

5) при описании изданий без авторов (сборников, коллективных монографий) допускается вместо авторов писать одного, максимум двух редакторов издания;

6) для неопубликованных документов можно делать самое короткое название с указанием в скобках (**unpublished**), если оно имеет авторство (для учета ссылок автора), либо просто “**Unpublished Source**” или “**Unpublished Report**” и т. д., если авторство в документе отсутствует;

7) так как русскоязычные источники трудно идентифицируются зарубежными специалистами, рекомендуется в описаниях оригинальное название источника выделять курсивом, как в большинстве зарубежных стандартов;

8) если описываемая публикация имеет doi, его обязательно надо указывать в библиографии в *References*, так как этот идентификатор является наиболее точным источником информации о статье и по нему производится связка “ссылка – публикация”;

9) нежелательно в ссылках делать произвольные сокращения названий источников. Это часто приводит к потере связки, так как название может быть не идентифицировано;

\* По материалам работ О. В. Кирилловой: 1. Редакционная подготовка научных журналов для включения в зарубежные индексы цитирования: методические рекомендации. – М., 2012. – 68 с.; 2. Редакционная подготовка научных журналов по международным стандартам. Рекомендации эксперта БД Scopus. – М., 2013. – Ч. 1. – 90 с.

10) все основные выходные издательские сведения (в описаниях журнала: обозначение тома, номера, страниц; в описаниях книг: место издания – город, обозначение издательства (кроме собственного непереводного имени издательства, оно транслитерируется)) должны быть представлены на английском языке;

11) в описаниях русскоязычных учебников, учебных пособий не надо указывать тип изданий. Эта информация в ссылках в данном случае является избыточной;

12) в выходных данных публикаций в ссылках (статей, книг) необходимо указывать количество страниц публикации: диапазон страниц в издании указывается “**pp.**” перед страницами; количество страниц в полном издании (книге) указывается как “**p.**” после указания количества страниц;

13) перевод заглавия статьи или источника берется в квадратные скобки; иногда используются круглые скобки, однако если квадратные скобки используются редко для других целей в описаниях изданий, то круглые скобки могут иметь другое предназначение, поэтому их использование может вызвать путаницу в описаниях;

14) одна публикация описывается в списке литературы один раз, независимо от того, сколько раз в тексте публикации был упомянут источник;

15) если книга в списке литературы (в любом варианте – основном или в *References*) описывается полностью, тогда в библиографии должен быть указан полный объем издания, независимо от того, какие страницы издания были процитированы в тексте; исключения составляют случаи, когда используются отдельные главы из книги; в этом варианте в списке литературы дается описание главы, с указанием страниц “от-до”;

16) использовать системы автоматического перевода кириллицы в романский алфавит; не делать транслитерацию вручную. Это позволит избежать ошибок транслитерации.

Для транслитерации русских слов целесообразно использование сайта: <http://translit.net/>

Нужно войти в программу **Translit.net**, включить русский язык, выбрать вариант стандарта транслитерации **BSI (British Standard Institute)**, вставить в нужное поле текст ссылки на русском языке и нажать «**в транслит**».

Последние два пункта «правил» относятся к процессу составления библиографий в целом. Ниже приведены примеры ссылок на различные виды публикаций.

## ПРИМЕРЫ ССЫЛОК

### Описание статьи из журналов:

Atapin V.G., Skeebea V.Yu. Chislennoe modelirovanie beskarkasnykh arochnykh pokrytii [Numerical simulation of frameless arched covers]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2012, no. 4(57), pp. 23–27.

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

### Описание статьи из электронного журнала:

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B.P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 1999, vol. 5, no. 2. Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (Accessed 28 April 2011).

### Если статья имеет DOI – обязательно указать его!

### Описание статьи с DOI:

Abul'khanov S.R., Goryainov D.S., Skuratov D.L., Shvetsov A.N. Formation of the surface layer in diamond smoothing. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, iss. 2, pp. 147–149. doi: 10.3103/S1068798X15020033

Ding H.T., Shin Y.C. Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, iss. 1, pp. 106–114. doi:10.1016/j.ijmachtools.2009.09.001

### Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. [Experimental study of the strength of joints “steelcomposite”]. *Trudy MGTU «Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem»* [Proceedings of the Bauman MSTU “Mathematical Modeling of Complex Technical Systems”], 2006, no. 593, pp. 125–130. (In Russian)



### Описание материалов конференций:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi"* [Proceedings 6th International Symposium "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"]. Moscow, 2007, pp. 267–272. (In Russian).

**Нежелательно оставлять только переводное название конференции, так как оно при попытке кем-либо найти эти материалы, идентифицируется с большим трудом.**

Sen'kin A.V. [Issues of vibration diagnostics of elastic spacecraft]. *Problemy teorii i praktiki v inzhenernykh issledovaniyakh. Trudy 33 nauchnoi konferentsii RUDN* [Problems of the Theory and Practice of Engineering Research. Proc. Russ. Univ. People's Friendship 33<sup>rd</sup> Sci. Conf.]. Moscow, 1997, pp. 223–225. (In Russian)

### Описание книги (монографии, сборники):

Nenashev M.F. *Poslednee pravitel'stvo SSSR* [Last government of the USSR]. Moscow, Krom Publ., 1993. 221 p.  
*Ot katastrofy k vozrozhdeniyu: prichiny i posledstviya razrusheniya SSSR* [From disaster to rebirth: the causes and consequences of the destruction of the Soviet Union]. Moscow, HSE Publ., 1999. 381 p.

Lindorf L.S., Mamikonians L.G., eds. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 352 p.

Kanevskaya R.D. *Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdenii uglevodorodov* [Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbon deposit development]. Izhevsk, 2002. 140 p.

Izvekov V.I., Serikhin N.A., Abramov A.I. *Proektirovanie turbogeneratorov* [Design of turbo-generators]. Moscow, MEI Publ., 2005, 440 p.

Latyshhev V.N. *Tribologiya rezaniya. Kn. 1: Friksionnye protsessy pri rezanii metallov* [Tribology of Cutting, Vol. 1: Frictional Processes in Metal Cutting], Ivanovo, Ivanovskii Gos. Univ. Publ., 2009. 245 p.

Belousov, A.I., Bobrik, P.I., Rakhman\_Zade, A.Z. *Teplovye yavleniya i obrabatyvaemost' rezaniem aviatsionnykh materialov. Trudy MATI* [Thermal Phenomena and the Ease of Cutting of Aviation Materials: Proceedings of the Moscow Aviation Engineering Institute]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966, no. 64.

Последняя ссылка является неполной. Из нее непонятно, описывается ли книга в целом (монография), выпущенная в серии трудов института, или это статья (в описании без заглавия статьи). Недостает в этом случае указания страниц. Если монография, тогда указывается, сколько всего страниц (235 p.), если статья – диапазон страниц или одна страница (pp. 220–222). Однако в любом случае эта ссылка будет найдена при поиске публикаций авторов.

### Описание переводной книги:

Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. *Vibration problems in engineering*. 4<sup>th</sup> ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. *Kolebaniya v inzhenernom dele*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.).

Brooking A., Jones P., Cox F. *Expert systems. Principles and case studies*. Chapman and Hall, 1984. 231 p. (Russ. ed.: Bruking A., Dzhons P., Koks F. *Ekspertnye sistemy. Printsipy raboty i primery*. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1987. 224 p.).

Если можно выявить оригинал, по которому был сделан перевод книги, тогда полезно описать его как основное название вместо переводного. Такой вариант описания позволяет найти публикации авторов в действительном представлении их фамилий в отличие от переводной версии (по всем правилам при переводе описания в латиницу фамилии авторов транслитерируются, что значительно искажает его настоящее написание, – пример выше это хорошо демонстрирует).

Когда не удастся выявить сведения об оригинальной версии книги либо переводная версия является, например, сборником из нескольких зарубежных изданий, в основном описании остается переводное издание.

### Описание неопубликованного документа:

Latypov A.R., Khasanov M.M., Baikov V.A. *Geology and Production (NGT GiD). The Certificate on official registration of the computer program. No. 2004611198, 2004.* (In Russian, unpublished).

Pressure generator GD-2M. Technical description and user manual. Zagorsk, Res. Inst. of Appl. Chem. Publ., 1975. 15 p. (In Russian, unpublished).

**Описание Интернет-ресурса:**

Kondrat'ev V.B. *Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost'* [The global pharmaceutical industry]. Available at: [http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja\\_farmacevticheskaja\\_promyshlennost\\_2011-07-18.html](http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmacevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html). (accessed 23.06.2013)

APA Style (2011). Available at: <http://www.apastyle.org/apa-style-help.aspx> (accessed 05.02.2011).

**Описание диссертации или автореферата диссертации:**

Semenov V.I. *Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyi tor*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

Grigor'ev Iu.A. *Razrabotka nauchnykh osnov proektirovaniia arkhitektury raspredelennykh sistem obrabotki dannykh*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development of scientific bases of architectural design of distributed data processing systems. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1996. 243 p.

**Описание ГОСТа:**

GOST 8.586.5-2005. *Metodika vypolneniia izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkosti i gazov spomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroystv* [State Standard 8.586.5 - 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

**или**

State Standard 8.586.5-2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p. (In Russian)

**Описание патента:**

Palkin M.V., et al. *Sposob orientirovaniia po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoi golovkoi samonavedeniia* [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF, no. 2280590, 2006.

В описании не все авторы, как дано в основном списке литературы. Если работать с *References* добросовестно, тогда можно найти патент и дополнить список авторов.

**Описание авторского свидетельства (Inventor's Certificate)** – аналогично.

**Описание анонимных документов:**

Russian Pharmaceutical Market. Results of 2010. The Analytical Review. DSM Group, 2011. 74 p. (In Russian)

Current status of the Russian pharmaceutical industry and international experience. Materials for the working group of the Commission for Modernization and Technological Development of Russia's Economy. Available at: <http://www.strategy.ru>. (In Russian)

Code of Business Conduct of OJSC "LUKOIL". Available at: [http://www.lukoil.ru/materials/doc/documents/lukoil\\_corp\\_code.pdf](http://www.lukoil.ru/materials/doc/documents/lukoil_corp_code.pdf). (In Russian)

RF Federal Law "On Protection of Consumers' Rights" of February 07, 1992 N 2300-1 (as amended by Federal Law of January 09, 1996 N 2 FZ, December 17, 1999 N 212 FZ). (In Russian)

## 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 (15–25 наименований, не более 30 % ссылок на свои публикации)

<Англоязычный блок статьи (с новой страницы)>

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

Ivanov V.G.<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: metal\_working@mail.ru  
Petrov V.S.<sup>2</sup>, Ph.D. student, e-mail: petrov\_v@mail.ru

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation  
<sup>2</sup>I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

**Abstract** (не менее 250 слов)

**Keywords**

**References**

**Funding**

---

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

## Пример оформления сведений для РИНЦ

УДК 621.9.06:518.4

### Выбор конструктивных параметров базовых деталей на этапе проектирования

<sup>1</sup>Иванов Владимир Григорьевич, <sup>2</sup>Петров Виктор Сергеевич, ... (Ф.И.О. указывается полностью и для всех соавторов!)

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

<sup>2</sup>Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, г. Барнаул, 656038, Россия

Иванов В.Г. e-mail: metal\_working@mail.ru

Петров В.С. e-mail: petrov\_v@mail.ru

#### 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...

#### Список литературы

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.  
(15–25 наименований)

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

<sup>1</sup>Ivanov V.G., <sup>2</sup>Petrov V.S., ...

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

<sup>2</sup>I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

#### Abstract

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.



# МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ НГТУ

## Кафедры:

- Инженерной графики (ИГ)
- Материаловедения в машиностроении (ММ)
- Проектирования технологических машин (ПТМ)
- Технологии машиностроения (ТМС)
- Химии и химической технологии (ХХТ)

## Научная деятельность:

*выполнение фундаментальных и прикладных исследований в области:*

- создания новых материалов с уникальными свойствами;
- исследования структурных превращений в металлических материалах;
- технологий производства керамики и керамических композитов;
- исследования процесса образования водорода и нановолокнистого углерода каталитическим разложением углеводородов при давлениях выше атмосферного;
- исследования способов модификации углеродных нанотрубок и нановолокон;
- управления качеством поверхностного слоя деталей машин при интеграции поверхностной термической и механической обработки на одном технологическом оборудовании;
- технологий плазменного нанесения покрытий на детали машин;
- разработки технологических процессов лазерной и плазменной резки, поверхностной термообработки, сварки, маркировки, а также электрохимической и ультразвуковой обработки;
- разработки опытных образцов установок и модернизации существующего оборудования электрофизических методов обработки.

## Производственная деятельность:

- содействие в конструкторско-технологической подготовке производства;
- проектирование технологических процессов;
- услуги по плазменной и лазерной резке материалов;
- услуги гибки листового и трубного проката;
- определение механических свойств, химического состава и структуры материалов;
- услуги механической, термической обработки материалов;
- проектирование и изготовление технологического оборудования с подготовкой требуемой конструкторской документации в NX, SolidWorks, AutoCAD, Компас;
- проведение инженерного анализа конструкторских задач и технологических процессов в программных комплексах ANSYS, SYSWELD, APM WinMachine для оптимизации проектных разработок на ранних стадиях;
- услуги плазменного нанесения покрытий на детали машин;
- технологический аудит предприятий;
- установление причин разрушения деталей машин.

## Образовательные услуги:

- курсы повышения квалификации и обучающие семинары для сотрудников предприятий;
- обучение работе на станках с ЧПУ, лазерных и плазменных комплексах.

## Центры, лаборатории:

- Учебный центр современных металлообрабатывающих технологий «DMG-НГТУ».
- Научно-образовательный центр «Сварочные технологии» - «НГТУ- «Kjellberg Finsterwalde».
- Научно-образовательный центр «Нанотехнологии».
- Научно-образовательный центр «Лазерные и плазменные технологии».
- Научно-образовательный центр в области машиностроения «НГТУ-ИТПМ СО РАН».
- Учебно-научная лаборатория «Термическая обработка материалов».
- Учебно-научная лаборатория «Плазменные покрытия».
- Центр прототипирования.

## Адрес:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корп. 5, НГТУ, МТФ, V-278.

Тел./факс: +7 (383) 346-51-92

Сайт факультета: <http://www.mtf.nstu.ru/>

Декан МТФ: к.т.н., доцент Янпольский Василий Васильевич  
e-mail: [mtf@corp.nstu.ru](mailto:mtf@corp.nstu.ru)



## 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. 137 ВЦ, зам. гл. редактора – В. Ю. Скиба.

Тел.: 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 оборудования для металлообработки и сварки Mashex Siberia. По результатам конференции издается сборник материалов конференции.

## Тематика работы конференции:

- Инновационные технологии в машиностроении
- Технологическое оборудование, оснастка и инструменты
- Материаловедение в машиностроении
- Экономика и организация инновационных процессов в машиностроении

## Официальный сайт конференции:

<http://machine-building.conf.nstu.ru/>



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.

