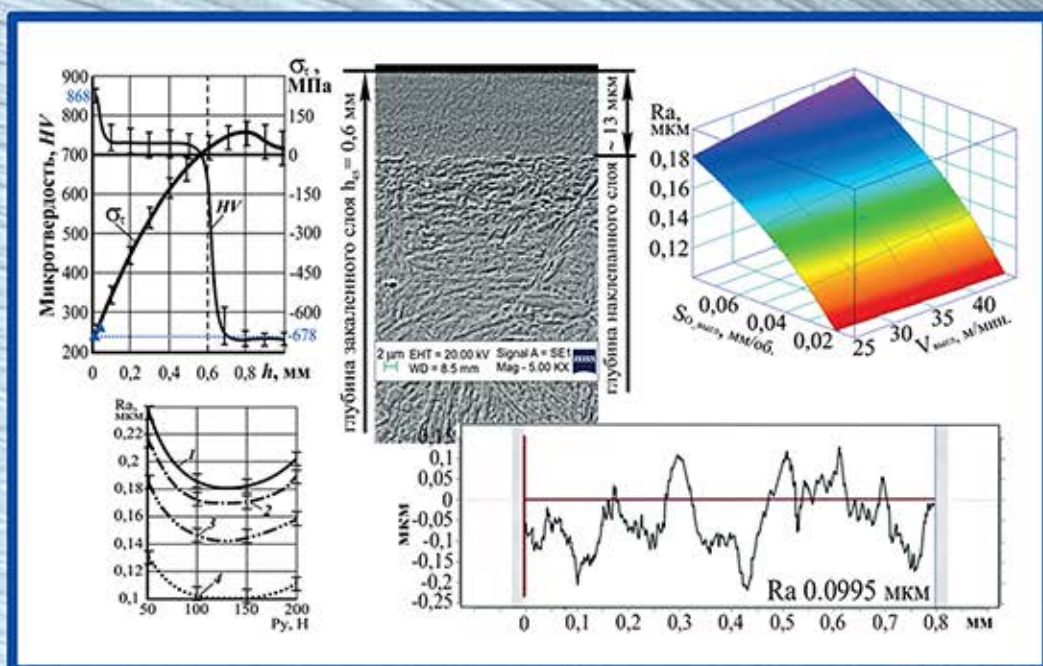


# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ISSN 1994-6309

## ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

№ 3 (68) ИЮЛЬ–СЕНТЯБРЬ 2015 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



Алмазное выглаживание в условиях  
интегрированной обработки

НОВОСИБИРСК

# 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 обработок 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)

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

## ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309

№ 3 (68) ИЮЛЬ–СЕНТЯБРЬ 2015 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

#### Председатель совета

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

#### Члены совета

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

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

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

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

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

Журнал 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 03 июня 2015 г. № 560 (по состоянию на 22.07.2015) 2014 г. № 793, с изменениями, внесенными приказом Минобрнауки России от 03 июня 2015 г. № 560 (по состоянию на 22.07.2015)

#### СОУЧРЕДИТЕЛИ

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

#### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

#### ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

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

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

#### ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

#### ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»

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

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

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

Индекс: **70590** («РОСПЕЧАТЬ»)

#### Адрес редакции:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, к. 274, Атапин В.Г.

Тел. (383) 346-17-77

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

Цена свободная

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

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНОЛОГИЯ

<b>Эдигаров В.Р., Литау Е.В.</b> Финишная антифрикционная электромеханическая обработка деталей.....	6
<b>Рахиянов Х.М., Янпольский В.В., Кадырбаев Р.М.</b> Влияние температуры электролита и катодной плотности тока на качество и толщину гальванического покрытия при восстановлении работоспособности зеркальной поверхности гильз гидроцилиндров.....	16
<b>Ласуков А.А., Громыко П.С.</b> Классификатор маршрутных технологических процессов изготовления деталей геохода.....	23
<b>Скиба В.Ю., Пушнин В.Н., Корнев Д.Ю., Парц К.А.</b> Технологические особенности формирования параметров качества поверхностного слоя при алмазном выглаживании в условиях интегрированной обработки.....	31
<b>Мозговой Н.И., Мозговая Я.Г., Пашков Е.А.</b> Применение акустического метода контроля для деталей из композиционных материалов.....	42
<b>Рахиянов Х.М., Рахиянов А.Х., Рахиянов К.Х.</b> Формирование микрогеометрии реза алюминиевых и медных сплавов при тонкоструйной плазменной резке.....	49
<b>Рахиянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И.</b> Степень локализации процесса при интенсификации анодного растворения меди.....	58

### ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

<b>Алексеев Н.С., Капорин В.А., Иванов С.В.</b> Шлифование микропористых покрытий импрегнированными кругами.....	66
<b>Горелова А.Ю., Кристаль М.Г.</b> Инструмент для обработки глубоких отверстий.....	75

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<b>Сапрыкин А.А., Градобоев А.В., Яковлев В.И., Ибрагимов Е.А., Бабакова Е.В.</b> Сравнение способов активации медного порошка ПМС-1 для синтеза изделий методом SLS.....	82
<b>Пугачева Н.Б., Вичужанин Д.И., Трушина Е.Б., Мичуров Н.С., Черепанов А.Н., Маликов А.Г.</b> Усталостная прочность лазерных сварных швов стали 12Х18Н10Т.....	89
<b>Кукареко В.А.</b> Структурно-фазовое состояние и циклическая долговечность высокохромистой стали 40Х13, обработанной интенсивными потоками ионов азота.....	99
Рекомендации по написанию научной статьи .....	107
Подготовка аннотации .....	110
Правила для авторов .....	113
Правила подготовки списка литературы в англоязычном блоке статьи.....	116

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

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

Подписано в печать 03.09.2015. Выход в свет 15.09.2015. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
 Усл. печ.л. 15,0. Уч.-изд. л. 27,9. Изд. № 172. Заказ 1241. Тираж 300 экз.

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

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

## METAL WORKING and MATERIAL SCIENCE

ISSN 1994-6309

Journal no.3 (68) July–September 2015

### EDITORIAL BOARD

#### EDITOR-IN-CHIEF:

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

#### DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

#### Editor of the English translation:

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

The magazine is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year

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

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

Tel.: (383) 3461777

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

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

## EDITORIAL COUNCIL

## CHAIRMAN:

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

## MEMBERS:

*The Federative Republic of Brazil:*

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

*The Federal Republic of Germany:*

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

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

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

*The Republic of Belarus:*

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

*The Ukraine:*

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

*The Russian Federation:*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## CONTENTS

### TECHNOLOGY

<b>Edigarov V.R., Litau E.V.</b> Parts finishing antifriction electromechanical machining.....	6
<b>Rakhimyanov Kh.M., Yanpolskiy V.V., Kadyrbaev R.M.</b> Electrolyte temperature and cathodic current density effect on galvanic coating quality and thickness during the recovery of the mirror surface of hydraulic cylinder barrels.....	16
<b>Lasukov A.A., Gromyko P.S.</b> The classifier of engineering processes of geokhod elements production.....	23
<b>Skeeba V.Yu., Pushnin V.N., Kornev D.Yu., Parts K.A.</b> Technological features of forming the quality characteristics of the surface layer during diamond smoothing in the integrated processing.....	31
<b>Mozgovoy N.I., Mozgovaya Y.G., Pashkova E.A.</b> The use of acoustic control method for parts made of composite materials.....	42
<b>Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov A.Kh., Rakhimyanov K.Kh.</b> Microgeometry formation of the cut during high-precision plasma cutting of aluminum and copper alloys.....	49
<b>Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Vasilevskaya S.I.</b> The degree of the process localization at the intensification of anodic dissolution of copper.....	58

### EQUIPMENT. INSTRUMENTS

<b>Alexeev N.S., Kaparin V.A., Ivanov S.V.</b> Grinding of microporous coatings using impregnated grinding wheels.....	66
<b>Gorelova A. Yu., Kristal M. G.</b> The deep hole boring tool.....	75

### MATERIAL SCIENCE

<b>Saprykin A.A., Gradoboev A.V., Yakovlev V.I., Ibragimov E.A., Babakova E.V.</b> Comparison of activation technologies powder ECP-1 for the synthesis of products using SLS.....	82
<b>Pugacheva N.B., Vichuzhanin D.I., Trushina E.B., Antenorova N.P., Michurov N.S., Orishich A.M., Cherepanov A.N., Malikov A.G.</b> Fatigue strength of steel AISI 321 laser welded seams.....	89
<b>Kukareko V.A.</b> Structural-phase state and cyclic life of high-chromium steel 40Kh13 processed by intense flows of nitrogen ions.....	99
Guidelines for Writing a Scientific Paper .....	107
Abstract requirements .....	110
Rules for authors .....	113
Rules of references in the English part of article.....	116

# ФИНИШНАЯ АНТИФРИКЦИОННАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ

*В.Р. ЭДИГАРОВ, канд. техн. наук, доцент  
Е.В. ЛИТАУ, адъюнкт  
(ОАБИИ, г. Омск)*

Поступила 5 мая 2015

Рецензирование 20 июня 2015

Принята к печати 17 июля 2015

Эдигаров В.Р. – 644098, г. Омск,  
Омский автобронетанковый инженерный институт,  
e-mail: edigarovs@mail.ru

Приведены результаты исследований электромеханической обработки поверхностей стальных деталей трибосистем с предварительным нанесением на поверхность обрабатываемых деталей тонкого антифрикционного слоя из различных твердых смазочных материалов, позволяющих изменить структуру поверхностного слоя, повысить его износостойкость и эксплуатационные характеристики, особенно антифрикционность. Способ обработки с предварительным нанесением антифрикционного материала на поверхность детали с последующей электромеханической обработкой назван АФЭМО. В результате исследований установлено, что АФЭМО позволяет снизить момент трения образцов трибопары. Термодеформационное воздействие в процессе АФЭМО позволяет получить упрочненный поверхностный слой с твердостью до 9 ГПа и участками с твердосмазочным антифрикционным покрытием, что повышает износостойкость и антифрикционные свойства поверхностного слоя деталей, а также коррозионную стойкость. Минимальный момент трения имеют образцы, поверхности которых обработаны АФЭМО с предварительным нанесением антифрикционного материала натиранием поверхности детали и нанесением антифрикционного материала в виде суспензии в смеси с поверхностно-активным веществом (ПАВ). В случае применения натирания для нанесения твердосмазочного материала лучшие результаты показала бронза.

При использовании в качестве антифрикционного материала ультрадисперсного скрытокристаллического графита (СКГ) и дисульфида молибдена в смеси с ПАВ глицерином скорость изнашивания трибосопряжения минимальна в сравнении с применением других твердых смазок и при обработке по традиционной технологии поверхностного упрочнения. Скорость изнашивания деталей после АФЭМО, по сравнению с деталями обработанными по «классической» технологии ЭМО, снижается на 10...20 %. Общая закономерность влияния АФЭМО на микротвердость стальных образцов заключается в изменении степени упрочнения по глубине зондируемого слоя с максимумом микротвердости у поверхности, зависящим главным образом от величины силы тока.

**Ключевые слова:** шероховатость, антифрикционные свойства, электромеханическая обработка, твердая смазка, износостойкость, трибосистема, скрытокристаллический графит, дисульфид молибдена.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-6-15

## Введение

Непрерывно возрастающие требования к качеству выпускаемых машин связаны с необходимостью повышения их надежности, которая в значительной степени определяется эксплуатационными свойствами отдельных деталей.

Эксплуатационные свойства деталей машин существенно зависят от качества поверхностного слоя, определяемого геометрическими (макроотклонения, шероховатость) и физико-механическими (микротвердость, структура, остаточные напряжения) параметрами. Все эти параметры зависят от технологии изготовления деталей, од-



нако традиционные методы обработки часто не позволяют эффективно получать необходимые параметры качества поверхностей. Анализ технологических методов обработки поверхностей деталей машин показывает, что универсальных методов нет, каждый имеет свою конкретную область рационального применения, зачастую достаточно узкую.

Как известно, износостойкость деталей, образующих трибосистему, зависит прежде всего от окончательной (финишной) технологической обработки поверхностей деталей [1]. Имеются обширные экспериментальные исследования по влиянию шероховатости поверхности трения на интенсивность изнашивания деталей. Установлено, что от финишной обработки деталей зависит не только первоначальный (прирабочный) износ, но и установившийся износ, т. е. первоначальная приработка может влиять на интенсивность изнашивания при длительной эксплуатации машин.

В последние годы разработаны новые технологические способы финишной обработки поверхностных слоев деталей, которые позволяют снизить прирабочный износ деталей и повысить антифрикционные свойства сочленения (улучшить смазывание деталей, снизить коэффициент трения). К таким способам можно отнести различные вибрационные способы обработки, хонингование, алмазное выглаживание и другие. Так, например, при хонинговании может обеспечиваться требуемая шероховатость поверхности и определенная направленность выступов неровностей, которые способствуют удержанию смазочного материала на рабочей поверхности. Однако при этом обрабатываемая поверхность в большей или меньшей степени насыщается абразивом от брусков хонеров, которые несмотря на последующие осуществляемые мероприятия остаются на рабочей поверхности и в труднодоступных местах. В период последующей эксплуатации эти частицы попадают в смазку, что приводит к повышенному износу деталей трибосистемы. В этой связи возникает необходимость в методе окончательной обработки деталей, при котором исключена абразивная обработка поверхностей.

Так, для повышения антифрикционных свойств поверхностей в машиностроении и ремонтном производстве широко применяют фи-

нишную антифрикционную безабразивную обработку (ФАБО), для чего поверхность трения детали покрывается тонким слоем (1...2 мкм) меди или ее сплавов путем использования явления переноса металла при трении [1]. ФАБО придает стальным или чугунным поверхностям высокие антифрикционные свойства. Этот способ повышает триботехнические показатели за счет заполнения полостей, устьев микротрещин и углублений микронеровностей присадочным материалом. Однако при таком способе обработки структура поверхностного слоя не изменяется и износостойкость поверхности повышается лишь частично.

Хорошие результаты показало предварительное нанесение на поверхность стальных и чугунных деталей тонкого антифрикционного слоя из различных твердых смазочных материалов с последующей электромеханической обработкой.

Электромеханическая обработка (ЭМО) [2–6, 13–18] является особым способом контактной обработки поверхностей высококонцентрированным источником электрической энергии, объединяющим в единой технологической схеме силовое и термическое воздействие инструмента на деталь, что позволяет формировать уникальные свойства поверхностного слоя деталей. Основными особенностями различных видов ЭМО являются наличие нескольких источников теплоты (основные – электрический ток и трение), локальный нагрев зоны обработки, сопровождающийся действием значительных давлений, кратковременный термический цикл обработки, достаточно высокая скорость охлаждения, а также влияние других технологических факторов. Предварительное нанесение на поверхность обрабатываемых деталей тонкого антифрикционного слоя из различных твердых смазочных материалов перед ЭМО позволяет изменить структуру поверхностного слоя, повысить его износостойкость, эксплуатационные характеристики и особенно антифрикционность [4, 5, 7, 8]. Такой способ обработки можно назвать антифрикционной электромеханической обработкой (АФЭМО).

В качестве твердосмазочного материала, используемого при АФЭМО, могут быть использованы слоистые вещества (структурные твердосмазочные материалы: графит, дихалькогениды тугоплавких металлов (молибдена, вольфрама,

ниобия), гексагональный нитрид бора и др.), антифрикционные покрытия, образованные на рабочих поверхностях в результате химической реакции (сульфиды, фосфаты, высокотемпературные термохимические покрытия на основе молибдена (димолиты) и ниобия), мягкие металлы и их окислы (медь и ее сплавы, свинец, баббиты и др.), полимерные материалы и другие твердые смазки. В случае применения антифрикционных покрытий, образованных на рабочих поверхностях в результате химической реакции полимерных материалов и некоторых других твердых смазок, необходимо обеспечить температурную стойкость наносимого материала в процессе электромеханического сглаживания и исключить образование вторичного абразива в поверхностном слое.

Твердосмазочные материалы могут быть нанесены на обрабатываемые поверхности одним из нижеперечисленных способов: натиранием поверхности, нанесением из суспензии в смеси с поверхностно-активным веществом (ПАВ), нанесение методами газоплазменного распыления, газодинамического напыления, напылением ультразвуковым инструментом, покрытие поверхности со связующим и без него, подачей струей жидкости или газа, нанесением магнитным методом, гальваническим способом, фрикционной наплавкой, напылением в вакууме, термическим разложением паров металлоорганических соединений, ротационным методом и др. [4]. При этом с целью повышения качества предварительного нанесения твердосмазочного материала на поверхность детали поверхность может быть заранее обработана до необходимой шероховатости или ранее выполняемые операции механической обработки могут учитывать последующее нанесение антифрикционного материала одним из вышеперечисленных способов, обеспечив необходимую шероховатость и твердость.

На рис. 1 представлена поэтапно схема АФЭМО. На поверхность с исходной шероховатостью (рис. 1, а), получаемой на предыдущих этапах механической обработки, которая может быть поставлена в зависимость от наносимого твердосмазочного материала и технологии его нанесения, наносят твердосмазочный материал, например, принудительным трением о поверхность детали [7]. Получается поверхность,

состоящая из основного материала 1 и антифрикционного слоя 2, частицы которого располагаются во впадинах исходного профиля (рис. 1, б). При последующей электромеханической обработке в месте контакта обрабатываемого инструмента с деталью происходит деформация и местный нагрев поверхности выше температуры фазового превращения, что приводит к смятию микронеровностей с одновременным заполнением полостей, устьев микротрещин и углублений твердосмазочным антифрикционным материалом (рис. 1, в) и образованием «белого» слоя высокой твердости 3 [9, 10]. На рис. 1, в представлена поэтапно схема АФЭМО с нанесением антифрикционного слоя 4 из суспензии в смеси с ПАВ [8, 10], возможно, на заранее подготовленную поверхность 1, например, обработанную предварительно электромеханической обработкой инструментом с малым углом при вершине. Предварительная обработка позволяет получить регулярный микрорельеф с определенными характеристиками, способствующими улучшению качества и производительности процесса нанесения антифрикционного материала. Последующая ЭМО формирует поверхность с требуемыми, наперед заданными антифрикционными характеристиками, впадины которой заполнены твердосмазочным антифрикционным материалом 4 (рис. 1, д), продукты деструкции которого остаются на обрабатываемой поверхности и способствуют повышению антифрикционных свойств, кроме того, за счет термомеханического воздействия образуется «белый» слой 3 большой твердости.

В процессе работы трибосистемы находящаяся во впадинах суспензия твердосмазочного материала за счет нагрева и последующего расширения заполняет пространство между трущимися деталями, обеспечивая их смазку, в эти же полости может попадать и дополнительная смазка, подаваемая к трущимся деталям, действие которой аналогично.

Комбинированное воздействие в процессе АФЭМО позволяет получить поверхность, состоящую из упрочненного слоя с твердостью до 9 ГПа (белый слой 3 (рис. 1, в и 1, д)) и участками с твердосмазочным покрытием, что повышает антифрикционные свойства поверхностного слоя деталей, а также коррозионную стойкость.

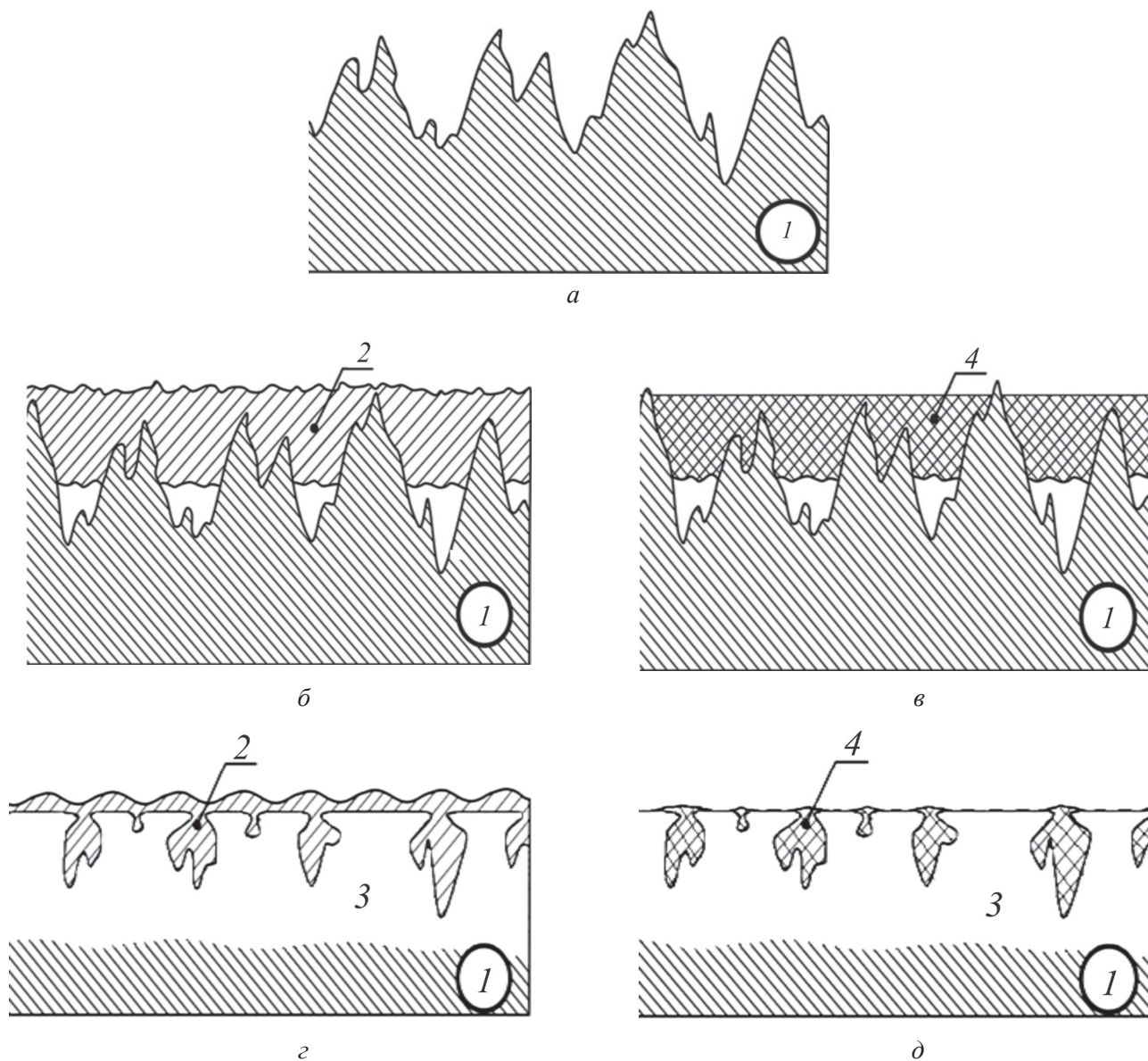


Рис. 1. Схемы нанесения антифрикционного материала с последующей ЭМО:

*a* – исходная поверхность; *б* – поверхность после натирания антифрикционным металлом; *в* – поверхность с нанесенной суспензией антифрикционной смеси на основе ПАВ; *г* – поверхность (*б*) после ЭМО; *д* – поверхность (*в*) после ЭМО

## Методика

### экспериментального исследования

Для исследования эффективности АФЭМО использовали образцы из сталей 45, 38ХС, 40Х, как наиболее распространенные в узлах ходовой части многоцелевых гусеничных и колесных машин (МГКМ). В качестве твердосмазочного материала для нанесения на поверхность детали натиранием использовали медь МЗ, бронзу БрОЦС -3-5-5 и латунь Л-62. Для нанесения суспензии твердосмазочного материала в смеси с ПАВ использованы мелкодисперсные порошки скрытокристаллического графита (СКГ),

дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ ), меди МЗ, оловянисто-свинцовистой бронзы Бр. ОФ4-0,25 и их смеси в различных пропорциях с поверхностно-активным веществом (ПАВ) – глицерином.

Высокопроизводительный инструмент для АФЭМО, позволяющий одновременно предварительно создавать необходимый регулярный микрорельеф на поверхности детали электро-механической обработкой инструментом с малым углом при вершине, наносить твердосмазочный материал натиранием и проводить электро-механическое сглаживание твердосплавным инструментом [11] представлен на рис. 2.

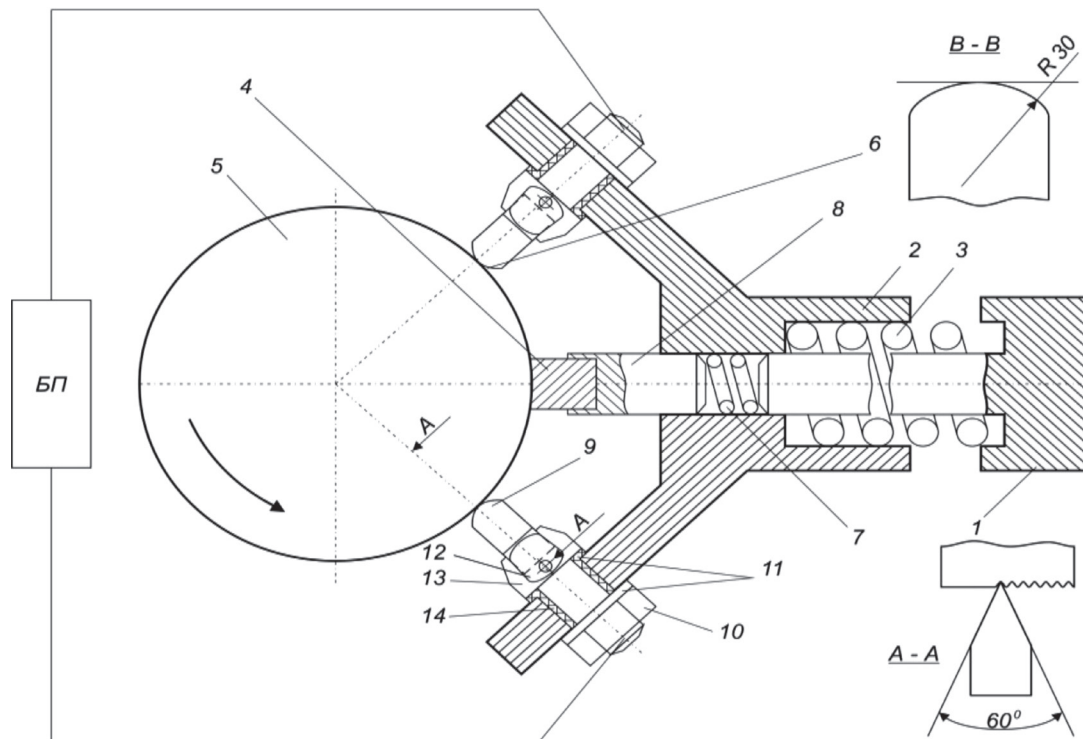


Рис. 2. Инструмент для АФЭМО натиранием твердосмазочного материала

### Результаты и обсуждение

В случае применения натирания для нанесения твердосмазочного материала лучшие результаты показала бронза. При использовании меди наблюдаются схватывания, что связано с высокой ее пластичностью. Анализ зависимостей скорости изнашивания образцов, обработанных

АФЭМО нанесением суспензии твердосмазочного материала в смеси с ПАВ, имеет характерный идентичный для всех твердосмазочных материалов характер (рис. 3), наилучшие результаты показали образцы, обработанные АФЭМО со скрытокристаллическим графитом (СКГ) и дисульфидом молибдена (кривые 1 и 2 соответственно). Скорость изнашивания у образцов,

поверхность которых обработана в присутствии меди (кривая 3), примерно в три раза выше, чем у образцов, обработанных с СКГ, в случае использования бронзы (кривая 4) в 3,5 раза выше, у образцов, обработанных закалкой ТВЧ (кривая 5), в 5 раз выше.

В процессе проведения АФЭМО проводилось исследование влияния технологических режимов обработки (скорости обработки, усилия прижатия инструмента к обрабатываемой поверхности, давления антифрикционного материала на натираемую поверхность, в случае натирания, величины электрического тока) на перенос и сцепление с поверхно-

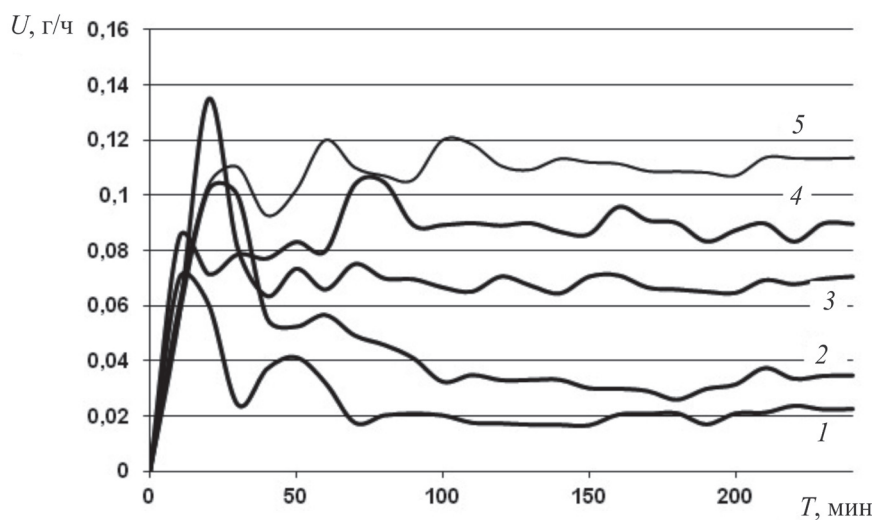


Рис. 3. Результаты сравнительных испытаний на износ, частичный вкладыш бронза Бр АЖ-9-4 и ролик сталь 40Х, обработанный АФЭМО с нанесением суспензии различных твердосмазочных материалов в смеси с ПАВ:

1 – графит СКГ; 2 – дисульфид молибдена; 3 – медь; 4 – бронза; 5 – закалка ТВЧ

стью детали твердосплавного материала, получаемые при этом шероховатость и микротвердость. Наилучшие результаты получены на следующих режимах:

а) для нанесения твердосмазочного материала в смеси с ПАВ  $I = 500 \dots 600$  А,  $V = 8 \dots 10$  м/с,  $P = 400 \dots 600$  Н (усилие прижатия инструмента);

б) для натирания  $I = 600 \dots 650$  А,  $V = 1,4 \dots 2$  м/с,  $P = 400 \dots 600$  Н (усилие прижатия инструмента),  $p = 10 \dots 20$  Па (давление антифрикционного материала), подача антифрикционного материала  $s = 0,05 \dots 1$  мм/об, при исходной шероховатости поверхности Ra 2,5...6,3.

Для определения антифрикционных свойств поверхностных слоев деталей машин, обработанных АФЭМО, были изготовлены шесть партий роликов из стали 40Х. Первую партию образцов не подвергали дополнительному упрочнению. Вторую партию упрочняли объемной закалкой в воде с последующим низким отпуском. Третью партию образцов упрочняли закалкой ТВЧ, четвертую – электрохимической обработкой. Пятую партию обрабатывали АФЭМО с натиранием твердосмазочного материала на обрабатываемую поверхность, а шестую партию образцов обрабатывали АФЭМО с нанесением суспензии твердосмазочного материала в смеси с ПАВ.

После предварительного взвешивания образцы подвергали испытаниям на износ по схеме трения ролик – частичный вкладыш со смазкой маслом М-8В SAE 20W-20 ТУ-0253-052-04001396-02 на машине трения МТ-393 в соответствии с требованиями РД 50-662-88. Частичный вкладыш изготавливался из нормализованной стали 45. Время испытания составляло 90 мин, частота вращения роликов –  $500 \text{ мин}^{-1}$ , нагрузка на колодку – 650 Н.

Анализ динамики изменения момента трения по результатам проведенных испытаний (рис. 4) показал, что ролики, обработанные АФЭМО, работающие в паре со стальным контртелом, показывают наименьший мо-

мент трения, причем образцы, обработанные АФЭМО с нанесением суспензии твердосмазочного материала в смеси с ПАВ, имеют минимальный момент трения в период приработки в сравнении с другими трибопарами. Это объясняется наличием на поверхности трения продуктов деструкции твердосмазочного материала, а также остатков самого ПАВ после АФЭМО, способствующих снижению момента трения в трибосопряжении [12].

Это говорит о более высоких антифрикционных свойствах поверхностей, полученных после АФЭМО, что обеспечивает более низкую скорость изнашивания образцов по сравнению с другими способами обработки образцов (рис. 5).

Испытания втулок, изготовленных из стали 40Х, на износ производились в паре с чугунными частичными вкладышами, при нагрузке на вкладыш в 800 Н и частоте вращения роликов  $500 \text{ мин}^{-1}$  (рис. 6).

Сравнительный анализ износостойкости поверхностей образцов после различных методов упрочнения показал:

– увеличение твердости образца объемной закалкой с отпуском повышает износостойкость поверхности примерно в 1,3...1,35 раза в сравнении с неупрочненными образцами, при этом износостойкость частичного вкладыша увеличивается примерно в 2,1...2,3 раза;

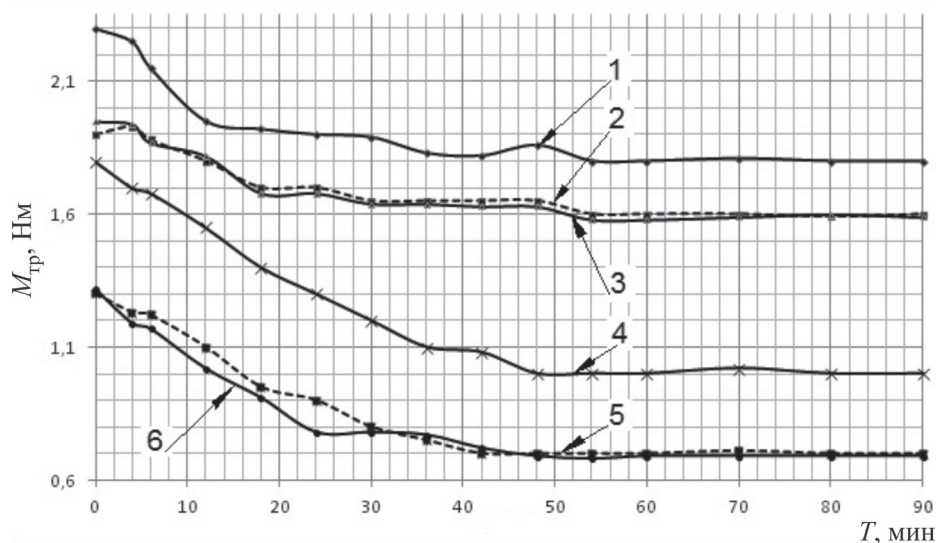


Рис. 4. Зависимость момента трения от времени приработки, образцы: 1 – без упрочнения; 2 – закалка с низким отпуском; 3 – закалка ТВЧ; 4 – ЭМО; 5 – АФЭМО с натиранием твердосмазочного материала на обрабатываемую поверхность; 6 – АФЭМО с нанесением суспензии твердосмазочного материала в смеси с ПАВ (СКГ)

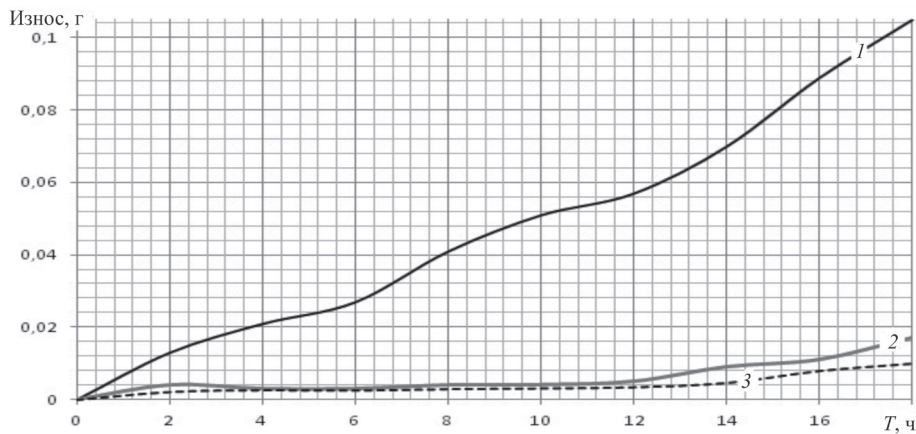


Рис. 5. Результаты сравнительных испытаний на износ (образцы – сталь 40X в паре с чугунными частичными вкладышами):

1 – образцы без поверхностного упрочнения; 2 – образцы после ЭМО; 3 – образцы после АФЭМО

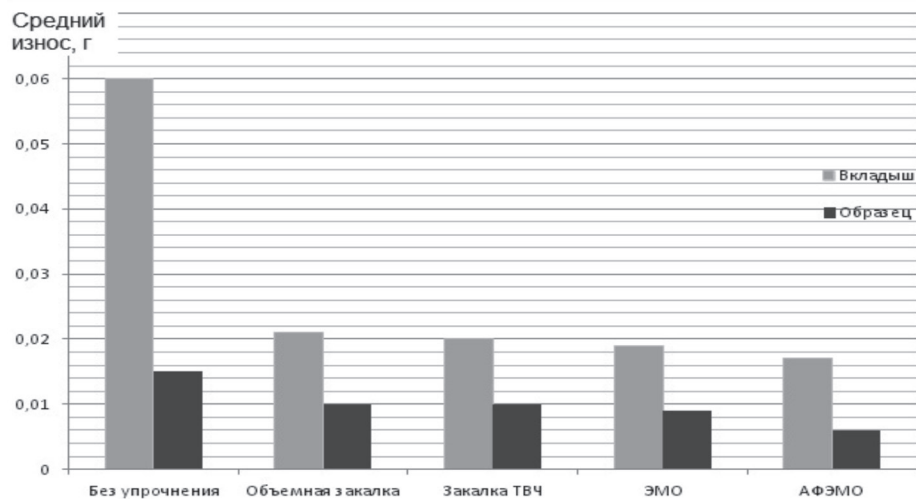


Рис. 6. Износ роликов и вкладышей после испытаний на трение

– электрохимическое упрочнение поверхности приводит к повышению износостойкости примерно в 1,5...1,6 раза, а вкладышей – в 2,5...2,7 раза;

– антифрикционная электрохимическая обработка повышает износостойкость образцов в 1,7...1,9 раза, вкладышей – примерно в 2,8...3,0 раза.

Повышение износостойкости поверхностей для образцов после АФЭМО по отношению к образцам, обработанным по «классической» технологии ЭМО, составляет примерно 10...20%. Наибольший прирост износостойкости проявляется на первоначальном этапе работы деталей трибосистемы, т. е. на этапе приработки, что подтверждает повышение антифрикционных свойств деталей и долговечности деталей трибосистемы в целом при применении АФЭМО в качестве упрочняющей финишной технологии.

Проведенные исследования позволили выявить зависимость износостойкости деталей машин после антифрикционной электрохимической обработки от материала сопрягаемого вкладыша. Так, при трении стальных образцов (сталь 40X) после АФЭМО с частичными вкладышами из стали 45, серого чугуна СЧ-21 и бронзы БрОСЦ -3-5-5 было установлено, что самая высокая износостойкость наблюдается в паре трения образца после АФЭМО с бронзовым вкладышем, причем стальной образец был обработан АФЭМО с нанесением суспензии твердосмазочного материала в смеси с ПАВ (скрытокристаллический графит (СКГ) или дисульфид молибдена с ПАВ) подачей на поверхность в процессе обработки. Трибопара сталь 40X после АФЭМО – чугунный вкладыш дает по сравнению с другими парами трения несколько более высокий износ как образца, так и вкладыша.

## Выводы

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Антифрикционная электрохимическая обработка позволяет снизить момент трения образцов трибопары. Минимальный момент трения имеют образцы после антифрикционной электрохимической обработки. АФЭМО с нанесением суспензии твердосмазочного материала в смеси с ПАВ позволяет получить минимальный момент, особенно на этапе приработки, что свидетельствует о высоких антифрикционных свойствах обработанных поверхностей.

2. Скорость изнашивания деталей после АФЭМО, по сравнению с деталями, обработан-

ными по «классической» технологии ЭМО, снижается на 10...20 %.

3. Наиболее эффективно применение технологии АФЭМО для стальных деталей, которые работают в паре трения с бронзовыми деталями, например, подшипники скольжения ходовой части МГКМ.

4. Подбор твердосмазочного материала и ПАВ для АФЭМО с нанесением суспензии твердосмазочного материала в смеси с ПАВ, стальных деталей, образующих трибосистему с бронзовыми деталями, позволяет повысить твердость обработанной поверхности и значительно ее износостойкость с возможной реализацией одного из видов избирательного переноса в трибоузле.

### Список литературы

1. Справочник по триботехнике: в 3 т.: т. 1: Теоретические основы / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 397 с.: ил.
2. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой: монография. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 198 с.
3. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация: монография / В.П. Багмутов, С.Н. Паршев, Н.Г. Дудкина, И.Н. Захаров. – Новосибирск: Наука, 2003. – 318 с.
4. Эдигаров В.Р. Технологии и оборудование комбинированных способов электромеханической обработки: монография. – Омск: ОАБИИ, 2014. – 280 с.
5. Эдигаров В.Р. Повышение эксплуатационных свойств и качества поверхностного слоя деталей машин технологическими методами: монография. – Омск: ОФ ВА МТО, 2013. – 196 с.
6. Эдигаров В.Р., Малый В.В. Повышение износостойкости деталей ходовой части многоцелевых гусеничных машин комбинированными методами электромеханической обработки // Вестник СибАДИ. – 2014. – № 4 (38). – С. 57–64.
7. Яковлев С.А. Результаты исследований износостойкости деталей после антифрикционной электромеханической обработки // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2011. – № 3 (15). – С. 116–120.
8. Комбинированное фрикционно-электрическое модифицирование стальных поверхностей трения / Ю.К. Машков, В.Р. Эдигаров, З.Н. Овчар, М.Ю. Байбарацкая // Трение и износ. – 2006. – Т. 27, № 1. – С. 89–94.
9. Эдигаров В.Р., Килунин И.Ю. Рентгенографическое исследование стали 38ХС, подвергнутой фрикционно-электрическому модифицированию // Металлообработка. – 2011. – № 4 (64). – С. 24–29.
10. Эдигаров В.Р., Дегтярь В.В., Малый В.В. Математическая модель температурных параметров при фрикционно-электрическом модифицировании // Омский научный вестник. – 2013. – № 2 (120). – С. 161–165.
11. Патент 148162 Российская Федерация, МПК В 23 Р 9/00, В 24 В 39/00. Инструментальный узел для поверхностного фрикционно-электрического модифицирования деталей машин / В.Р. Эдигаров, С.В. Ушнурцев, Г.Г. Макаров, В.В. Малый; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное казенное военное учреждение высшего профессионального образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева». – № 2014127907/02; заявл. 08.07.2014; опубл. 27.11.2014, Бюл. № 33. – 2 с.
12. Эдигаров В.Р., Машков Ю.К., Макаренко Н.Г. Исследование поверхностного слоя стали модифицированного фрикционно-электрическим методом // Технология металлов. – 2007. – № 3. – С. 28–31.
13. Theoretical and experimental analysis of electric contact surface hardening of ductile iron / X. Qi, S. Zhu, H. Ding, M. Xu // Applied Surface Science. – 2014. – Vol. 288. – P. 591–598. – doi: 10.1016/j.apsusc.2013.10.078.
14. Stachowiak G.W., Batchelor A.W. Surface hardening and deposition of coatings on metals by a mobile source of localized electrical resistive heating / Journal of Materials Processing Technology. – 1996. – Vol. 57, iss. 3–4. – P. 288–297. – doi: 10.1016/0924-0136(95)02070-5.
15. Jutas A., Žiliukas A., Griškevičius P. Structural and mechanical analysis of steel 45 after electromechanical treatment (EMT): elastic and plastic states // Medžiagotyra = Materials science. – 2002. – Vol. 8, N 3. – P. 246–251.
16. Daunys M., Staponkus V. Influence of electromechanical surface treatment on low cycle stressing characteristics of grade 45 steel // Mechanika. – 2005. – N 2 (52). – P. 148–153.
17. Staponkus V., Daunys M., Markauskas S. Influence of electromechanical treatment regimes on strength and durability of elements // III Sympozjum mechaniki zniszczenia materiałów i konstrukcji. – Augustów : Politechnika Białostocka, 2005. – P. 393–396.
18. Edigarov V.R., Litau E.V. The influence of process parameters of the electromechanical handling on its features // Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics 2014)”. – Omsk, 2014. – P. 78–81. – doi: 10.1109/Dynamics/2014/7005647.

**OBRABOTKA METALLOV**

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(68), July – September 2015, Pages 6–15

**Parts finishing antifriction electromechanical machining**
**Edigarov V.R.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: edigarovs@mail.ru

**Litau E.V.**, Post-graduate Student (Military), e-mail: litau100@mail.ru

Omsk Tank-Automotive Engineering Institute, 14 Military Town, Omsk, 644098, Russian Federation

**Abstract**

The results of investigations of electromechanical surface treatment of tribosystems steel parts with preliminary application of thin sliding layer consisting of a variety of solid lubricants to the surface of the workpiece, allows to change the structure of the surface layer, to improve durability and performance, especially antifrictionality. A method for processing with a pre-coating of antifriction material on the surface of the workpiece, followed by treatment with an electromechanical is called AFEMO. It is found that AFEMO reduces friction torque of the samples in the friction pairs. Thermal and deformational influence during AFEMO provides a hardened surface layer with a hardness of 9 GPa and areas with a solid lubricating antifriction coating, which improves the wear resistance and friction properties of the parts surface layer, and corrosion resistance. Minimum torque friction have samples, which surfaces have been processed with AFEMO with preliminary coating of antifriction material and rubbing the surface of the workpiece by applying an antifriction material in suspension in a mixture with a surfactant (surfactant). Bronze showed better results in the case of rubbing for the application of the solid material.

When using an ultradisperse crypto-crystalline graphite (SCG) as an antifriction material and molybdenum disulfide in admixture with glycerine, tribocoupling wear rate is minimal in comparison with any other solid lubricants and traditional processing techniques for surface hardening. The wear rate of parts after AFEMO compared with the items processed by the “traditional” technology EMI is reduced by 10...20%. Total AFEMO influence pattern on the microhardness of steel specimens resides in the change of the degree of hardening layer through the samples depth with a maximum near the surface and depending mainly on the magnitude of the current.

**Keywords:**

roughness, friction properties, electromechanical, solid lubricant, wear resistance, tribosystem, cryptocrystalline graphite, molybdenum disulfide.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-6-15

**References**

1. Khebды M., Chichinadze A.V., eds. *Spravochnik po tribotekhnike. V 3 t. T. 1. Teoreticheskie osnovy* [Reference of tribological engineering. Vol. 1: Theoretical foundation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 397 p.
2. Askinazi B.M. *Uprochnenie i vosstanovlenie detalei mashin elektromekhanicheskoi obrabotkoi* [Hardening and recovery of machine's details using electromechanical processing]. 3<sup>rd</sup> ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 198 p. ISBN 5-217-00443-6
3. Bagmutov V.P., Parshev S.N., Dudkina N.G., Zakharov I.N. *Elektromekhanicheskaya obrabotka: tekhnologicheskie i fizicheskie osnovy, svoystva, realizatsiya* [Electromechanical machining. The technological and physical fundamentals, properties, realization]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2003. 318 p.
4. Edigarov V.R. *Tekhnologii i oborudovanie kombinirovannykh sposobov elektromekhanicheskoi obrabotki* [Technologies and equipment for combined methods of electromechanical processing]. Omsk, OABII Publ., 2014. 280 p.
5. Edigarov V.R. *Povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv i kachestva poverkhnostnogo sloya detalei mashin tekhnologicheskimi metodami* [Increase of operational properties and quality of the surface layer of machine parts by technological methods]. Omsk, OF VA MTO Publ., 2013. 196 p.
6. Edigarov V.R., Malyy V.V. *Povyshenie iznosostoikosti detalei khodovoi chasti mnogotselevykh gusenichnykh mashin kombinirovannymi metodami elektromekhanicheskoi obrabotki* [Improving wear resistance of details



of multi-purpose tracked machines' running gear by combined methods of electromechanical processing]. *Vestnik SibADI – SibADI Journal*, 2014, no. 4 (38), pp. 57–64.

7. Yakovlev S.A. Rezul'taty issledovaniy iznosostoikosti detalei posle antifriktsionnoi elektromekhanicheskoi obrabotki [Results of researches of wear resistance details after antifrictional electromechanical processing]. *Vestnik Ul'yansovskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii – Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy*, 2011, no. 3 (15), pp. 116–120.

8. Mashkov Yu.K., Edigarov V.R., Baibaratskaya M.Yu., Ovchar Z.N. Kombinirovannoe friktsionno-elektricheskoe modifitsirovanie stal'nykh poverkhnostei treniya [Combined friction-electric modification of steel friction surfaces]. *Trenie i iznos – Journal of Friction and Wear*, 2006, vol. 27, no. 1, pp. 89–94.

9. Edigarov V.R., Kilunin I.Yu. Rentgenograficheskoe issledovanie stali 38XC, podvergnutoi friktsionno-elektricheskomu modifitsirovaniyu [X-ray study of steel 38 XC subjected to friction-electric modification]. *Metalloobrabotka – Metal processing*, 2011, no. 4 (64), pp. 24–29.

10. Edigarov V.R., Degtiar' V.V., Malyi V.V. Matematicheskaya model' temperaturnykh parametrov pri friktsionno-elektricheskom modifitsirovanii [Mathematical model of temperature parameters of friction-electric modifying]. *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2013, no. 2 (120), pp. 161–165.

11. Edigarov V.R., Ushnurtsev S.V., Makarov G.G., Malyi V.V. Instrumental'nyi uzel dlya poverkhnostnogo friktsionno-elektricheskogo modifitsirovaniya detalei mashin [The instrumental unit for surface friction-electric modification of machine parts]. Patent RF, no. 148162, 2014.

12. Edigarov V.R., Mashkov Yu.K., Makarenko N.G. Issledovanie poverkhnostnogo sloya stali modifitsirovanogo friktsionno-elektricheskim metodom [Investigating the surface layer of steel, modified by friction-electric method]. *Tekhnologiya metallov – Metal Technology*, 2007, no. 3, pp. 28–31.

13. Qi X., Zhu S., Ding H., Xu M. Theoretical and experimental analysis of electric contact surface hardening of ductile iron. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 288, pp. 591–598. doi: 10.1016/j.apsusc.2013.10.078

14. Stachowiak G.W., Batchelor A.W. Surface hardening and deposition of coatings on metals by a mobile source of localized electrical resistive heating. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, vol. 57, iss. 3–4, pp. 288–297. doi: 10.1016/0924-0136(95)02070-5

15. Jutas A., Žiliukas A., Griškevičius P. Structural and mechanical analysis of steel 45 after electromechanical treatment (EMT): elastic and plastic states. *Medžiagotyra – Materials science*, 2002, vol. 8, no. 3, pp. 246–251. (In Lithuania)

16. Daunys M., Staponkus V. Influence of electromechanical surface treatment on low cycle stressing characteristics of grade 45 steel. *Mechanika – Mechanics*, 2005, no. 2 (52), pp. 148–153. (In Lithuania)

17. Staponkus V., Daunys M., Markauskas S. [Influence of electromechanical treatment regimes on strength and durability of elements]. *Materiały III Sympozjuma Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji* [Proceedings of III Symposium “Damage Mechanics of Materials and Structures”]. Augustow, 2005, pp. 393–396.

18. Edigarov V.R., Litau E.V., Morgunov A.P. The influence of process parameters of the electromechanical handling on its features. *Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics 2014)”*, Omsk, Russia, 11–13 November 2014, pp. 78–81. doi: 0.1109/Dynamics.2014.7005647

#### Article history:

Received 5 May 2015

Revised 20 June 2015

Accepted 17 July 2015

# ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОЛИТА И КАТОДНОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА НА КАЧЕСТВО И ТОЛЩИНУ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЗЕРКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГИЛЬЗ ГИДРОЦИЛИНДРОВ

*Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор  
В.В. ЯНПОЛЬСКИЙ, канд. техн. наук, доцент  
Р.М. КАДЫРБАЕВ, магистрант  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 8 мая 2015  
Рецензирование 20 июня 2015  
Принята к печати 17 июля 2015

**Рахимянов Х.М.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: kharis51@mail.ru

Одной из основных причин выхода из строя гидроцилиндров являются царапины и задиры на зеркальной поверхности гильзы. Рассмотрены методы восстановления зеркальной поверхности гильз гидроцилиндров, в частности, метод ремонтных размеров и метод «пластинирования» внутренних поверхностей. Показано, что восстановление дефектов, связанных с нарушением герметичности, возможно гальваническим методом. Использовались образцы размерами 25×25×5 мм, изготовленные из стали 45 ГОСТ 1050–88. Подготовка образцов перед нанесением покрытия включала в себя механическую и химическую обработку. Проведены экспериментальные исследования влияния катодной плотности тока и температуры электролита на качество и толщину никелевого покрытия. Установлено, что при температуре, равной 40 °С, получена максимальная толщина покрытия в исследованном диапазоне плотностей тока. Наблюдалось равномерное распределение покрытия по поверхности образца при плотности тока 9 А/дм<sup>2</sup> при минимальной его пористости. Снижение плотности тока приводит к увеличению пористости покрытия. При плотности тока 12 А/дм<sup>2</sup> получены покрытия с губчатыми осадками и дендритной структурой.

**Ключевые слова:** гидроцилиндр, гильза, электролит, температура электролита, гальваническое покрытие, плотность тока.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-16-22

## Введение

Гидроцилиндры широко применяют во всех отраслях техники, где используют объемный гидропривод [1]. Например, в строительно-дорожных, землеройных, подъёмно-транспортных машинах и металлорежущих станках. Потеря работоспособности гидроцилиндров как правило связана с появлением дефектов на рабочей поверхности гильз и поршней, таких как царапины, сколы и задиры (рис. 1). Эти детали являются металлоемкими, высокоточными и, как

Дефекты

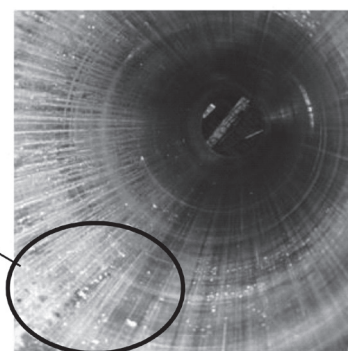


Рис. 1. Царапины и следы коррозии на поверхности гильзы гидроцилиндра

следствие, сложными в изготовлении. Основная причина возникновения дефектов связана с механическим повреждением при эксплуатации изделий. Вследствие повреждений зеркала гильз быстро изнашиваются уплотнительные элементы и появляются протечки рабочей жидкости [1, 2]. Поэтому задача восстановления рабочей поверхности гильз гидроцилиндров является актуальной. Для восстановления работоспособности подобного рода деталей применяют механические и гальванические методы [2, 3].

Механическое восстановление внутренних поверхностей изделий возможно при использовании метода ремонтных размеров и метода «пластирования» [4]. Метод ремонтных размеров предусматривает восстановление формы и качества поверхности посредством растачивания или хонингования гильзы. При ремонте гильзы гидроцилиндра снимается минимальный слой металла до устранения задир и царапин, однако при реализации этого метода ремонта возникает необходимость в изготовлении нового поршня [4].

Технологический процесс метода пластирования состоит в том, что предварительно расточенная внутренняя цилиндрическая поверхность гильзы холоднокатаной термообработанной ленты. Однако при небольшой толщине стенки дефектной гильзы этот метод не применим, а также экономически и технологически нецелесообразен в случаях наличия единичных дефектов небольшой глубины (до 100 мкм) на зеркальной поверхности гильзы [4, 5, 6].

Восстановление работоспособности зеркальной поверхности гильзы гидроцилиндра при наличии единичных дефектов возможно гальваническим способом [2] с последующей механической обработкой, включая процессы электроалмазного шлифования [3, 7, 8] и последующего ультразвукового пластического деформирования [9, 10, 11]. Применение данного метода позволяет локализовать процесс нанесения покрытия и восстанавливать поврежденный участок поверхности.

Одним из самых распространенных гальванических процессов является никелирование [12]. Никелирование обладает достоинствами, такими, как прочное сцепление с поверхностью и несложная технология нанесения покрытия [13]. Никелевое покрытие обладает высокой

твёрдостью и износостойкостью, обеспечивая увеличение срока службы изделия.

Следует отметить, что качество покрытия и его толщина во многом зависят от режимов гальванического осаждения, в частности, температуры и плотности тока [14]. Поэтому для эффективного применения указанного метода при восстановлении зеркальной поверхности гильзы гидроцилиндра необходимо определить режимы осаждения материала покрытия и состав электролита, для получения качественного слоя.

## Методика

### экспериментального исследования

Гильзы гидроцилиндров изготавливаются из стали 35, 45, 30ХГСА, 40Х [1]. В качестве модельного материала для проведения экспериментальных исследований по восстановлению работоспособности зеркальной поверхности, была выбрана сталь 45 ГОСТ 1050–88. Экспериментальные исследования проводились на образцах размерами 25×25×5 мм с изолированием поверхностей, не подлежащих восстановлению, клеем БФ-6 ГОСТ 12172.

На основе анализа литературных данных был выбран состав электролита для гальванического осаждения покрытия. Основными компонентами электролита являются  $\text{NiSO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_4$  в следующих концентрациях  $\text{NiSO}_4$  – 300 г/л,  $\text{NaCl}$  – 10 г/л,  $\text{MgSO}_4$  – 60 г/л,  $\text{H}_3\text{BO}_4$  – 15 г/л [13]. Кислотность электролита составляла  $\text{pH} = 5$  [12].

Предварительная подготовка образцов включала в себя шлифование, полирование, электрохимическое обезжиривание, травление и декапирование. Расчетное значение толщины наносимого покрытия определялось по формуле [6]

$$h = \frac{T_{\text{осж}} \alpha \eta D_k}{1000 \gamma},$$

где  $T_{\text{осж}}$  – продолжительность электролиза, ч;  $\alpha$  – электрохимический эквивалент, г/(А·ч) (для никеля  $\alpha = 1,095$  г/(А·ч));  $\eta$  – выход металла по току, % (для никеля  $\eta = 90 \dots 94$  %);  $D_k$  – катодная плотность, А/дм<sup>2</sup>;  $\gamma$  – плотность металла покрытия, г/см<sup>3</sup> (для никеля  $\gamma = 8,8$  г/см<sup>3</sup>).

Экспериментальные исследования по гальваническому осаждению покрытия на модельный материал проводились при следующих темпера-

турах электролита – 20, 40, 60 и 80 °С. Катодная плотность тока составляла 3, 6, 9 и 12 А/дм<sup>2</sup> для каждой из температур. Время осаждения гальванического покрытия составляло 60 мин.

### Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены результаты экспериментального исследования влияния температуры электролита и катодной плотности тока на толщину осаждаемого покрытия.

Из диаграммы (рис. 2) следует, что с увеличением температуры электролита происходит повышение толщины покрытия при всех значениях катодной плотности тока. Следует отметить, что при температуре электролита 40 °С покрытия не имеют дефектов в виде отслоения, и толщина покрытия равномерна по всей поверхности образцов (рис. 3). Подобная зависимость толщины покрытия от температуры связана с повышением электропроводности раствора и уменьшением пассивации анода при росте температуры [15].

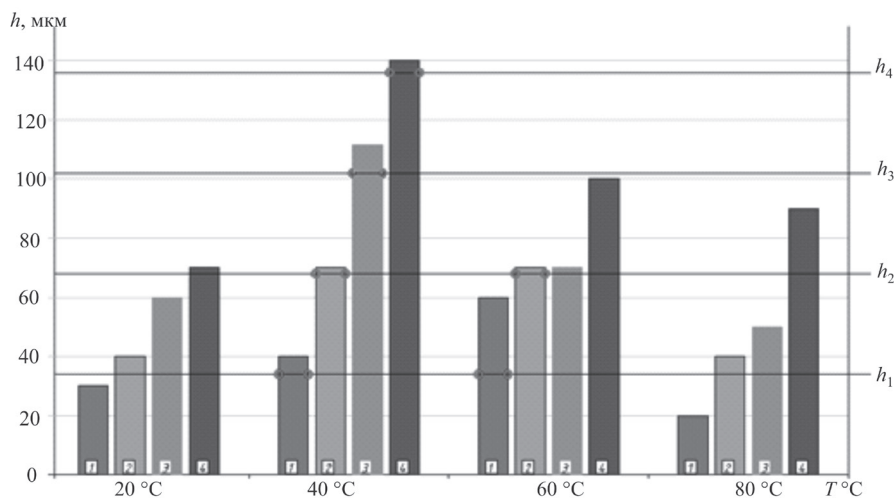


Рис. 2. Диаграмма влияния температуры электролита и катодной плотности тока на толщину покрытия:

1, 2, 3, 4 – экспериментальные значения толщины никелевого покрытия при плотностях тока  $D_k = 3, 6, 9, 12$  А/дм<sup>2</sup> соответственно;  $h_1, h_2, h_3, h_4$  – расчетные значения толщины никелевого покрытия при плотностях тока  $D_k = 3, 6, 9, 12$  А/дм<sup>2</sup> соответственно

В случае осаждения покрытия при температуре электролита, равной 60 °С, и плотности тока 9 А/дм<sup>2</sup> наблюдается отслоение никелевого слоя от подложки (рис. 4). Это связано с тем, что несоответствие коэффициентов расширения материала подложки и наносимого покрытия существенно снижает прочность сцепления. При этом возникают значительные внутренние напряжения, которые приводят к отслоению нанесенного слоя, что подтверждается данными работ [16, 17].

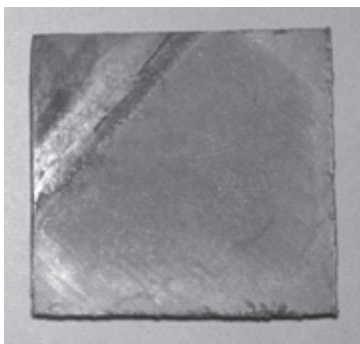


Рис. 3. Образец с покрытием, нанесенным при температуре электролита 40 °С и плотности тока 9 А/дм<sup>2</sup>

Повышение температуры до 80 °С приводит к снижению катодной поляризации, что способствует образованию дендритной структуры в покрытии (рис. 5).

Влияние плотности тока на толщину никелевого покрытия представлено на рис. 6. Повышение плотности тока приводит к увеличению толщины покрытия во всем исследованном диапазоне температур (рис. 6).

При плотности тока 3 А/дм<sup>2</sup> получены покрытия с малой толщиной (40 мкм) и высокой пористостью (рис. 7).

Увеличение плотности тока приводит не только к увеличению толщины покрытия, но и к снижению пористости покрытия. Так, при плотности тока, равной 9 А/дм<sup>2</sup>, получено покрытие, толщина которого равномерно распределена по поверхности образца и низкой пористостью (рис. 8).

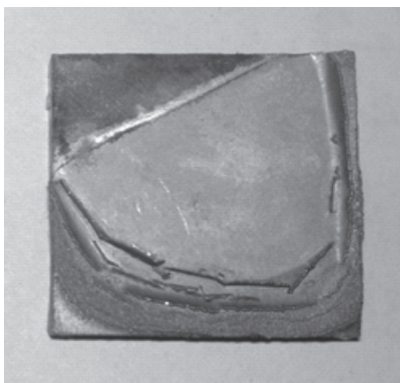


Рис. 4. Образец с покрытием, нанесенным при температуре электролита 60 °С и плотности тока 9 А/дм<sup>2</sup>

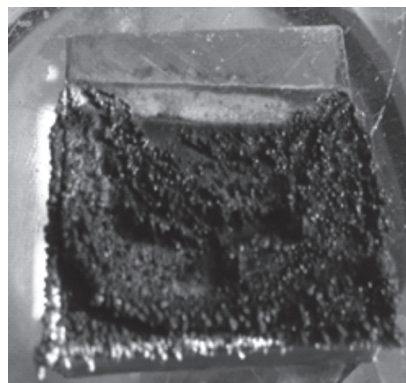


Рис. 5. Образец с покрытием, нанесенным при температуре электролита 80 °С и плотности тока 12 А/дм<sup>2</sup>

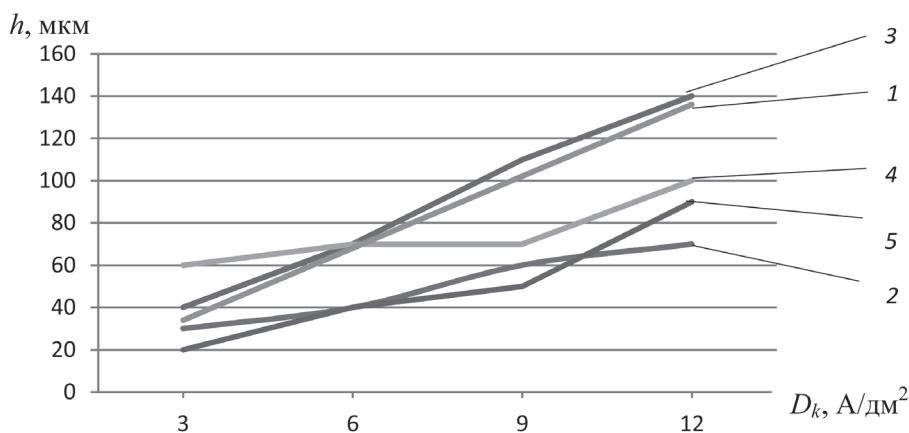


Рис. 6. Зависимость толщины гальванического покрытия от катодной плотности тока:  
 1 – расчетные значения толщины покрытия; 2, 3, 4, 5 – экспериментальные значения толщины покрытия при температуре электролита 20, 40, 60, 80 °С соответственно

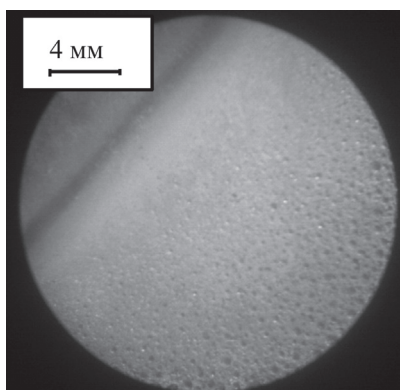


Рис. 7. Покрытие с высокой пористостью, полученное при плотности тока 3 А/дм<sup>2</sup>

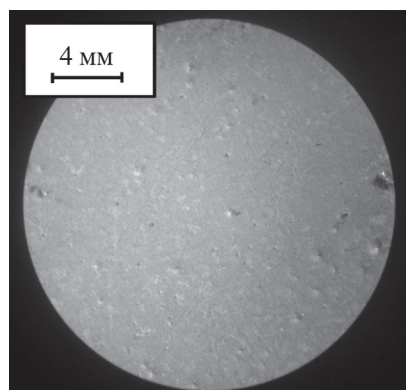


Рис. 8. Покрытие с низкой пористостью, полученное при плотности тока 9 А/дм<sup>2</sup>

Увеличение плотности тока до 12 А/дм<sup>2</sup> приводит к образованию порошкообразных и губчатых структур (рис. 5). Это связано с тем, что при повышении плотности тока раствор у катода «беднеет» частицами осаждаемого металла,

которые не успевают прибывать из других мест раствора к катоду, концентрация их у катода настолько понижается, что усиливается выделение на катоде водорода [18, 19].

## Выводы

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований установлено влияние температуры электролита на толщину никелевого покрытия при его гальваническом осаждении на поверхность подложки из стали 45. В результате экспериментов установлено, что при температуре электролита, равной 60 °С, происходит отслоение покрытий, связанное с разностью коэффициентов термического расширения подложки и осаждаемого материала. При температуре электролита 80 °С наблюдается образование дендритных структур в покрытии. Также выявлено, что при плотности тока ниже 9 А/дм<sup>2</sup> наблюдается образование осадков высокой пористости, что является негативным для восстановления зеркальной поверхности гильзы гидроцилиндра. Повышение плотности тока до 12 А/дм<sup>2</sup> приводит к образованию порошкообразных, губчатых структур в покрытии. Наиболее качественное никелевое покрытие при гальваническом осаждении было получено при температуре электролита 40 °С и плотности тока 9 А/дм<sup>2</sup>. Покрытия на поверхности образца распределены относительно равномерно без явных дефектов. В связи с этим данный режим может быть рекомендован для гальванического осаждения никелевого покрытия на сталь 45.

## Список литературы

1. *Алексеева Т.В.* Гидропривод и гидроавтоматика землеройно-транспортных машин: исследования и основы расчета. – М.: Машиностроение, 1966. – 148 с.
2. *Улашкин А.П.* Восстановление деталей и узлов автомобилей: учебное пособие / Хабаровский государственный технический университет. – Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 2002. – 204 с.
3. *Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н.* Размерная обработка деталей с покрытиями из наноструктурированных порошковых материалов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2010. – № 4 (49). – С. 22–26.
4. *Лепешкин А.В., Михайлин А.А., Шейнак А.А.* Гидравлика и гидропневмопривод. В 2 ч. Ч. 2. Гидравлические машины и гидропневмопривод. – 5-е изд., доп. и перераб. – М.: МГИУ, 2009. – 352 с. – ISBN 978-5-276-01019-9 (ч. 2).
5. *Judd H.* The hydraulic equipment of the Ohio state university. – [Ohio]: Nabu Press Publ., 2012. – 22 p. – ISBN-10: 1279219955. – ISBN-13: 978-1279219959.

6. *Карагодин В.И., Митрохин Н.Н.* Ремонт автомобилей и двигателей: учебник. – 2-е изд., стер. – М.: Академия, 2003. – 496 с. – (Среднее профессиональное образование).

7. *Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н.* Электроалмазная обработка напыленных износостойких покрытий // *Инженерия поверхностного слоя деталей машин: труды международной научно-практической конференции, Россия, Кемерово, 9–11 декабря 2009 г.* – Кемерово: ГУ Куз ГТУ, 2009. – С. 365–368.

8. *Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимьянов К.Х.* Точность формообразования при электроалмазной прорезке пазов в аморфных и нанокристаллических сплавах // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2006. – № 2 (31). – С. 32–33.

9. *Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С., Третьяков М.А.* Повышение качества поверхностного слоя деталей с покрытиями малой толщины из нанокристаллических порошков ультразвуковым пластическим деформированием // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2011. – № 3 (52). – С. 18–22.

10. *Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С.* Моделирование процесса формирования регулярного микрорельефа при ультразвуковом пластическом деформировании // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2010. – № 2. – С. 3–10.

11. *Рахимьянов Х.М., Исупов А.В., Никитин Ю.В.* Прогнозирование состояния материала в очаге деформации при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2005. – № 4. – С. 41–46.

12. *Беленький М.А., Иванов А.Ф.* Электроосаждение металлических покрытий: справочник. – М.: Металлургия, 1985. – 288 с.

13. *Янпольский А.М., Ильин В.А.* Краткий справочник гальванотехника. 3-е изд. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1981. – 269 с.

14. *Дасоян М.А., Пальмская И.Я., Захарова Е.В.* Технология электрохимических покрытий: учебник для средних специальных учебных заведений. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1989. – 391 с. – ISBN 5-217-00381-2.

15. Гальванические покрытия в машиностроении: справочник. В 2 т. Т. 1 / В.И. Игнатъев, Н.С. Ионычев, А.В. Маревичев, Н.Ф. Мелашенко, С.С. Плетенев, А.Я. Рябой, М.А. Шлугера. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

16. *Schlesinger M., Paunovic M.* Modern electroplating. – 5th ed. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2010. – 736 p.

17. Гамбург Ю.Д. Гальванические покрытия: справочник по применению. – М.: Техносфера, 2006. – 216 с. – ISBN 5-94836-079-2.

18. Kanani N. Electroplating: basic principles, processes and practice. – Oxford: Elsevier, 2005. – 353 p. – ISBN 1856174514.

19. Hu Z.-F., Wang X.-B., Xu B.-S. Effect of current density on microstructure and properties of automatic brush electroplated nickel // Journal of Functional Materials. – 2013. – N 17. – P. 2507–2510. doi: 10.3969/j.issn.1001-9731.2013.17.016.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(68), July – September 2015, Pages 16–22

### Electrolyte temperature and cathodic current density effect on galvanic coating quality and thickness during the recovery of the mirror surface of hydraulic cylinder barrels

Rakhimyanov Kh.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru

Yanpolskiy V.V., Ph. D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: mag07@mail.ru

Kadyrbaev R.M., Master's Degree student, e-mail: be.true@mail.ru

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

#### Abstract

One of the major reasons of failure of the hydraulic cylinders is scratches and teases on the barrel mirror surface. The methods of recovery of the hydraulic cylinder barrel mirror surface are examined. These methods include methods of size repair and methods of plate applications. The galvanic method might allow the recovery of defects associated with the break of tightness. For the experiments the samples sizes  $25 \times 25 \times 5$  mm made of steel 45 GOST 1050-88 are used. Preparation of samples before the coating includes mechanical (grinding operation and polish) and chemical treatment (decaling, descaling and activation dipping). Experimental investigations of the electrolyte temperature and cathodic current density effect on galvanic coating quality and thickness have been carried. Current densities varied from 3 to  $12 \text{ A/Dm}^2$  with the step  $3 \text{ A/Dm}^2$ . The temperature is varied from 20 to  $80^\circ \text{C}$  with the step  $20^\circ \text{C}$ . It is found that at a temperature of  $40^\circ \text{C}$  highest thickness of the coating received in the investigated range of current densities. When the temperature of electrolyte is  $80^\circ \text{C}$  the coating have dendrite structure, associated with a reduction cathodic polarization. It is shown that when current density is  $9 \text{ A/Dm}^2$  coating uniformly distributed over the surface of the sample and the porosity of coating is minimal. Increasing of porosity of the coating is associated with decreasing of the current density. When current density is  $12 \text{ A/Dm}^2$  the coating have spongioid deposits, due to the low amount of metal ions in the electrolyte near the cathode.

#### Keywords:

Hydraulic cylinder, barrel, electrolyte, temperature of electrolyte, galvanic coating, current density.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-16-22

#### References

1. Alekseeva T.V. *Gidroprivod i gidroavtomatika zemleroino-transportnykh mashin: issledovaniya i osnovy rascheta* [Hydraulic and hydro automation of earth-moving machines: research and bases of calculation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 148 p.
2. Ulashkin A.P. *Vosstanovlenie detalei i uzlov avtomobilei* [Recovery of parts and assemblies of cars]. Khabarovsk, KhGTU Publ., 2002. 204 p.
3. Rakhimyanov Kh.M., Yanpolskiy V.V., Moiseenko A.N. Razmernaya obrabotka detalei s pokrytiyami iz nanostrukturirovannykh poroshkovykh materialov [Dimensional processing of details with coverings from nano powder materials]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2010, no. 4 (49), pp. 22–26.

4. Lepeshkin A.V., Mikhailin A.A., Sheipak A.A. *Gidravlika i gidropnevmoprivod. V 2 ch. Ch. 2: Gidravlicheskie mashiny i gidropnevmoprivod* [Hydraulics and hydropneumatic actuator. In 2 pt. Pt. 2: Hydraulic machines and hydropneumatic actuator]. 5<sup>th</sup> ed. Moscow, MGIU Publ., 2009. 352 p. ISBN 978-5-276-01019-9
5. Judd H. *The Hydraulic Equipment of the Ohio State University*. Ohio, Nabu Press Publ., 2012. 22 p. ISBN-10: 1279219955. ISBN-13: 978-1279219959
6. Karagodin V.I., Mitrokhin N.N. *Remont avtomobilei i dvigatelei* [Repair of motor vehicles and engines]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Publishing center "Academia", 2003. 496 p. ISBN 5-7695-1125-7
7. Rakhimyanov Kh.M., Yanpolskiy V.V., Moiseenko A.N. [Electro-diamond processing of sprayed wear resistant coatings]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Inzheneriya poverkhnostnogo sloya detalei mashin»* [Proceedings of the International scientific-practical conference "Engineering of the surface layer of machine parts"], Kemerovo, 9–11 December 2009, pp. 365–368. (In Russian)
8. Rakhimyanov Kh.M., Krasil'nikov B.A., Rakhimyanov K.Kh. Tochnost' formoobrazovaniya pri elektroalmaznoi prorezke pazov v amorfnykh i nanokristallicheskikh splavakh [Forming accuracy at electro-diamond slotting grooves in the amorphous and nanocrystalline alloys]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2006, no. 2 (31), pp. 32–33.
9. Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S., Tretyakov M.A. Povyshenie kachestva poverkhnostnogo sloya detalei s pokrytiyami maloi tolshchiny iz nanokristallicheskikh poroshkov ul'trazvukovym plasticheskim deformirovaniem [Surface layer refinement of detales with small coating thickness made of nanocrystalline powder by ultrasonic surface plastic deformation]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 3 (52), pp. 18–22.
10. Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S. Modelirovanie protsessa formirovaniya regul'yarnogo mikrorel'efa pri ul'trazvukovom plasticheskom deformirovanii [Mathematical modeling of microrelief formation with ultrasonic plastic straining]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya – Strengthening technologies and coatings*, 2010, no. 2, pp. 3–10.
11. Rakhimyanov Kh.M., Isupov A.V., Nikitin Yu.V. Prognozirovanie sostoyaniya materiala v ochage deformatsii pri ul'trazvukovom poverkhnostnom plasticheskom deformirovanii [Prediction state of the material in the deformation zone at ultrasonic surface plastic deformation]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya – Strengthening technologies and coatings*, 2005, no. 4, pp. 41–46.
12. Belen'kii M.A., Ivanov A.F. *Elektroosazhdenie metallicheskikh pokrytii. Spravochnik* [Electrodeposition of metal coatings. Directory]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 288 p.
13. Yampol'skii A.M., Il'in V.A. *Kratkii spravochnik gal'vanotekhnika* [Quick reference electroplater]. 3<sup>rd</sup> ed. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1981. 269 p.
14. Dasoyan M.A., Pal'mskaya I.Ya., Zakharova E.V. *Tekhnologiya elektrokhimicheskikh pokrytii* [Technology of electrochemical coatings]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989. 391 p. ISBN 5-217-00381-2
15. Ignat'ev V.I., Ionycheva N.S., Mareichev A.V., Melashchenko N.F., Pletenev S.S., Ryaboi A.Ya., Shlugera M.A. *Gal'vanicheskie pokrytiya v mashinostroenii. Spravochnik. V 2 t. T. 1* [Electroplating coatings in mechanical engineering. Directory. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 240 p.
16. Schlesinger M., Paunovic M. *Modern electroplating*. 5th ed. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. 2010. 736 p. ISBN 978-0-470-16778-6
17. Gamburg. Yu.D. *Gal'vanicheskie pokrytiya. Spravochnik po primeneniyu* [Electroplating. Reference Application]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 216 p. ISBN 5-94836-079-2
18. Kanani N. *Electroplating: basic principles, processes and practice*. Oxford, UK, Elsevier, 2005. 353 p. ISBN 1856174514
19. Hu. Z.-F., Wang X.-H., Biao L.V., Xu B.-S. Effect of current density on microstructure and properties of automatic brush electroplated nickel. *Journal of Functional Materials*, 2013, iss, 17, pp. 2507–2510. doi: 10.3969/j.issn.1001-9731.2013.17.016

#### Article history:

Received 8 May 2015

Revised 20 June 2015

Accepted 17 July 2015



# КЛАССИФИКАТОР МАРШРУТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГЕОХОДА\*

*А.А. ЛАСУКОВ, канд. техн. наук, доцент  
П.С. ГРОМЫКО, студент  
(ЮТИ ТПУ, г. Юрга)*

Поступила 20 мая 2015

Рецензирование 20 июня 2015

Принята к печати 17 июля 2015

Ласуков А.А. – 652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26,  
Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета,  
e-mail: lasukow@rambler.ru

Рассмотрены вопросы повышения эффективности технологической подготовки при освоении новой продукции (на примере изделия геоход) в условиях единичного и мелкосерийного производства. На основе анализа конструкции изделий произведено их группирование по конструктивно-технологическим признакам, что позволило составить граф (типа дерево) обработки комплексной детали с учетом конкретных конструктивных особенностей. Направлениям движения по отдельным ветвям присвоены коды, из которых в дальнейшем формируется код конкретной детали. Технологический маршрут рассматриваемой детали, отнесенной к определенной группе, формируется путем выбора операций обработки элементарных поверхностей, имеющих у данной детали, из маршрута, составленного для типового представителя. Представленный классификатор составляет основу для повышения эффективности технологической подготовки производства, расширения системы материально-технического обеспечения производства, дальнейшего расширения нормативной справочной базы, общего повышения уровня производственной культуры сотрудников.

**Ключевые слова:** технологический процесс, технологическая подготовка производства, классификатор технологических процессов.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-23-30

## Введение

Современное машиностроение характеризуется интенсификацией внедрения новых технических решений, освоением наукоемких технологий, сокращением сроков морального устаревания новой продукции, постоянно меняющейся конъюнктурой рынка. В этих условиях ключевым требованием к производству становится гибкость, мобильность, универсальность. Организация производства в соответствии с принципами логистики, в соответствии с концепцией «Just In Time» предполагает отказ от избыточных запасов, отказ от изготовления

серий деталей, на которые нет заказа покупателей [1].

На примере судостроительного предприятия видно, как с помощью современных технологий можно повысить рентабельность мелкосерийного производства. Современные групповые технологии производства, современное оборудование, изменение линии взаимодействия проектант-заказчик-исполнитель могут способствовать своевременному планированию, значительному снижению издержек на этапе разработки технологического маршрута изготовления и в конечном итоге сделать продукцию предприятия конкурентоспособной [2].

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

При изготовлении геохода детали, входящие в изделие, являются, как правило, штучными, что делает проектирование технологических процессов обработки каждой детали с высокой степенью детализации экономически не оправданным [3]. Современные экономические условия требуют не только постоянного повышения качественных показателей изделий, но и частой переориентации производства на новые виды продукции, что предопределяет необходимость качественного изменения работы, проводящейся на этапе технологической подготовки производства [4–6]. Проведение работ по систематизации в области технологии позволит разработать унифицированные технологические процессы, а также унифицировать технологическую оснастку. Технологическая унификация обеспечивает резкое сокращение различного рода вспомогательных работ, связанных с оформлением технологической, плановой, учетной и других видов документации, необходимой для подготовки производственного процесса и управления им. В этих условиях имеет смысл произвести классификацию деталей геохода по конструктивно-технологическим признакам и разработать системный классификатор маршрутных технологических процессов на определенные группы деталей, что в дальнейшем позволит облегчить проектирование технологических процессов и сократить время на технологическую подготовку производства. При этом для отдельных деталей или их групп, подобным по тем или иным конструкторско-технологическим признакам, можно устанавливать схожие высокопроизводительные методы обработки с использованием быстропереналаживаемой оснастки.

Идея группирования технологических процессов принадлежит профессору С.П. Митрофанову [7, 8]. Данная концепция находит отражение и в других работах [9, 10], в том числе с использованием графов [11]. В рамках такой модели осуществляется группирование деталей, а технологический процесс создается на комплексную деталь. Пример создания такого классификатора на примере деталей типа «вал» рассмотрен в работе [12]. Современные средства автоматизации проектирования делают целесообразным использование модульного принципа проектирования, при котором изделие формируется из конструктивных модулей – унифици-

рованных фрагментов изделия. Номенклатура конструктивных модулей намного меньше номенклатуры изделий, которые из них можно собрать. Работа по описанию широкого спектра конструктивных модулей представляется магистральным направлением в разработке системного классификатора. Такой подход позволяет значительно сократить число разрабатываемых вариантов, и поэтому маршрут получается достаточно быстро, а вычислительные ресурсы используются более эффективно [13].

## Методика

Главные особенности проектирования технологических процессов – многовариантность проектных решений и слабая формализация многих проектных задач. По причине слабой формализации процесса технологического проектирования при решении задач нерасчетного характера (выбор заготовки, разработка маршрута обработки детали, выбор станков, инструментов и т. д.) решения принимают в результате выбора из известных типовых вариантов. Типовые решения – это основа формализации для решения различных задач при проектировании технологических процессов с помощью ЭВМ. Поэтому при разработке системного классификатора маршрутных технологических процессов на детали геохода главной задачей является формирование описания набора типовых решений для широкого спектра деталей, образованных различными поверхностями, а также условий, при которых может быть применено каждое из них.

Исходная информация представляет собой комплект чертежей типовых деталей изделия, маршрутные технологические процессы их изготовления, а также данные по имеющемуся на ОАО «КОРМЗ» технологическому оборудованию, так как изготовление деталей геохода предусмотрено на данном предприятии.

При выполнении работы была проанализирована широкая гамма номенклатуры изделий и примерных технологических процессов их изготовления, изучены технические характеристики и состояние оборудования, применяемого на предприятии, а также используемое технологическое оснащение. В результате проделанной работы возникают предпосылки к сокращению



сроков технологической подготовки производства, простоте внесения изменений в разработанный технологический процесс, надежности хранения данных за счет использования политики учетных записей и дублирования информации, простоте тиражирования, возможности совместной работы технологов над частями одного проекта, простоте обмена информацией между различными подразделениями предприятия.

Наряду с этим при групповой технологии предусматривается применение переналаживаемых приспособлений, что решает одну из важнейших проблем машиностроения – организацию быстропереналаживаемого производства, способного в короткие сроки освоить новую технику, а также повысить коэффициент оснащенности мелкосерийного производства до уровня крупносерийного [14].

Классификация осуществляется по конструктивно-технологическим признакам и ее резуль-

татом является установление принадлежности деталей к определенному типу, т. е. к совокупности деталей, имеющих в данных производственных условиях общую структуру операций и переходов, или к определенной группе, характеризующейся общностью оборудования и наладки, общими элементарными поверхностями и схемами установки. Технологический маршрут конкретной детали, отнесенной к определенному типу или входящей в определенную группу, формируется путем выбора операций обработки элементарных поверхностей, имеющих у данной детали, из маршрута, составленного для типового представителя или комплексной детали.

В одну из групп, сформированную в результате классификации по конструктивно-технологическим признакам, были включены детали, полученные путем термической резки (раскроя) листового материала. Представители деталей данной группы показаны на рис. 1. Эти детали

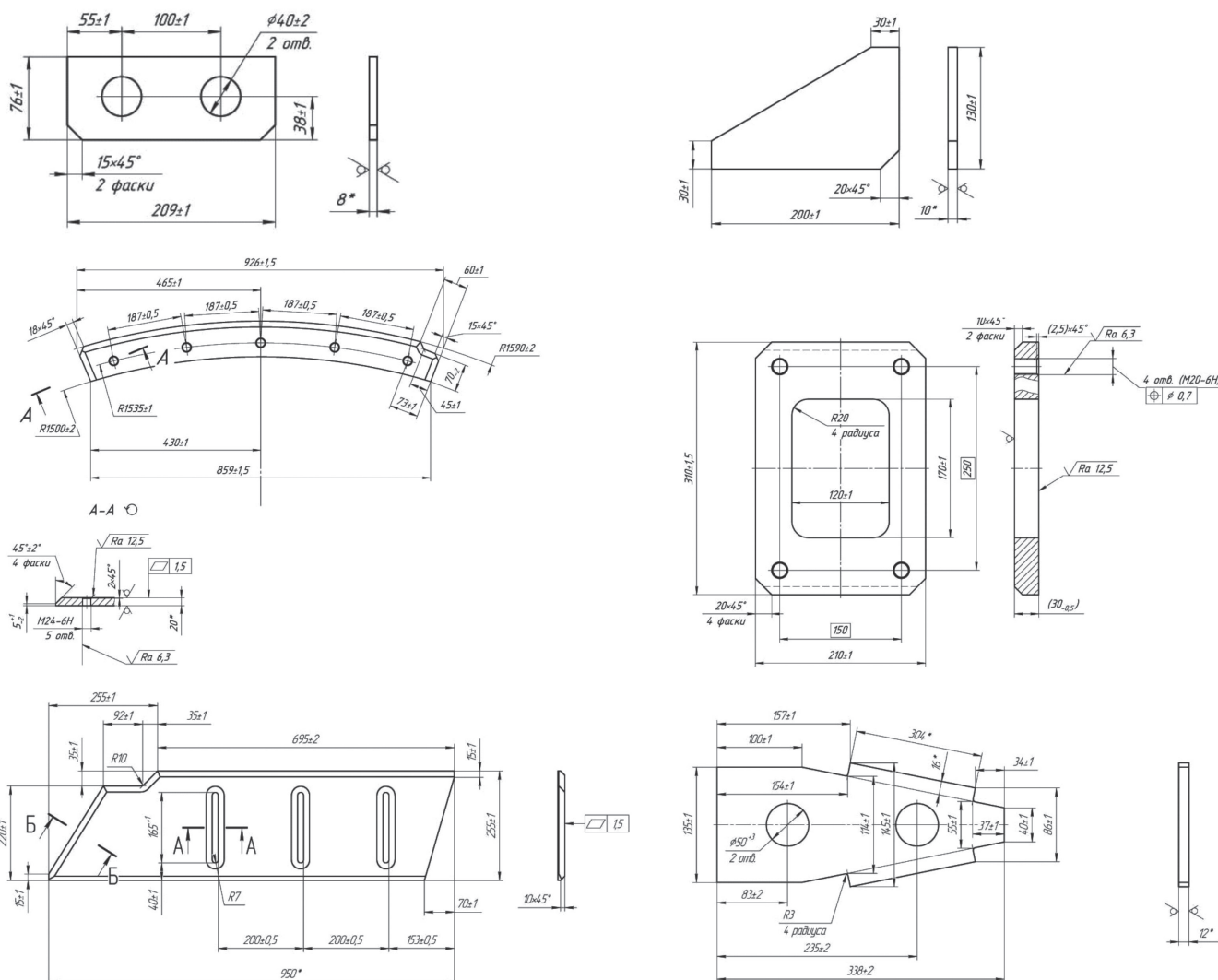


Рис. 1. Представители листовых деталей

входят в состав оболочки головной секции геохода. Поэтому от точности и сроков их изготовления будут зависеть геометрическая точность оболочки при сборке и сроки сборки оболочки [15]. Как видно, детали отличаются наличием (отсутствием) отверстий различной конфигурации, разделочных кромок под дальнейшую сварку. В некоторых деталях присутствуют отверстия, требующие механической обработки (сверление, нарезание резьбы). Габаритные размеры деталей и их форма позволяют производить раскрой из одного листа.

Листы металла по толщине могли варьироваться в пределах 8...50 мм. Основным признаком при объединении заготовок в группы является общность обрабатываемых поверхностей или их сочетаний, точность, достигаемая в процессе обработки, габаритные размеры (в частности, толщина листа) или возможность обработки заготовок разной конфигурации на одном оборудовании и при одной наладке станка.

В качестве комплексной была разработана деталь, изображенная на рис. 2. В данную деталь включены все элементы, которые могут присутствовать на деталях, входящих в группу. В частности, на детали имеются отверстия (на детали-представителе они овальной формы), которые должны вырезаться на операции термической резки, фаски (разделочные кромки), а также сквозные резьбовые отверстия, получаемые путем механической обработки на станке.

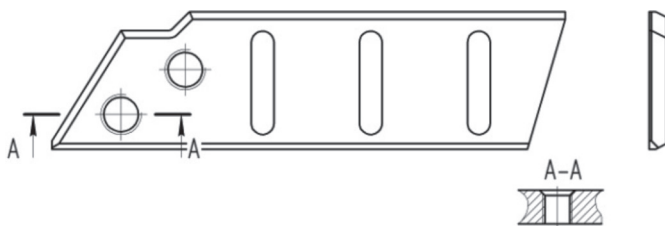


Рис. 2. Комплексная деталь

## Результаты и обсуждение

В ходе выполнения работы решалась задача репрезентации маршрута обработки представителя ряда деталей, отнесенных к определенному типу, или комплексной детали, сформированной для определенной группы в виде, максимально благоприятствующем синтезу технологического процесса из элементарных типовых решений.

В современных САПР ТП задача проектирования технологических процессов обычно решается с использованием двух подходов [16]:

- работа с универсальными технологическими справочниками (УТС): технологический процесс формируется из отдельных фрагментов – типовых решений, сохраненных в базе УТС. Фрагментом может служить как целый технологический процесс или его часть, так и отдельно взятая операция или переход;

- работа с приложениями «Дерево технологий»: проектирование сводится к копированию операций из аналоговых технологических процессов и последующему редактированию.

В нашем случае основа системного классификатора структурно соответствовала схеме, характерной для работы с УТС. Основу для графической части составило описание набора типовых решений и условий их применимости.

Технологический маршрут, изображенный в виде древовидной структуры (рис. 3), представляет собой маршрут обработки комплексной детали. При составлении маршрута обработки деталей, входящих в группу, выбор ветви дерева, по которой осуществляется движение, с включением в составляемый маршрут или удалением избыточных технологических операций производится в зависимости от наличия или отсутствия фасок и отверстий на деталях, а также в зависимости от наличия механической обработки.

Направлениям движения по отдельным ветвям присвоены коды. На первой операции (термическая резка) все детали вырезаются из листового материала и им присваивается код 1. Затем детали анализируются на наличие сквозных отверстий. Детали с отверстиями кодируются номером 1.1, а детали без отверстий кодируются номером 1.2. Для деталей с отверстиями вводятся операции разметки и вырезки отверстий. Далее каждая группа деталей рассматривается на наличие или отсутствие фасок (наличие разделки кромок под дальнейшую сварку при сборке).

Деталям без фасок присваивается дополнительный индекс 1, т. е. 1.1.1 или 1.2.1, а деталям, у которых фаски имеются, присваивается индекс 2, т. е. 1.1.2 или 1.2.2. К деталям, у которых предусмотрена разделка кромок (1.1.2 и 1.2.2), применяются операции разметки фасок и их обработка на операции термической резки. Затем все детали независимо от наличия отверстий и

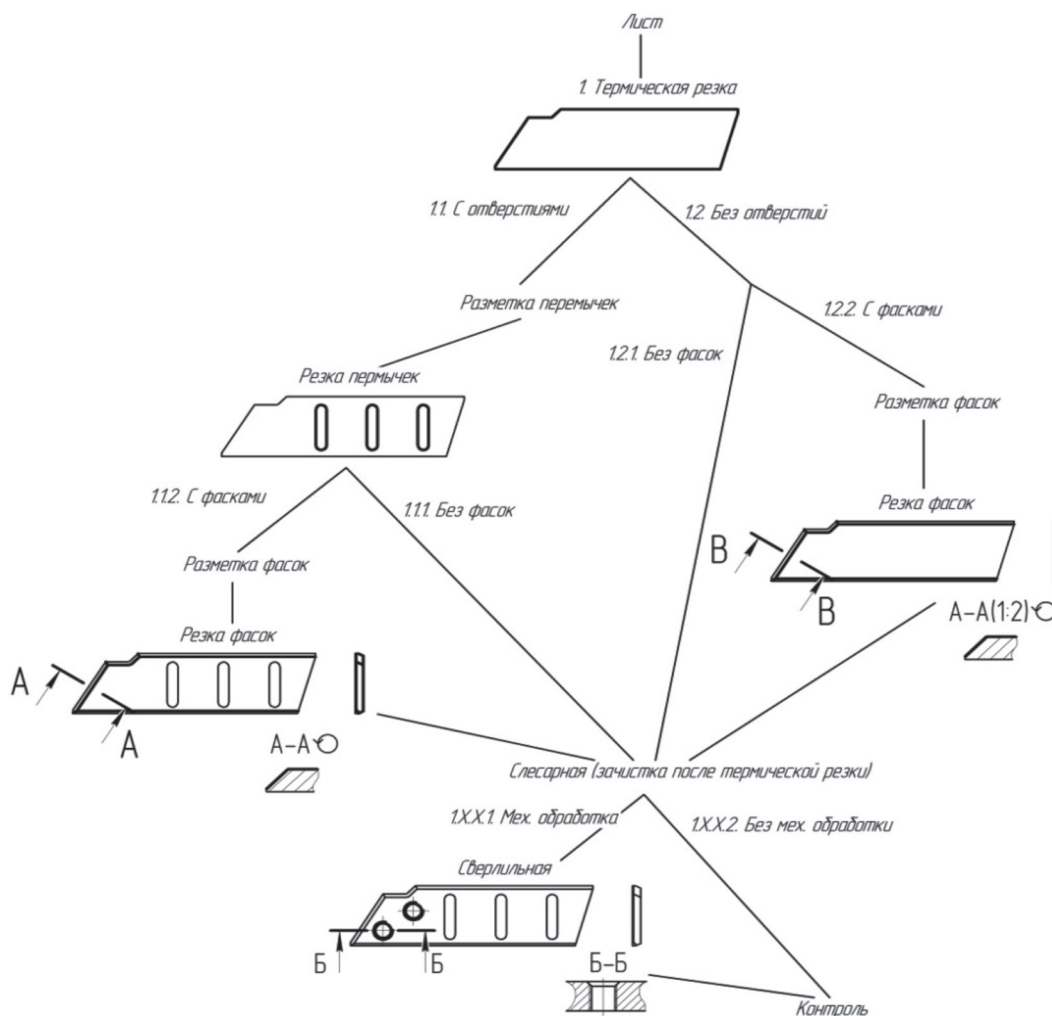


Рис. 3. Маршрут обработки комплексной детали

фасок проходят через слесарную операцию, где производится их зачистка после термической резки. Также в группе имеются детали, у которых предусматривается механическая обработка отверстий (сверление, нарезание резьбы) либо фрезерование пазов. То есть после слесарной обработки все детали опять делятся на две группы: детали с механической обработкой поверхностей (присваиваем дополнительно индекс 1, т. е. 1.X.X.1) и детали, у которых отсутствует механическая обработка (присваиваем дополнительно индекс 2, т. е. 1.X.X.2). Весь технологический процесс завершает операция контроля готовых деталей.

Например, если у детали присутствуют все элементы: сквозные отверстия, фаски, резьбовые отверстия, то такой детали можно присвоить код 1.1.2.1. Технолог, получая задание на проектирование технологического процесса, определяет, к какой группе относится деталь, и присваивает ей код. Затем по выбранной цепочке классификато-

ра определяет маршрут обработки, исключая ненужные операции. При этом экономится время на проектирование технологического процесса и в общем на технологическую подготовку производства.

Таким образом, приведенные методики показывают, что при разработке технологического процесса на новую деталь устанавливается ее принадлежность к определенному типу, т. е. к совокупности деталей, имеющих в данных производственных условиях общую структуру операций и переходов, или к определенной группе, характеризующейся общностью оборудования и наладки. Технологический маршрут конкретной детали, отнесенной к определенному типу или входящей в определенную группу, формируется путем выбора операций обработки элементарных поверхностей, имеющих у данной детали, из маршрута, составленного для типового представителя или комплексной детали.

## Выводы

Разработка системных классификаторов маршрутных технологических процессов изготовления деталей дает возможность в условиях единичного и мелкосерийного производства увеличить объем выпуска изделий по приведенной программе. Это позволяет проектировать и использовать специальную оснастку, включая переналаживаемую, при изготовлении деталей, увеличив точность и производительность процесса при обработке. Сокращается номенклатура универсальной оснастки и оборудования, а также сроки технологической подготовки производства в плане проектирования технологического процесса.

Проделанная работа составляет основу для повышения эффективности технологической подготовки производства, расширения системы материально-технического обеспечения производства, дальнейшего расширения нормативной справочной базы, общего повышения уровня производственной культуры сотрудников.

## Список литературы

1. Григорьев М.Н., Уваров С.А. Логистика. Базовый курс – М.: Юрайт, 2011. – 782 с. – ISBN: 978-5-9916-0755-1.
2. Смаковский М.С. Современные технологические возможности повышения рентабельности производства судового машиностроения на примере механообрабатывающего участка ОАО «АРМАЛИТ-1» // Морской вестник. – 2012. – № 2. – С. 39–42.
3. Аксенов В.В., Вальтер А.В. Специфика геохода как предмета производства // Научное обозрение. – 2014. – № 8–3. – С. 945–949.
4. Технологические процессы в машиностроении / А.Г. Схиртладзе, С.И. Богодухов, Р.М. Сулейманов, Е.В. Бондаренко, А.Д. Проскурин. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
5. Complexity in engineering design and manufacturing / W. ElMaraghy, H. ElMaraghy, T. Tomiyama, L. Monostori // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 61, iss. 2. – P. 793–814. – doi: 10.1016/j.cirp.2012.05.001.
6. Wahab M.I.M., Stoyan S.J. A dynamic approach to measure machine and routing flexibilities of manu-

facturing systems // International Journal of Production Economics. – 2008. – Vol. 113, iss. 2. – P. 895–913. – doi: 10.1016/j.ijpe.2007.12.001.

7. Митрофанов С.П. Групповая технология машиностроительного производства. В 2 т. Т. 1. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1983. – 403 с.

8. Митрофанов С.П. Групповая технология машиностроительного производства. В 2 т. Т. 2. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1983. – 375 с.

9. Gallagher C.C., Knight W.A. Group technology, production methods in manufacturing. – Harlow, United Kingdom: Ellis Horwood, 1986. – 190 p. – ISBN-10: 0745800467. – ISBN-13: 9780745800462.

10. Uddin M.K., Shanker K. Grouping of parts and machines in presence of alternative process routes by genetic algorithm // International Journal of Production Economics. – 2002. – Vol. 76, iss. 3. – P. 219–228. – doi: 10.1016/S0925-5273(01)00164-5.

11. A system based on machined volumes to reduce the number of route sheets in process planning / J. Ciurana, M.L. Garcia-Romeu, R. Castro, M. Alberti // Computers in Industry. – 2003. – Vol. 51 iss. 1. – P. 41–50. doi: 10.1016/S0166-3615(03)00024-1.

12. Ласуков А.А., Навроцкий С.С. Системный классификатор маршрутных технологических процессов изготовления деталей типа «Вал» в условиях ООО «Юргинский машзавод» // Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса: материалы III Международной научно-практической конференции, г. Новокузнецк, 28–30 ноября 2013 г. – Новокузнецк: филиал КузГТУ в г. Новокузнецке, 2013. – С. 348–351.

13. Resource-efficient workflow scheduling in clouds / Y.C. Lee, H. Han, A.Y. Zomaya, M. Yousif // Knowledge-Based Systems. – 2015. – Vol. 80. – P. 153–162. – doi: 10.1016/j.knosys.2015.02.012.

14. Боярский В.Г., Сихимбаев М.Р., Шеров К.Т. Переналаживаемая технологическая оснастка для групповой обработки // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 12–3. – С. 542–547.

15. Аксенов В.В., Вальтер А.В., Бегляков В.Ю. Обеспечение геометрической точности обочочки при сборке секций геохода // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 4 (65). – С. 19–28.

16. Андриченко А.С. «Вертикаль» – новое поколение технологических САПР: объектный подход // САПР и графика. – 2005. – № 6. – С. 8–10.

**OBRABOTKA METALLOV**

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(68), July – September 2015, Pages 23–30

**The classifier of engineering processes of geokhod elements production****Lasukov A.A.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: lasukow@rambler.ru**Gromyko P.S.**, Student, e-mail: pasha.9.3@mail.ru

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

**Abstract**

The present day mechanical engineering is distinguished by intense introduction of new technical solutions, adoption of science-consuming technologies, and constantly changing situation on the market. In these conditions flexibility, mobility and universality are core standards of the production process. The conditions necessitate both quality characteristics of the products to be improved regularly and manufactured articles to be substituted frequently by the new ones. Therefore, preproduction engineering is to be subjected to considerable changes. Up-to-date facilities of design automation make it reasonable to use a modular approach to the design process, when a product is made up of structural modules – uniform fabricated elements. The range of structural modules is far smaller than that of the products they can be used to manufacture. A main-line direction in classifier development is to describe a wide range of structural modules. The paper provides consideration of problems of preproduction engineering improvement, when a single-part or small-scale production of a new product (geokhod is taken as an example) is developed. The structure of products is analyzed; the latter have been arranged in groups according to structural and technological characteristics, as the consequence, the graph of complex product machining is developed with regard to particular structural characteristics. Code numbers are given to directions along the particular branches; afterwards these code numbers are used to form a code of a particular product. The process flow of the product under consideration is developed via selecting operations to treat plain surfaces (this product has them) from the flow, made for a standard product. The presented classifier makes the basis to improve efficiency of preproduction engineering, to widen the system of material and technical resources for the production process, and to further development of reference data and general improvement of production culture.

**Keywords:**

technological process, preproduction engineering, classifier of technological processes.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-23-30

**References**

1. Grigor'ev M.N., Uvarov S.A. *Logistika. Bazovyi kurs* [Logistics. Basic course]. Moscow, Yurait Publ., 2011. 782 p. ISBN: 978-5-9916-0755-1
2. Smakovsky M.S. Sovremennye tekhnologicheskie vozmozhnosti povysheniya rentabel'nosti proizvodstva sudovogo mashinostroeniya na primere mekhanooobrabatyvayushchego uchastka OAO "ARMALIT-1" [Modern technological opportunities to increase profitability of marine engineering on example of machining shop of the OJSC "Armalit-1"], *Morskoi vestnik – Morskoy vestnik*, 2012, no. 2 (42), pp. 39–42.
3. Aksenov V.V., Valter A.V. Spetsifika geokhoda kak predmeta proizvodstva [Specificity of a geo-tunneler as an object of production]. *Nauchnoe obozrenie – Science Review*, 2014, no. 8–3, pp. 945–949.
4. Bogodukhov S.I., Bondarenko E.V., Skhirtladze A.G., Suleimanov R.M., Proskurin A.D. *Tekhnologicheskie protsessy v mashinostroenii* [Manufacturing processes in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 640 p. ISBN: 978-5-217-03408-6
5. ElMaraghy W., ElMaraghy H., Tomiyama T., Monostori L. Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2012, vol. 61, iss. 2, pp. 793–814. doi: 10.1016/j.cirp.2012.05.001
6. Wahab M.I.M., Stoyan S.J. A dynamic approach to measure machine and routing flexibilities of manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 2008, vol. 113, iss. 2, pp. 895–913. doi: 10.1016/j.ijpe.2007.12.001

7. Mitrofanov S.P. *Gruppovaya tekhnologiya mashinostroitel'nogo proizvodstva*. V 2 t. T. 1 [Group technology engineering production. In 2 vol. Vol. 1]. 3<sup>rd</sup> ed. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1983. 403 p.
8. Mitrofanov S.P. *Gruppovaya tekhnologiya mashinostroitel'nogo proizvodstva*. V 2 t. T. 2 [Group technology engineering production. In 2 vol. Vol. 2]. 3<sup>rd</sup> ed. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1983. 375 p.
9. Gallagher C.C., Knight W.A. *Group technology production methods in manufacturing*. Harlow, United Kingdom, Ellis Horwood Ltd., 1986. 190 p. ISBN-10: 0745800467, ISBN-13: 9780745800462
10. Uddin M.K., Shanker K. Grouping of parts and machines in presence of alternative process routes by genetic algorithm. *International Journal of Production Economics*, 2002, vol. 76, iss. 3, pp. 219–228. doi: 10.1016/S0925-5273(01)00164-5
11. Ciurana J., Garcia-Romeu M.L., Castro R., Alberti M. A system based on machined volumes to reduce the number of route sheets in process planning. *Computers in Industry*, 2003, vol. 51, iss. 1, pp. 41–50. doi: 10.1016/S0166-3615(03)00024-1
12. Lasukov A.A., Navrotskii S.S. [System classifier of routing manufacturing processes of parts such as “Shaft” in a LLC “Yurginsky machine engineering plant”]. *Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Perspektivy razvitiya i bezopasnost' avtotransportnogo kompleksa”* [Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference “Prospects for development and safety of the transport complex”]. Novokuznetsk, 2013, pp. 348–351.
13. Lee Y.C., Han H., Zomaya A.Y., Yousif M. Resource-efficient workflow scheduling in clouds. *Knowledge-Based Systems*, 2015, vol. 80, pp. 153–162. doi: 10.1016/j.knosys.2015.02.012
14. Boyarsky V.G., Sikhimbayev M.R., Sherov K.T. Perenalazhivaemaya tekhnologicheskaya osnastka dlya gruppovoi obrabotki [Readjustable technological equipment for group treatment]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental research*, 2011, no. 12–3, pp. 542–547.
15. Aksenov V.V., Walter A.V., Beglyakov V.Yu. Obespechenie geometricheskoi tochnosti obolochki pri sborke sektsii geokhoda [Ensuring the geometric accuracy of shell during assembly of Geohod sections]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 4 (65), pp. 19–28.
16. Andrichenko A.S. «Vertikal'» – novoe pokolenie tekhnologicheskikh SAPR: ob'ektnyi podkhod [“Vertical” – the new generation of CAD technology: the object orientation]. *SAPR i grafika – CAD and Graphics*, 2005, no. 6, pp. 8–10.

### Funding

The results achieved in the implementation of an integrated project funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. Contract N 02.G25.31.0076.

### Article history:

Received 20 May 2015

Revised 20 June 2015

Accepted 17 July 2015



# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ АЛМАЗНОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ\*

*В.Ю. СКИБА, канд. техн. наук, доцент  
В.Н. ПУШНИН, аспирант  
Д.Ю. КОРНЕВ, магистр  
К.А. ПАРЦ, студентка  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 1 июня 2015

Рецензирование 2 июля 2015

Принята к печати 27 июля 2015

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

**Цель:** Формирование требуемых эксплуатационных характеристик деталей машин в основном обеспечивается на завершающей стадии технологического процесса их производства. В связи с этим ставится задача исследовать особенности обеспечения параметров качества поверхностного слоя изделий, достигаемых на последнем переходе – алмазном выглаживании – комплексированной обработки. **Методы:** Эксперименты проводились на токарном станке, оснащённом дополнительным источником энергии, в качестве которого использовался выносной закалочный контур, реализующий высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты. Структурные исследования производили с применением оптической и растровой микроскопии. Напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя детали оценивали посредством механического и рентгеновского методов определения остаточных напряжений. Оценку шероховатости поверхности производили на профилограф-профилометрах Form Talysurf Series 2 и Zygo New View 7300. **Результаты и об-суждение:** Установлено, что при алмазном выглаживании образцов из стали 45 в условиях предложенного принципа интегрирования, позволяющего осуществить обработку деталей от одной технологической базы, становится возможным повысить поверхностную микротвёрдость и уровень остаточных напряжений сжатия, достигнутых на переходе поверхностной закалки токами высокой частоты. Экспериментально подтвержде-но, что после алмазного выглаживания в поверхностно-закалённом образце формируется упрочнённый (на-клепаный) слой толщиной 0,01...0,02 мм, микротвёрдость которого составляет ~ 868 HV, при этом уровень сжимающих напряжений в поверхностном слое возрастает до значений  $\sigma_{\tau} = -678 \pm 20$  МПа. Определён раци-ональный диапазон изменения силы выглаживания  $P_y \in [100; 150]$  Н, в котором гарантировано минимальное значение параметра шероховатости  $Ra = 0,18 \pm 0,08$  мкм. Получены функциональные зависимости параметра Ra от режимов обработки, которые можно рекомендовать к использованию при назначении режимов алмаз-ного выглаживания исходя из обеспечения высокой производительности и требуемой шероховатости поверх-ности.

**Ключевые слова:** комплексирование, алмазное выглаживание, режимы обработки, шероховатость, твёр-дость, остаточные напряжения.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-31-41

\* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта, выполняемого в рамках гранта РФФИ в 2015 г. и в плановом периоде в 2013–2015 гг. (Номер проекта 13-08-01102 А «Проектно-исследовательская разработка технологической установки для плазменно-механической обработки деталей машин»).

## Введение

Обеспечение выпуска конкурентоспособной и качественной продукции является основным направлением развития современного машиностроения. В связи с этим в станкостроении отчетливо наблюдается особый интерес к разработке нового типа технологического оборудования – гибридных обрабатывающих комплексов, обладающих полифункциональными возможностями [1–6]. Комплексирование различных процессов в одном станке: лазерная поверхностная закалка в сочетании с механической обработкой [7, 8], абразивное шлифование – поверхностная закалка [9–11], резание – закалка [12], точение – шлифование, обусловлено стремлением разработчиков к расширению технологических возможностей станков и обеспечение их автономной работы в гибком машиностроительном производстве [13, 14]. Данный прием позволяет не только достигнуть высоких показателей ресурсо- и энергосбережения, но и обеспечить соответствующий уровень производительности обработки и качества детали [15]: точности формы, размеров и взаимного расположения поверхностей, шероховатости и заданных физико-механических свойств поверхностных слоев и материала.

Объектом данных исследований является технологический процесс изготовления деталей машин, состоящий из операций: предварительная механическая обработка (черновое точение), поверхностная закалка (высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты) и финишная механическая обработка (чистовое точение и алмазное выглаживание).

Поскольку именно финишные операции формируют в поверхностном слое детали оптимальное сочетание параметров качества (шероховатость, величина и характер распределения микротвердости и остаточных напряжений, микроструктура поверхностного слоя и др.), определяющих эксплуатационные характеристики изделия [16–20], то целью работы является исследование качества поверх-

ностного слоя, достигаемое при алмазном выглаживании в условиях комплексированной обработки.

## Методика экспериментального исследования

В качестве образцов использовался цилиндрический пруток (рис. 1) (диаметр  $d = 50$  мм, длина  $l = 70$  мм), изготовленный из стали 45. Состав исходного материала проверялся оптико-эмиссионным спектрометром ARL 3460. Результаты анализа представлены в таблице.

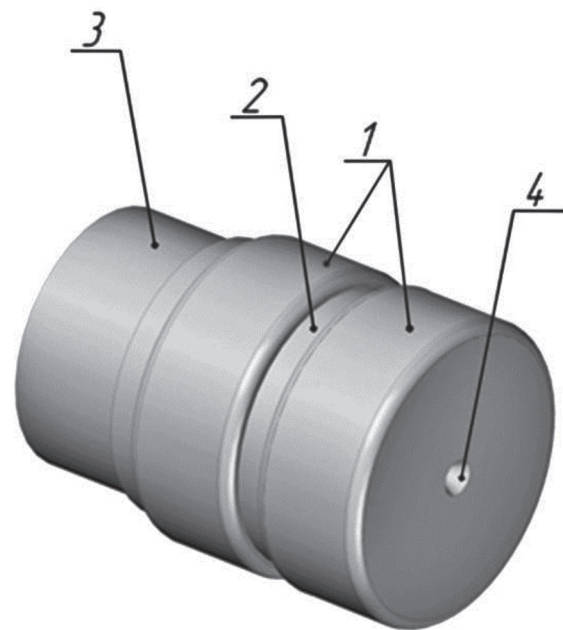


Рис. 1. Исследуемый образец:

1 – обрабатываемые поверхности (по 20 мм);  
2 – разделительная канавка (5 мм); 3 – шейка для закрепления (20 мм); 4 – отверстие центровое

### Химический состав исходного материала

Материал	Массовая доля элемента, %							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
45	0,44	0,23	0,61	0,013	0,019	0,11	0,15	0,17

Для интеграции процессов механической и поверхностной термической обработок была произведена модернизация токарно-винторезного станка модели УТ16ПМ, заключающаяся в оснащении станочной системы дополнительным концентрированным источником энергии, в качестве которого использован выносной закалочный контур, реализующий высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты

(ВЭНТВЧ), характеризующийся высоким термическим коэффициентом полезного действия. В качестве источника энергии использовали генератор ВЧГ 6 – 60/0,44 с рабочей частотой тока  $\omega = 440 \cdot 10^3$  Гц.

При токарной обработке, закалке ВЭН ТВЧ и алмазном выглаживании закрепление образца осуществлялось в трёхкулачковом патроне с поджатием центром задней бабки станка.

Черновое точение осуществлялось проходным резцом с СМП (материал режущей пластины Т15К6) на следующих режимах:  $V_d \approx 92$  м/мин ( $n_d = 588$  мин<sup>-1</sup>);  $S_o = 0,35$  мм/об.;  $t = 1$  мм.

При поверхностной закалке использовался индуктор петлевого типа, оснащенный ферритом марки N87. Процесс нагрева осуществлялся по глубинной схеме (толщина упрочненного слоя не превышала глубины проникновения тока в горячий металл – 0,6...0,8 мм) непрерывно-последовательным способом [21, 22]. Исследования проводились при использовании интенсивного водяного душевого охлаждения поверхности в следующем диапазоне режимов обработки: удельная мощность источника  $q_{\text{и}} = (1,5 - 4,0) \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>, скорость перемещения детали под индуктором  $V_d = (0,05...0,1)$  м/с (соответствует  $n_d = 19,9...39,8$  мин<sup>-1</sup>). Ширина активного провода индуктора составляла  $B_{\text{и}} = 2$  мм, обработка осуществлялась с зазором  $\Delta = 0,1...0,2$  мм.

Чистовое точение производилось проходным резцом с СМП (материал сменной пластины – оксикарбидная керамика на основе композиции Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC). Режимы резания:  $V_d \approx 133$  м/мин ( $n_d = 882$  мин<sup>-1</sup>);  $S_o = 0,025$  мм/об.;  $t = 0,01...0,015$  мм. При черновом и чистовом точении в качестве смазывающе-охлаждающего технологического средства (СОТС) использовалась осерненное минеральное масло «Сульфозфрезол».

Алмазное выглаживание осуществлялось по двухпроходной схеме при использовании спроектированной и изготовленной державки с упругой головкой, в которую устанавливались алмазные наконечники (ТУ2-037-631-88) радиусом  $R = 1$  мм. Радиальная составляющая силы выглаживания  $P_y$  с учетом жесткости данного технологического оборудования, твердости поверхностного слоя обрабатываемой детали после поверхностной закалки ВЭН ТВЧ ( $HV = 700...800$ ) и радиуса алмазной сферы соответственно была равна: 50, 100, 150, 200 Н. При

этом окружная скорость заготовки составляла  $V_{\text{выгл}} = 25,3; 33,2; 41,9$  м/мин ( $n_d = 168; 220; 278$  мин<sup>-1</sup>); а величины подачи –  $S_{o \text{ выгл}} = 0,018...0,08$  мм/об. В качестве СОТС при алмазном выглаживании использовалось индустриальное масло марки И-20А.

Структурные исследования образцов были проведены на оптическом микроскопе *Carl Zeiss Axio Observer Z1m* и на растровом электронном микроскопе *Carl Zeiss EVO 50 XVP*, оснащенном энергодисперсионным анализатором *INCA X-ACT (Oxford Instruments)*. Микроструктура образцов выявлялась травлением 5 %-м спиртовым раствором азотной кислоты, а также насыщенным раствором пикриновой кислоты в этиловом спирте с добавлением поверхностно активных веществ [23].

Микротвердость упрочненного поверхностного слоя деталей оценивали на приборе *Wolpert Group 402MVD*. Исследования остаточных напряжений проводились с использованием рентгеновского метода на дифрактометре высокого разрешения *ARL X'TRA* и механического разрушающего метода – послойного электролитического травления образца [24, 25]. Для выявления дефектов поверхностного слоя на каждом переходе использовались: визуально-оптический метод с применением микроскопа *Carl Zeiss Axio Observer A1m*, капиллярный метод, токовихревой метод с применением вихретокового дефектоскопа ВД – 70. В исследовании для одновременного измерения отклонений формы, волнистости и шероховатости поверхности применялся профилограф-профилометр *Form Talysurf Series 2* фирмы *Taylor Hobson*. Оценку топографии поверхности производили на лазерном профилографе-профилометре *Zygo New View 7300*.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований производилась в программных продуктах *Statistica, Table Curve 2D u Table Curve 3D*.

## Результаты и обсуждение

Исследования качества поверхности после первого перехода интегральной обработки показали, что в процесс чернового точения формируется бездефектная поверхность, значение шероховатости которой по параметру Ra составляет  $3,3 \pm 0,7$  мкм.

На втором переходе – поверхностная закалка ВЭН ТВЧ – при обеспечении требуемой глубины упрочнения  $h = 0,6$  мм и рационального характера распределения остаточных напряжений определены удельной мощности ( $q_{и}$  [Вт/м<sup>2</sup>]) и скорости перемещения источника ( $V_{д}$  [м/с]) осуществлялось посредством решения системы уравнений  $h(q_{и}, V_{д})$  и  $\Psi(q_{и}, V_{д})$  [26, 27]:

$$\begin{cases} h(q_{и}, V_{д}) = a + bV_{д} + cq_{и} + dV_{д}^2 + eq_{и}^2 + \\ + fV_{д}q_{и} + gV_{д}^3 + hq_{и}^3 + iV_{д}q_{и}^2 + jV_{д}^2q_{и}, \\ \Psi(q_{и}, V_{д}) = k + lV_{д} + mq_{и} + nV_{д}^2 + oq_{и}^2 + \\ + pV_{д}q_{и} + rV_{д}^3 + sq_{и}^3 + tV_{д}q_{и}^2 + uV_{д}^2q_{и}, \\ 0,25 \leq \Psi(q_{и}, V_{д}) \leq 0,35, \end{cases}$$

где  $a = 0,426008$ ;  $b = 2,827121$ ;  $c = 3,025072 \cdot 10^{-9}$ ;  $d = -301,591960$ ;  $e = -4,694423 \cdot 10^{-18}$ ;  $f = 3,600666 \cdot 10^{-8}$ ;  $g = 1953,668810$ ;  $h = 3,216427 \cdot 10^{-27}$ ;  $i = 1,375401 \cdot 10^{-17}$ ;  $j = -3,779403 \cdot 10^{-7}$ ;  $k = 0,087564$ ;  $l = -7,429933$ ;  $m = 1,062284 \cdot 10^{-8}$ ;  $n = 235,19293$ ;  $o = -3,424286 \cdot 10^{-17}$ ;  $p = -8,850919 \cdot 10^{-8}$ ;  $r = -1309,3045$ ;  $s = 2,9423 \cdot 10^{-26}$ ;  $t = 1,403793 \cdot 10^{-16}$ ;  $u = 1,010925 \cdot 10^{-7}$  – значения коэффициентов функциональных зависимостей для стали 45.

На рис. 2 представлено графическое решение данной задачи. При закалке стали 45 на глубину 0,6 мм диапазон рекомендуемых режимов ограничен на кривой точками *A* и *B*: при этом  $q_{и} = (3,0 \dots 3,4) \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>,  $V_{д} = (0,072 \dots 0,081)$  м/с. Найденные режимы обработки (заштрихованная область) гарантируют получение необходимой глубины закалки и рациональную величину переходной зоны.

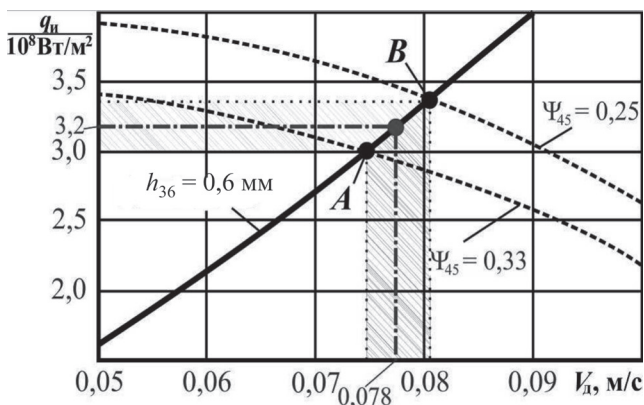


Рис. 2. Зависимость удельной мощности источника от его скорости движения при закалке ВЭН ТВЧ стали 45 на глубину  $h_{45} = 0,6$  мм

Настройку станочного оборудования производили на следующие режимы:  $q_{и} = 3,2 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> и  $V_{д} = 0,078$  м/с ( $n_{д} \approx 31$  мин<sup>-1</sup>). Для обеспечения требуемой частоты вращения шпинделя была произведена модернизация привода главного движения, заключающаяся в его оснащении частотным преобразователем *HF Inverter model F1500-G0015S2B*.

Характер распределения микротвердости образцов в поперечном сечении отражен на рис. 3. Микроструктура упрочненного слоя стали 45 представлена на рис. 4, *a*. Она представляет собой мартенсит и незначительное количество мелких ферритных зерен размерами до 10 мкм. Средний уровень микротвердости закаленного слоя после ВЭНТВЧ составил 739 НВ, при этом микротвердость материала основы находилась на уровне 204 НВ. Микроструктура переходной зоны около основного металла представляет собой зерна феррита размерами 20...30 мкм и низкоуглеродистый мартенсит (рис. 4, *б*). Ширина этой зоны ~0,17 мм. Наличие феррита и его строчечное расположение (как и в основном металле) свидетельствуют о том, что температура нагрева этой области находилась в интервале  $Ac_1 - Ac_3$ .

Распределение тангенциальных остаточных напряжений (ОН) по глубине упрочненного слоя представлено на рис. 5. Максимальный уровень сжимающих ОН на поверхности составил  $\sigma_{\tau} = -560 \pm 20$  МПа. При этом пик растягивающих

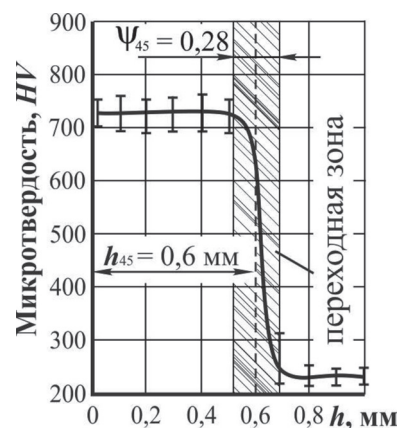
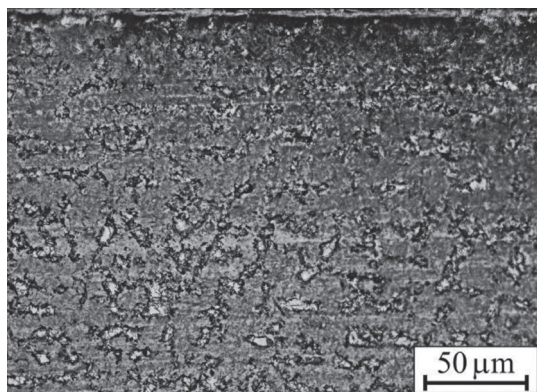
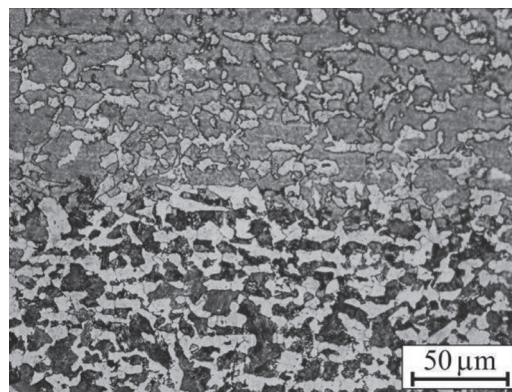


Рис. 3. Распределение микротвердости в поверхностном слое стали 45 после закалки ВЭН ТВЧ:

режим –  $q_{и} = 3,2 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>,  
 $V_{д} = 0,078$  м/с,  $B_{и} = 2$  мм



*a*



*б*

Рис. 4. Микроструктура поверхностного слоя стали 45 после поверхностной закалки ВЭН ТВЧ:

*a* – участок закаленного слоя; *б* – участок переходной зоны

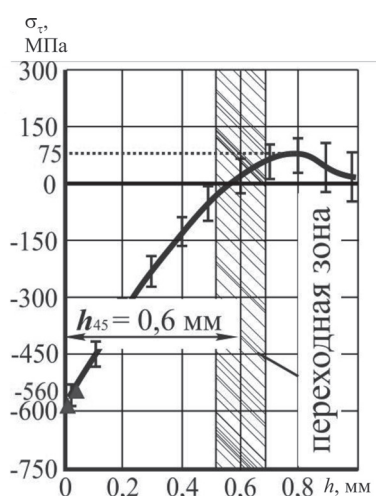


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое стали 45 после закалки ВЭН ТВЧ:

режим –  $q_{п} = 3,2 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>,  $V_{д} = 0,078$  м/с,  $B_{п} = 2$  мм; ▲ – остаточные напряжения, полученные рентгеновский методом определения

напряжений достиг уровня  $\sigma_{\tau} = 75 \pm 45$  МПа и находится на глубине  $\sim 0,8$  мм.

Чистовое точение осуществлялось в размер детали  $d = 48$  мм, при этом значение шероховатости поверхности по параметру Ra составляло  $1,2 \pm 0,2$  мкм. Поверхностная микротвердость и остаточные напряжения находились на уровне, достигнутом на переходе ВЭН ТВЧ.

В процессе алмазного выглаживания формируется пластически деформированная поверхность, топография которой характеризуется округлой формой микрорельефа, без задигов и вырывов.

На рис. 6 представлены зависимости влияния скорости  $V_{\text{выгл}}$  и подачи  $S_{\text{о выгл}}$  на параметр шероховатости Ra при различных значениях силы выглаживания  $P_y$ . Как видно из рисунков, увеличение  $V_{\text{выгл}}$  и  $S_{\text{о выгл}}$  в исследуемых диапазонах изменения режимных параметров приводит к повышению шероховатости поверхности. В большей степени оказывает свое влияние на рост микронеровностей именно изменение величины подачи  $S_{\text{о выгл}}$ .

При исследовании влияния силы выглаживания было выявлено, что на участке от 50 Н до 100 Н наблюдается интенсивное уменьшение параметра шероховатости Ra (рис. 7). В интервале [100Н; 150Н] стабилизируется значение параметра Ra на уровне  $0,18 \pm 0,08$  мкм: исходные микронеровности практически полностью нивелируются и шероховатость поверхности зависит только от параметров  $V_{\text{выгл}}$  и  $S_{\text{о выгл}}$ . Для значений  $P_y = 100$  Н и  $P_y = 150$  Н была определена функциональная зависимость Ra ( $V_{\text{выгл}}$ ;  $S_{\text{о выгл}}$ ):

$$\begin{aligned} Ra(V_{\text{выгл}}, S_{\text{о выгл}}) = & a + bV_{\text{выгл}} + \\ & + cS_{\text{о выгл}} + dV_{\text{выгл}}^2 + eS_{\text{о выгл}}^2 \\ & + fV_{\text{выгл}}S_{\text{о выгл}} + gV_{\text{выгл}}^3 + hS_{\text{о выгл}}^3 + \\ & + iV_{\text{выгл}}S_{\text{о выгл}}^2 + jV_{\text{выгл}}^2S_{\text{о выгл}}, \end{aligned}$$

где

для  $P_y = 100$  Н:

$$\begin{aligned} a = 0,098931, \quad b = -0,00422, \quad c = 2,512088, \\ d = 0,000135, \quad e = -23,857743, \quad f = 0,020124, \\ g = -1,326322 \times 10^{-6}, \quad h = 105,49039, \quad i = -0,028432, \\ j = -0,000193; \end{aligned}$$

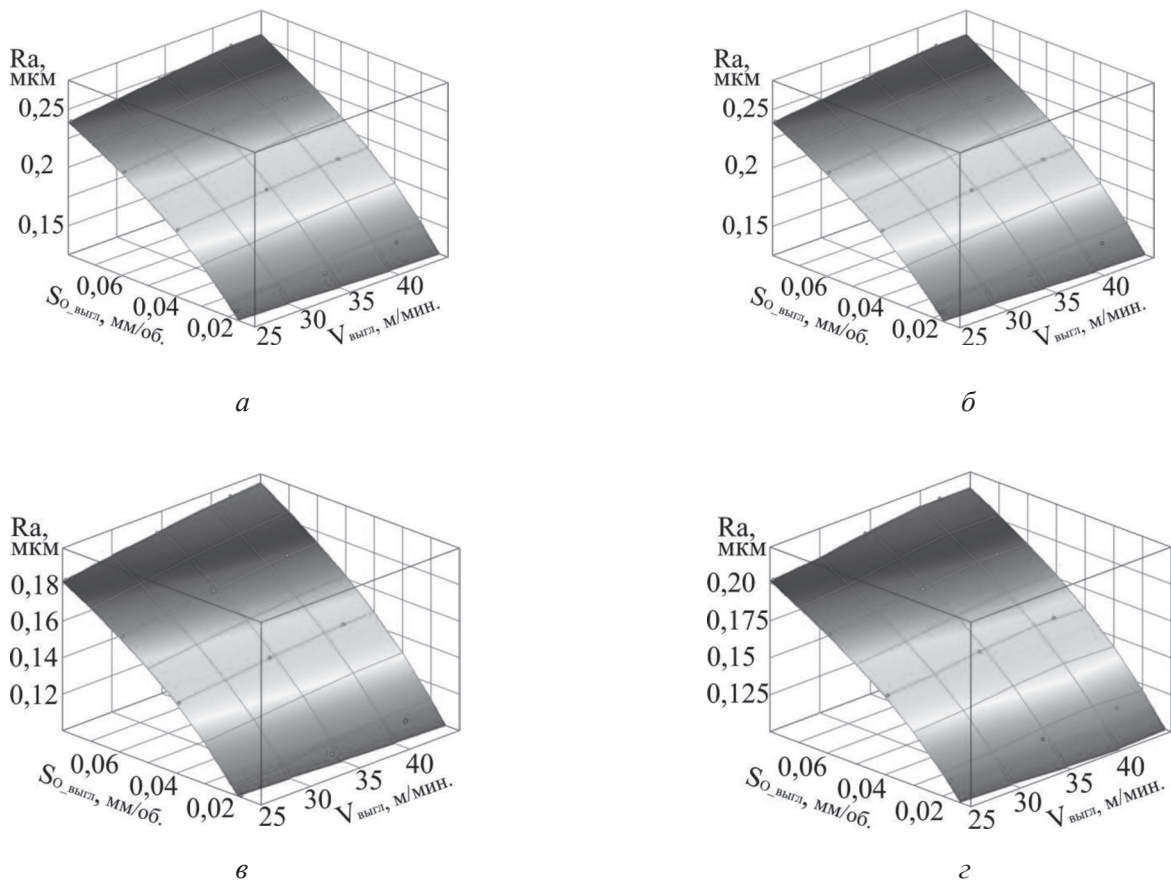


Рис. 6. Зависимости параметра шероховатости  $R_a$  от скорости резания  $V_{\text{выгл}}$  и подачи  $S_{\text{о выгл}}$  при постоянных значениях силы выглаживания:

$$a - P_y = 50 \text{ Н}; \text{ б} - P_y = 100 \text{ Н}; \text{ в} - P_y = 150 \text{ Н}; \text{ г} - P_y = 200 \text{ Н}$$

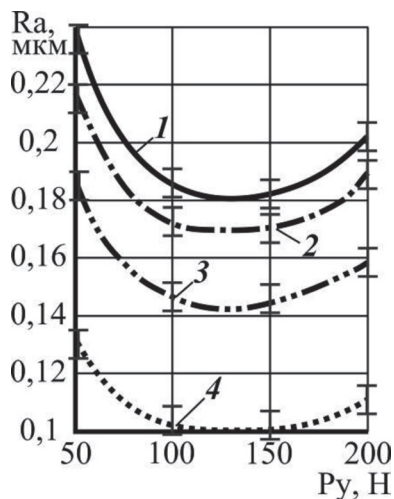


Рис. 7. Зависимость параметра шероховатости  $R_a$  от силы выглаживания  $P_y$ :

$$\begin{aligned} 1 - V_{\text{выгл}} &= 25,3 \text{ м/мин}, S_{\text{о выгл}} = 0,08 \text{ мм/об}; \\ 2 - V_{\text{выгл}} &= 33,2 \text{ м/мин}, S_{\text{о выгл}} = 0,06 \text{ мм/об}; \\ 3 - V_{\text{выгл}} &= 33,2 \text{ м/мин}, S_{\text{о выгл}} = 0,04 \text{ мм/об}; \\ 4 - V_{\text{выгл}} &= 25,3 \text{ м/мин}, S_{\text{о выгл}} = 0,018 \text{ мм/об} \end{aligned}$$

для  $P_y = 150 \text{ Н}$ :

$$\begin{aligned} a &= 0,070639, \quad b = -0,002061, \quad c = 2,729073, \\ d &= 7,897542 \times 10^{-5}, \quad e = -23,406582, \quad f = 0,005446, \\ g &= -8,396753 \times 10^{-7}, \quad h = 92,631383, \quad i = -0,001955, \\ j &= -1,421271 \times 10^{-5}. \end{aligned}$$

Дальнейшее повышение значений  $P_y$  способствует только увеличению параметра  $R_a$ . Данные результаты хорошо согласуются с материалами, представленными в [28–30].

Минимальное значение параметра шероховатости  $R_a$ , которое было зафиксировано при обработке на режимах  $V_{\text{выгл}} = 25,3 \text{ м/мин}$ ;  $S_{\text{о выгл}} = 0,018 \text{ мм/об}$ ;  $P_y = 150 \text{ Н}$ , составляло  $\sim 0,1 \text{ мкм}$  (рис. 8). Структурные исследования на растровом электронном микроскопе показали, что в процессе алмазного выглаживания в поверхностно закаленном образце формируется упрочненный (наклепанный) слой толщиной  $0,01 \dots 0,02 \text{ мм}$  (рис. 9). При этом происходит повышение микротвердости и увеличение уровня сжимающих напряжений в поверхностном слое до значений  $868 \text{ НВ}$  и  $\sigma_{\tau} = -678 \pm 20 \text{ МПа}$  соответственно (рис. 10).

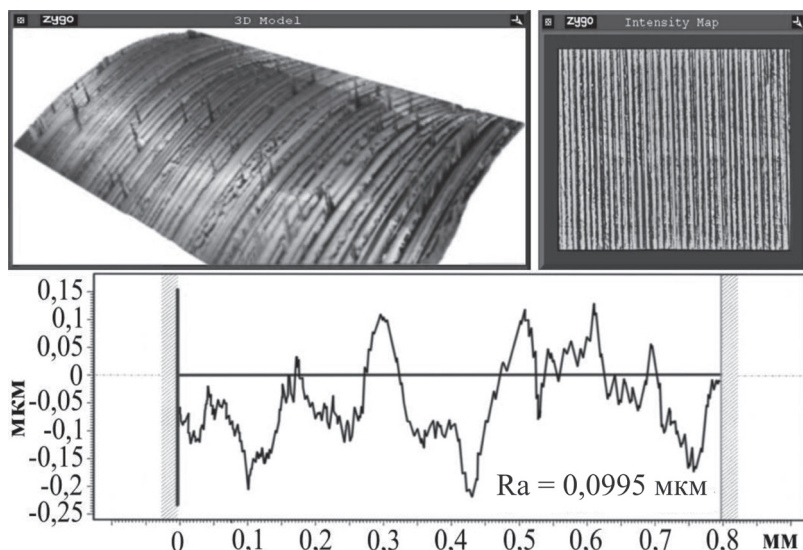


Рис. 8. Топография и профилограмма поверхности детали после алмазного выглаживания:

$$V_{\text{выгл}} = 25,3 \text{ м/мин}; S_{\text{о выгл}} = 0,018 \text{ мм/об.}; P_y = 150 \text{ Н}; R = 1 \text{ мм};$$

$$Ra_{\text{исх}} = 1,2 \pm 0,2 \text{ МКМ}; HV_{\text{исх}} = 739$$

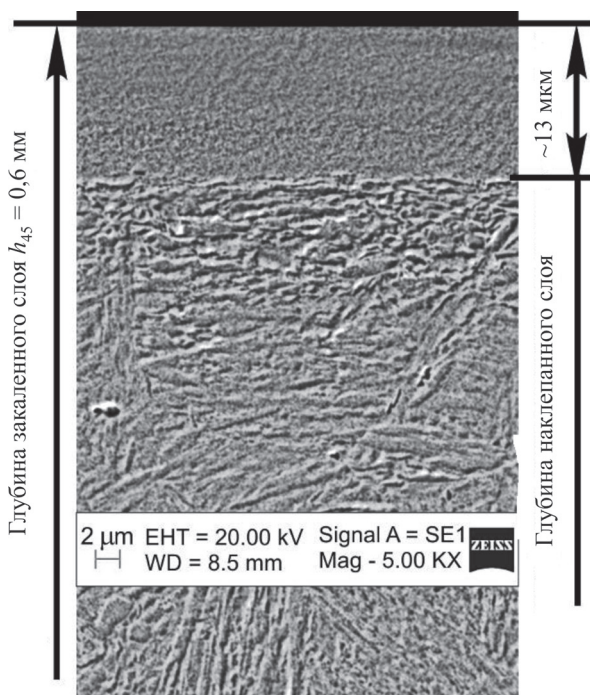


Рис. 9. Микроструктура поверхностного слоя после алмазного выглаживания

### Выводы

Проведенные исследования показали, что алмазное выглаживание, выполняемое в рамках интегрированной обработки, позволяет существенно повысить качество поверхностного слоя деталей машин. Экспериментально установлено, что при выполнении завершающего

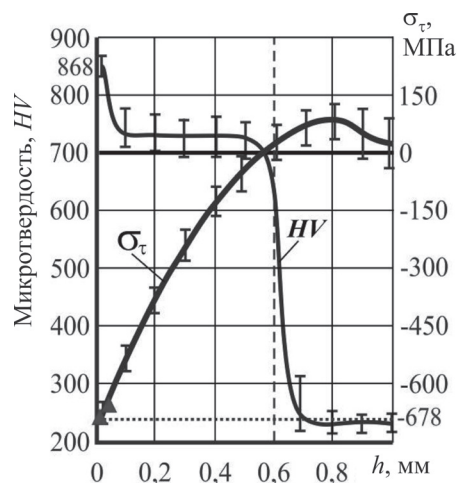


Рис. 10. Распределение микротвердости и остаточных напряжений в поверхностном слое стали 45 после алмазного выглаживания:

▲ – остаточные напряжения, полученные рентгеновский методом определения

перехода по отношению к переходу ВЭН ТВЧ становится возможным повысить поверхностную микротвердость и уровень остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое изделия на ~15...20 %. Выявлено, что после алмазного выглаживания в поверхностно-закаленном образце формируется наклепанный слой толщиной 0,01...0,02 мм, микротвердость которого состав-

ляет  $\sim 868$  HV, при этом уровень сжимающих напряжений в поверхностном слое возрастает до значений и  $\sigma_{\tau} = -678 \pm 20$  МПа. Определен рациональный диапазон изменения силы выглаживания  $P_y \in [100 \text{ Н}; 150 \text{ Н}]$ , в котором гарантировано минимальное значение параметра шероховатости  $Ra = 0,18 \pm 0,08$  мкм. Полученная функциональная зависимость  $Ra(V_{\text{выгл}}, S_{\text{о выгл}})$  позволит назначать режимы алмазного выглаживания исходя из обеспечения высокой производительности и требуемой шероховатости поверхности.

### Список литературы

1. Макаров В.М. Комплексированные технологические системы: перспективы и проблемы внедрения // Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2011. – № 6 (64). – С. 20–23.
2. Moriwaki T. Multi-functional machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 57, iss. 2. – P. 736–749. – doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.
3. Garro O., Martin P., Veron M. Shiva a multiarms machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1993. – Vol. 42, iss. 1. – P. 433–436. – doi: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.
4. Nagae A. Development trend of multi-tasking machines // Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Machine Tool Engineers, Tokyo, Japan, November 3–5, 2004. – Tokyo, 2004. – P. 312–323.
5. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeebe, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 30, iss. 12. – P. 1408–1411. – doi: 10.1080/10426914.2014.973595.
6. Hybrid processes in manufacturing / B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A.E. Tekkaya, R. Neugebauer, D. Mcintosh // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 63, iss. 2. – P. 561–583. – doi: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.
7. Multi-technology platform for hybrid metal processing / C. Brecher, F. Hoffmann, A. Karlberger, C.-J. Rosen // Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier: the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, Tokyo, Japan, May 26–28, 2008. – Tokyo, 2008. – P. 425–428. – doi: 10.1007/978-1-84800-267-8\_87.
8. 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. – P. 106–114. – doi: 10.1016/j.ijmactools.2009.09.001.
9. Скиба В.Ю. Повышение эффективности технологического процесса обработки деталей машин при интеграции абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2008. – 257 с.
10. Методика назначения режимов обработки при интеграции абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ / В.В. Иванцовский, В.Ю. Скиба, Н.П. Зуб, С.В. Туревич // Современные проблемы в технологии машиностроения: Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения профессора Муханова И.И.: сборник трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 84–93.
11. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю. Эффективность объединения операций поверхностной закалки и шлифования на одном технологическом оборудовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 4 (49). – С. 15–21.
12. Salonitis K., Chondros T., Chryssolouris G. Grinding wheel effect in the grind-hardening process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 38, iss. 1–2. – P. 48–58. – doi: 10.1007/s00170-007-1078-9.
13. Бушуев В.В. Направления конструирования станков // Вестник МГТУ «Станкин». – 2008. – № 1. – С. 8–13.
14. Станочное оборудование, основанное на комплексировании нескольких технологических операций / В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д. Ю. Корнев, В.Ю. Скиба // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 245–255.
15. Надежность прогноза качества технологического оборудования / С.В. Птицын, В.Ю. Скиба, Ю.С. Чёсов, Е.В. Мережко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 2 (59). – С. 33–38.
16. Яцерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256 с.
17. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
18. Contact processes in grinding / A. Yanyushkin, D. Lobanov, P. Arkhipov, V. Ivancivsky // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 351–354. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17.
19. The effect of diamond tool performance capability on the quality of processed surface / P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov, S.I. Petrushin // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 124–130. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.124.
20. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Influence of sharpening on the quality of hard-alloy tools for the cutting of composites // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31, iss. 3. – P. 236–239. – doi: 10.3103/S1068798X11030166.



21. *Skeeba V., Ivancivsky V., Pushnin V.* Numerical modeling of steel surface hardening in the process of high energy heating by high frequency currents // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698. – P. 288–293. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.288.

22. Анализ напряженно-деформированного состояния материала при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты / В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2014. – № 3 (64). – С. 90–102.

23. *ASM Handbook*. Vol. 9. Metallography and microstructures / prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee; vol. ed. G.F. Vander Voort. – [Ohio], USA: Materials Park: ASM International, 2004. – 1184 p. – ISBN: 978-0-87170-706-2.

24. *Totten G.E., Howes M., Inoue T.* Handbook of residual stress and deformation of steel. – Ohio: ASM International: Materials Park, 2002. – 499 p. – ISBN 0-87170-729-2.

25. Springer handbook of experimental solid mechanics / W.N. Sharpe, ed. – Leipzig: Springer Science; New York: Business Media, 2008. – 1098 p. – ISBN 978-0-387-26883-5. – eISBN 978-0-387-30877-7.

26. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Степанова Н.П.* Назначение режимов поверхностной закалки с использованием концентрированных источников нагрева // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2005. – № 3 (28). – С. 22–24.

27. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Степанова Н.П.* Методика назначения рациональных режимов поверхностной закалки сталей с использованием концентрированных источников нагрева // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2006. – № 4 (33). – С. 17–19.

28. *Торбило В.М.* Алмазное выглаживание. – М.: Машиностроение, 1972. – 105 с.

29. *Швецов А.Н., Скуратов Д.Л.* Исследование влияния параметров процесса алмазного выглаживания на шероховатость поверхности заготовки из стали 15X12H2МВФАБ-Ш при использовании индентора из натурального алмаза // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2014. – № 5 (47), ч. 1. – С. 62–67.

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

## ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(68), July – September 2015, Pages 31–41

### Technological features of forming the quality characteristics of the surface layer during diamond smoothing in the integrated processing

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

**Pushnin V.N.**, Ph.D. student, e-mail: valerka\_777-90@mail.ru

**Kornev D.Yu.**, MSc (Engineering), e-mail: cornev.dima@yandex.ru

**Parts K.A.**, BSc (Engineering), e-mail: krispars@yandex.ru

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

#### Abstract

**Purpose:** The required operating features of machine parts are mainly formed at the final stage of its production process. In this regard, the objective is to investigate the features ensuring the quality characteristics of the surface layer of products, achieved at the last step of the integrated processing - diamond smoothing. **Methods:** The experiments were performed on a lathe equipped with an additional source of energy, in the function of which the external quenching circuit providing high-energy high-frequency heating was used. Structural studies were carried out with appliance of optical and scanning electron microscopy. Stress-strain state of the surface layer part was evaluated by X-ray and mechanical methods for the determination of residual stresses. The surface roughness assessment was implemented on the profilograph-profilometers Form Talysurf Series 2 and Zygo New View 7300. **Results and Discussion:** It is found that the diamond smoothing of samples of steel 45 under the proposed principle of integration, which allows processing of parts from one technological base, makes it possible to increase the surface microhardness and residual stress level of compression achieved during the transition surface hardening by high frequency.

The formation in the surface-hardened sample a hardened (cold-worked) layer having a thickness of 0,01...0,02 mm after diamond burnishing is experimentally confirmed. Its microhardness is  $\sim 868$  HV, while the level of compressive stress in the surface layer increases to values  $\sigma_{\tau} = -678 \pm 20$  MPa. The rational range of the smoothing power  $P_y \in [100; 150]$  N, which guarantees a minimum value of roughness  $R_a = 0.18 \pm 0.08$   $\mu\text{m}$ , is determined. The functional dependence of the parameter  $R_a$  on processing modes which can be used during the diamond smoothing, based on the high performance and the desired surface roughness is obtained.

### Keywords:

complexation, diamond smoothing, treatment modes, roughness, hardness, residual stresses.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-31-41

### References

1. Makarov V.M. Kompleksirovannyye tekhnologicheskie sistemy: perspektivy i problemy vnedreniya [Well integrated technological systems: prospects and problems of implementation]. *RITM: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya – RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2011, no. 6 (64), pp. 20–23.
2. Moriwaki T. Multi-functional machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57, iss. 2, pp. 736–749. doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.004
3. Garro O., Martin P., Veron M. Shiva a multiarms machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1993, vol. 42, iss. 1, pp. 433–436. doi: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2
4. Nagae A. Development trend of multi-tasking machines. *Proceedings of the 11th International Conference on Machine Tool Engineers*, Tokyo, Japan, November 3–5, 2004, pp. 312–323.
5. Skeebe V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 12, pp. 1408–1411. doi: 10.1080/10426914.2014.973595
6. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., Mcintosh D. Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2014, vol. 63, iss. 2, pp. 561–583. doi: 10.1016/j.cirp.2014.05.003
7. Brecher C., Hoffmann F., Karlberger A., Rosen C.-J. Multi-technology platform for hybrid metal processing. The 41<sup>st</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems "Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier". Tokyo, 2008, pp. 425–428. doi: 10.1007/978-1-84800-267-8\_87
8. 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
9. Skeebe V.Yu. *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei mashin pri integratsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh. Diss. kand. tekhn. nauk* [Improving the efficiency of the technological processing machinery parts with the integration of abrasive grinding and surface hardening currents by high frequency currents. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2008. 257 p.
10. Ivantsivskii V.V., Skiba V.Yu., Zub N.P., Turevich S.V. [Methods of using processing regimes when integrating abrasive grinding and surface hardening HFC]. *Sbornik trudov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sovremennyye problemy v tekhnologii mashinostroeniia", posvyashchennoi 100-letiiu so dnia rozhdeniia professora Mukhanova I.I.* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Modern Problems in Mechanical Engineering Technology", dedicated to the 100th anniversary of the birth of professor Mukhanov I.I.]. Novosibirsk, 2009, pp. 84–93. (In Russian)
11. Ivantsivskii V.V., Skiba V.Yu. Effektivnost' ob'edineniya operatsii poverkhnostnoi zakalki i shlifovaniya na odnom tekhnologicheskom oborudovanii [Integration effectiveness of operations of surface hardening and grinding on a single technology equipment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2010, no. 4 (49), pp. 15–21.
12. Salonitis K., Chondros T., Chryssoulouris G. Grinding wheel effect in the grind-hardening process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, vol. 38, iss. 1–2, pp. 48–58. doi: 10.1007/s00170-007-1078-9
13. Bushuev V.V. Napravleniya konstruirovaniya stankov [Destinations design engineering of metalcutters]. *Vestnik MGTU "Stankin" – Bulletin of MSTU "Stankin"*, 2008, no. 1, pp. 8–13.
14. Pushnin V.N., Erokhin I.A., Kornev D.Yu., Skiba V.Yu. Stanochnoe oborudovanie, osnovannoe na kompleksirovanii neskol'kikh tekhnologicheskikh operatsii [Machine-tool equipment, based on a complexation of several working operations]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2014, no. 1, pp. 245–255.

15. Ptitsyn S.V., Skiba V.Yu., Chesov Yu.S., Merezhko E.V. Nadezhnost' prognoza kachestva tekhnologicheskogo oborudovaniya [Reliability prediction of quality process equipment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 2 (59), pp. 33–38.
16. Yashcheritsyn P.I., Ryzhov E.V., Averchenkov V.I. *Tekhnologicheskaya nasledstvennost' v mashinostroenii* [Technological heredity in mechanical engineering]. Minsk, "Nauka i tekhnika" Publ., 1977. 256 p.
17. Sulima A.M., Shulov V.A., Yagodka Yu.D. *Poverkhnostnyi sloi i ekspluatatsionnye svoystva detalei mashin* [The surface layer and the performance of the machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 240 p.
18. Yanyushkin A., Lobanov D., Arkhipov P., Ivancivsky V. Contact processes in grinding. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 351–354. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17
19. Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Petrushin S.I. The effect of diamond tool performance capability on the quality of processed surface. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 379, pp. 124–130. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.124
20. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Influence of sharpening on the quality of hard-alloy tools for the cutting of composites. *Russian engineering research*, 2011, vol. 31, iss. 3, pp. 236–239. doi: 10.3103/S1068798X11030166. *Translated from Vestnik Mashinostroeniya*, 2011, no. 3, pp. 50–53.
21. Skeebe V., Ivancivsky V., Pushnin V. Numerical modeling of steel surface hardening in the process of high energy heating by high frequency currents. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 288–293. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.288
22. Skiba V.Yu., Pushnin V.N., Erokhin I.A., Kornev D.Yu. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya materiala pri vysokoenergeticheskom nagreve tokami vysokoi chastoty [Analysis of the stress-strain state of the material under high-energy heating by high frequency currents]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 3 (64), pp. 90–102.
23. Vander Voort G.F., ed. *ASM Handbook*. Vol. 9: *Metallography and microstructures*. Ohio, USA, ASM International Publ., 2004. 1184 p. ISBN 978-0-87170-706-2
24. Totten G.E., Howes M., Inoue T. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Ohio, USA, Materials Park, ASM International Publ., 2002. 499 p. ISBN 0-87170-729-2
25. Sharpe W.N. *Springer handbook of experimental solid mechanics*. Leipzig, Springer Science, New York, Business Media, 2008. 1098 p. ISBN 978-0-387-26883-5. eISBN 978-0-387-30877-7.
26. Ivantsivskii V.V., Skeebe V.Yu., Stepanova N.P. Naznachenie rezhimov poverkhnostnoi zakalki s ispol'zovaniem kontsentririrovannykh istochnikov nagreva [Assignment mode of surface hardening, which is carried out by using a concentrated heat source]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2005, no. 3 (28), pp. 22–24.
27. Ivantsivskii V.V., Skeebe V.Yu., Stepanova N.P. Metodika naznacheniya ratsional'nykh rezhimov poverkhnostnoi zakalki stali s ispol'zovaniem kontsentririrovannykh istochnikov nagreva [Rational modes of surface hardening of steels using concentrated heat sources]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2006, no. 4 (33), pp. 17–19.
28. Torbilo V.M. *Almaznoe vyglazhivanie* [Diamond smoothing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 105 p.
29. Shvetsov A.N., Skuratov D.L. Issledovanie vliyaniya parametrov protsessa almaznogo vyglazhivaniya na sherokhovatost' poverkhnosti zagotovki iz stali 15Kh12N2MVFAB-Sh pri ispol'zovanii indentora iz natural'nogo almaza [Research of the influence of the diamond burnishing process parameters on the surface roughness of a steel 15Cr12Ni2MoVWVWNB-S workpiece when using an indenter made of natural diamond]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta – Vestnik of the Samara State Aerospace University*, 2014, no. 5 (47), pt. 1, pp. 62–67.
30. 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. *Translated from STIN*, 2014, no. 8, pp. 28–31.

## Funding

The reported study was partially supported by RFBR, research project No. 13-08-01102 a.

## Article history:

Received 1 June 2015

Revised 2 July 2015

Accepted 27 July 2015

# ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

Поступила 22 мая 2015

Рецензирование 20 июня 2015

Принята к печати 17 июля 2015

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

Рассматривается контроль современных композиционных материалов методом акустической эмиссии после механической обработки. Данные материалы широко используются при производстве деталей машин, являясь заменителями цветных металлов (свинца, меди, цинка, латуни, бронзы) и редких материалов с особыми физико-механическими свойствами (легированных сталей). В производственных условиях при проведении измерений и контроля свойств материала приходится разрушать целостность исследуемого образца, что зачастую требует больших затрат средств и времени. Проведенные исследования композиционных материалов позволяют выявить внутренние дефекты, посторонние включения и неоднородность без разрушения изделия методами неразрушающего контроля, в частности, эхо-методом.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, эхо-метод, ультразвук, композиционные материалы, качество поверхности, управление процессом, обработка материалов.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-42-48

## Введение

Среди новых конструкционных материалов особое место принадлежит композиционным материалам (борпластик, углепластик, стеклопластик) и синтетическим смолам. Они широко используются при производстве машин, являясь заменителями цветных металлов (свинца, меди, цинка, латуни, бронзы) и редких материалов с особыми физико-механическими свойствами (легированных сталей). Этим и объясняется широкое использование композиционных материалов для изготовления огромной номенклатуры деталей машин.

Для большинства композиционных материалов характерны следующие физико-механические свойства, которые позволяют им конкурировать с металлами [1–3]: высокая коррозионная стойкость; высокие электроизоляционные свой-

ства; высокая удельная и абсолютная механическая прочность; низкая трудоемкость изготовления деталей из композиционных материалов; низкий коэффициент трения; высокая износостойкость.

Одновременно композиционным материалам присущи следующие недостатки [4–6]: низкая теплостойкость и теплопроводность; выраженные свойства ползучести, особенно ярко заметные у термопластов; малая жесткость (модуль упругости композиционных материалов (стеклопластиков) на порядок ниже, чем у металлов); ухудшение физических свойств под действием температуры, влажности, света, воды.

В процессе изготовления и механической обработки в композиционных материалах могут возникать следующие дефекты [7–9]:

– наличие раковин и пузырей, которые образуются в результате неплотной набивки формы

при прессовке и литье, при выделении газов в результате химической реакции;

– трещины, возникающие под действием внешних и внутренних напряжений при термическом воздействии, прессовании заготовок в готовые изделия;

– ослабление механических свойств в результате нарушения химического состава (зоны пониженного или повышенного содержания связующего) и технологии изготовления;

– расслоения, возникающие в результате перерывов в литье или при сборке пакетов из разнородных материалов, загрязнений соединяемых поверхностей.

Для выявления данных дефектов могут быть использованы методы с разрушением целостности исследуемого образца или методы неразрушающего контроля качества композиционных материалов. Методы неразрушающего контроля широко применяются для нахождения дефектов, измерения толщины, измерения влажности, исследования мест сварки в пластмассовых трубах, исследования качества соединений пластмассовых труб и фитингов с помощью связующих растворов. Известны три основных метода применения ультразвука для обнаружения внутренних дефектов: теневой, эхо-метод и резонансный [13–15]. Они позволяют обнаружить дефекты, посторонние включения и неоднородности без разрушения изделия [10–12], а также оценить физические свойства, характеризующие прочность и надежность соединений.

Методы неразрушающего контроля широко применяются для деталей из металлов и сплавов на их основе, но для выявления дефектов в изделиях из композиционных материалов не используются из-за отсутствия научной информации, справочных данных и других рекомендаций.

Целью работы является выявление внутренних дефектов в деталях из композиционных материалов эхо-методом и своевременное исключение из технологического процесса деталей, имеющих дефекты на стадии заготовительной операции и в процессе механической обработки.

### Материалы и методы исследования

В качестве исследуемого материала выбрано оргстекло ИЮПАК: Poly (methyl 2-methylpropionate), которое состоит из термопластичной смо-

лы с характеристиками: температура плавления 160 °С; плотность 1,18 г/см<sup>3</sup>; температура кипения 200 °С.

На производстве при проведении измерений и контроля свойств материала используют методику с разрушением целостности исследуемого образца, что зачастую требует больших затрат средств и времени. Здесь применяется акустический (ультразвуковой) метод неразрушающего контроля качества композиционных материалов, который заключается в использовании способности ультразвуковых колебаний проникать с большой скоростью (до 12 000 м/с) в материал и отражаться от поверхности раздела сред с различными акустическими свойствами. Для выявления внутренних дефектов исследуемого образца был применен эхо-метод. Условия проведения эксперимента представлены в табл. 1.

В ходе подготовки к проведению экспериментальных исследований поверхность заготовки была очищена спиртовым раствором Terostat-450 от загрязнений, препятствующих обеспечению акустического контакта. Затем на поверхность исследуемого образца для улучшения процесса сканирования наносилась контактная жидкость «Гель ультразвуковой». Дефектоскоп ультразвуковой «Пеленг» УД2-102 настроен на уровень чувствительности 57 дБ, что дает возможность выявлять дефекты с эквивалентной площадью 2 мм<sup>2</sup>. Минимальное расстояние от поверхности ввода до дефекта при контроле составляет 5 мм. Параметры исследования и измеряемые величины представлены в табл. 2.

Обработка экспериментальных данных, записанных в память дефектоскопа в виде протокола контроля, проводилась на компьютере с использованием программного обеспечения Microsoft Excel. Для убеждения в однородности результатов наблюдений, исключения экспериментальных ошибок и отброса ошибочных опытов были проведены исследования экспериментального образца эхо-методом, а затем методом с разрушением целостности исследуемого образца. Для анализа данных, полученных двумя методами, были получены дефектограммы. При обнаружении участков с эквивалентной площадью несплошности более 2 мм<sup>2</sup> фиксировался внутренний дефект в виде несплошности и записывались данные о детали, выявленном дефекте

**Условия проведения эксперимента**

Объект контроля	Исследуемый образец
Материал	Оргстекло
Акустический (ультразвуковой) метод контроля	Эхо-метод
Цель испытания	– Проверка заготовки детали из оргстекла на наличие внутренних несплошностей – заключение о дальнейшей пригодности заготовки в зависимости от критериев браковки
Оборудование	– Дефектоскоп ультразвуковой «Пеленг» УД2-102; – стандартный образец СО-1(из оргстекла) – прямой ПЭП (П111-5), частота 5 МГц
Вспомогательное оборудование	Штангенциркуль
Критерий браковки	Эквивалентная площадь несплошности не менее 2 мм <sup>2</sup>
Вспомогательные материалы	Контактная жидкость «Гель ультразвуковой»

Таблица 2

**Параметры исследования  
и измеряемые величины**

Скорость распространения ультразвука	2670 м/с
Частота	5 МГц
Угол ввода	0°
Время ПЭП	1,65 мкс
Длина развертки	48
Начало строба	5
Конец строба	38
Мертвая зона (минимальное расстояние от поверхности ввода до дефекта, выявляемого при контроле)	5 мм

и параметрах контроля в виде протокола исследования (рис. 1).

Обнаруженный участок в виде несплошности считается недопустимым дефектом, так как амплитуда от эхо-сигнала превышает уровень выбраковки. Для количественной оценки адекватности полученных данных были проведены однофакторные эксперименты. Сравнение результатов экспериментов, проведенных методом с разрушением целостности исследуемого образца и эхо-методом подтверждает их адекватность, наибольшее расхождение составляет 6 %.

**Результаты и обсуждение**

В результате проведенных исследований эхо-методом на глубине 25,9 мм исследуемого образца были выявлены недопустимые дефекты в виде несплошности (рис. 2). Обнаруженная несплошность является недопустимым дефектом, так как амплитуда от эхо-сигнала превышает уровень браковки на 5 децибел. Дальнейшее использование такой заготовки для изготовления продукции не допускается.

Полученные данные позволяют утверждать, что эхо-метод неразрушающего контроля применим при исследовании дефектов для изделий из композиционных материалов. Однако для формирования технологических рекомендаций по применению данного метода на производстве, необходимо выполнить ряд экспериментов для других конструкционных материалов, построить математические модели.

Дальнейшая разработка рекомендаций по применению эхо-метода и применение их на машиностроительных предприятиях позволит сократить время на весь производственный цикл за счет сокращения времени на операцию контроля, соответственно получить экономический эффект от сокращения сроков производства, уменьшить затраты на операцию контроля, исключить вероятность разрушения годных деталей при контроле разрушающими методами. Кроме этого применение эхо-метода позволяет



**ПРОТОКОЛ №**  / 211 **ОТ** 16.04.2015 15:04:27  
 ультразвукового контроля дефектоскопом  
 \*PELENG\* УД2-102 № 7821 версия 3.63  
**ПРЕДПРИЯТИЕ**   
 Подразделение  **Дата контроля** 16.04.15 16:29  
**ОПЕРАТОР:** шифр 0 фамилия и.о.   
**ОБЪЕКТ:** тип  толщина 0.00 мм  
 материал  № 001 **порядк.№** 2  
 НТД на контроль   
**РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ: ОТРАЖАТЕЛЬ №** 000000  
 Коорд.по дл./сеч.объекта 0 м 11 мм 0.0 час **Расстояние X** 0.00 мм  
**Глубина Y** 25.90 мм  
**Время распротр.УЗК T** 19.40 мкс  
**Амплитуда N** 5 дБ  
**Усл. протяженность**   
**Усл. высота**

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОПЕРАТОРА :**

**ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НАСТРОЙКИ ДЕФЕКТОСКОПА:**

**Настройка №** 115 **РАЗВЕРТКА:** 120% **Длит.** 48.1 ммУ 36.0 мкс  
**Частота УЗК** 5.00 МГц **Зона ВС-1:** **Начало** 5.0 ммУ 3.8 мкс  
**Скорость УЗК** 2670 м/с **Порог** 50% **Конец** 38.0 ммУ 28.5 мкс

**ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ:**

**Усиление** 57 дБ  
**Треб.чувств.** 0 дБ  
**Фактич.чувств.** -17 дБ

**ПЭП: №** 038 **ВРЧ:** ручная **Начало** 5.0 ммУ 3.8 мкс  
**Включение** совмещ **Ампл.** 30 дБ **Конец** 38.0 ммУ 28.4 мкс  
**Угол ввода** 0 град **До ВРЧ** 0 дБ **Форма** -11  
**Время ПЭП** 1.6 мкс **После ВРЧ** 0 дБ  
**Стрела** 0 мм

Рис. 1. Протокол ультразвукового контроля дефектоскопом

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ:**

Коорд.по дл./сеч.объекта 0 м 11 мм 0.0 час **Расстояние X** 0.00 мм  
**Глубина Y** 25.90 мм  
**Время распротр.УЗК T** 19.40 мкс  
**Амплитуда N** 5 дБ

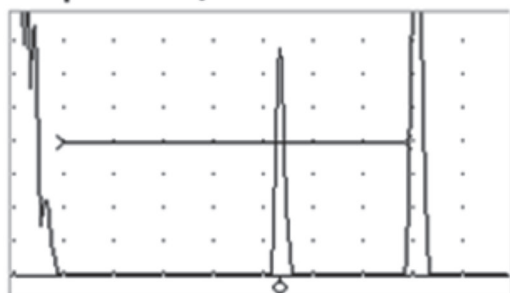


Рис. 2. Дефектограмма участка заготовки с выявленным внутренним дефектом

повысить качество операции контроля за счет снижения вероятности попадания бракованных заготовок и деталей в дальнейшую обработку или сборку.

### Выводы

Проведенные исследования позволили выявить недопустимые дефекты, посторонние включения и неоднородности без разрушения изделия методом неразрушающего контроля, в частности эхо-методом. Эхо-метод применим для выявления скрытых дефектов в композиционных материалах.

Использование данных исследований и методов неразрушающего контроля на предприятиях позволит своевременно исключать из технологического процесса детали, имеющие дефекты на стадии заготовки и в процессе механической обработки, тем самым сократить время и затраты на производство на 12–15 %.

Для формирования технологических рекомендаций на производственных предприятиях по применению эхо-метода необходимо провести ряд дополнительных экспериментов, которые позволят создать технологические рекомендации.

### Список литературы

1. *Рогов В.А., Позняк Г.Г.* Современные машиностроительные материалы и заготовки: учебное пособие. – М.: Академия, 2008. – 336 с. – ISBN 978-5-7695-4254-1.
2. *Обработка металлов резанием: справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм, В.Ф. Безъязычный, В.С. Волков, Л.Б. Гай, В.А. Гречишников, А.И. Зайцев, С.В. Кирсанов, В.И. Кокарев, Г.А. Лавров, Б.В. Медведь, В.Б. Савин, А.П. Соловьев, А.З. Старосельский, А.Г. Схиртладзе, А.С. Тарапанов, З.А. Фарберов, Г.А. Харламов, Л.Н. Чеканова, Л.Б. Чернявский, Н.П. Шестаков; под общ. ред. А.А. Панова.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2004. – 784 с. – ISBN 5-94275-049-1
3. *Мозговой Н.И., Мозговая Я.Г.* Особенности обработки отверстий в деталях из стеклопластика // Седьмая Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в промышленности» (ИТ' 2012), 30–31 октября 2012 года, Минск: тезисы докладов. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2012. – С. 207–209. – ISBN 978-985-6744-78-8.
4. *Мозговой Н.И., Мозговая Я.Г.* Исследования влияния физико-механических свойств стеклопластиков на процесс резания // Вестник Алтайской науки. – 2013. – № 2–1. – С. 15–20.
5. *Мозговой Н.И., Марков А.М., Доц М.В.* Стеклопластик и особенности его механической обработки. – Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 100 с.
6. *Мозговой Н.И., Марков А.М., Мозговая Я.Г.* Проблемы и перспективы применения пластических материалов для деталей машиностроения // Ползуновский альманах. – 2013. – № 2. – С. 92–95.
7. *Бондарь Е.Б., Марков А.М.* Проблемы обработки пластмасс резанием // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2004. – № 2 (23). – С. 20–21.
8. *Материаловедение. Технология композиционных материалов: учебник / А.Г. Кобелев, М.А. Шаронов, О.А. Кобелев, В.П. Шаронова.* – М.: Кнорус, 2014. – 270 с.
9. *Калиниченко Н.П., Калиниченко А.Н.* Визуальный и измерительный контроль: учебное пособие / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 300 с.
10. РД 03–606–03. Инструкция по визуальному измерительному контролю: утв. Постановлением Госгортехнадзора России от 11.06.2003 № 92: зарег. 20.06.2003: введ. в действие 17.07.2003. – М.: ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2003. – 101 с.
11. Ультразвуковой эхо-импульсный метод неразрушающего контроля [Электронный ресурс]: электронные методические указания / Самарский государственный аэрокосмический университет / сост: Д.Ю. Киселев, И.М. Макаровский. – Самара: СГАУ, 2010. – 15 с. – URL: [http://www.ssau.ru/files/education/metod\\_1/Киселев Д.Ю. Ультразвуковой эхо-импульсный.pdf](http://www.ssau.ru/files/education/metod_1/Киселев Д.Ю. Ультразвуковой эхо-импульсный.pdf) (дата обращения: 22.05.2015).
12. *Каневский И.Н., Сальникова Е.Н.* Неразрушающие методы контроля: учебное пособие. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
13. *Ермолов И.Н., Ланге Ю.В.* Неразрушающий контроль. Т. 3. Ультразвуковой контроль: справочник / под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.: ил. – ISBN 5-217-03224-3.
14. *Measurement technologies. Remote visual inspection.* – USA: General Electric Company, 2007.
15. *Advances in three dimensional measurement in remote visual inspection [Electronic resource] // 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16–20 April 2012, Durban, South Africa.* – URL: [http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/320\\_wcndtfinal00320.pdf](http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/320_wcndtfinal00320.pdf) (accessed: 22.05.2015).



**OBRABOTKA METALLOV**

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(68), July – September 2015, Pages 42–48

**The use of acoustic control method for parts made of composite materials****Mozgovoy N.I.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: nick\_3@mail.ru**Mozgovaya Y.G.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: yanagm@mail.ru**Pashkova E.A.**, Student, e-mail: genya\_pashkova@mail.ru

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

**Abstract**

The control of modern plastic materials using acoustic emission after machining is considered. These materials are widely used in the production of machine parts, as substitutes for non-ferrous metals (lead, copper, zinc, brass, bronze) and rare materials with specific physical and mechanical properties (alloyed steels). The production conditions for measurement and control of material properties is necessary to destroy the integrity of the test sample, which is often costly and time. In the test applied acoustic (ultrasonic) method for non-destructive quality control of plastics, which is to use the ability of ultrasonic waves to penetrate at high speed (up to 12,000 m / s) in the material and reflected from the surface of media with different acoustic properties. The method used to find defects, thickness measurement and moisture measurement, study welds in plastic tubes, studies joint quality plastic pipes and fittings using binder solutions. There are three basic methods of application of ultrasound to detect internal defects: shadow, echo method and resonance. Studies plastics reveal the internal defects, debris and heterogeneity without destroying the product NDT methods, in particular the echo method. Data is written to the memory flaw in a protocol of control. Graphically defectogram detected defect is fixed, specified data on the details of identified defects and parameter control. The test sample is detected with an inner portion of a defect in a discontinuity that belongs to unacceptable defects, since the amplitude of the echo signal exceeds the level of rejection. Using the survey data, and nondestructive inspection in enterprises allow to make timely adjustments in manufacturing processes and machining thereby reducing the time and costs of production.

**Keywords:**

non-destructive testing, the echo method, ultrasound, plastic materials, surface quality, process control, processing of materials.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-42-48

**References**

1. Rogov V.A., Poznyak G.G. *Sovremennyye mashinostroitel'nyye materialy i zagotovki* [Modern engineering materials and blanks]. Moscow, Publ. center "Academia", 2008. 336 p. ISBN 978-5-7695-4254-1
2. Panov A.A., Anikin V.V., Boim N.G., Bez'yazychnyi V.F., Volkov V.S., Gai L.B., Grechishnikov V.A., Zaitsev A.I., Kirsanov S.V., Kokarev V.I., Lavrov, Medved' B.V., Savin V.B., Solov'ev A.P., Starosel'skii A.Z., Skhirtladze A.G., Tarapanov A.S., Farberov Z.A., Kharlamov G.A., Chekanova L.N., Chernyavskii L.B., Shestakov N.P. *Obработка металлов резанием: справочник технолога* [Metalcutting: directory of industrial engineer]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 784 p. ISBN 5-94275-049-1
3. Mozgovoy N.I., Mozgovaya Ya.G. [Processing features holes in parts made of glass-fiber material]. *Tezisy докладov VII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Informatsionnyye tekhnologii v promyshlennosti"* [Proceedings of the VII International Scientific Conference "Information Technologies in Industry" (ITI'2012)]. Minsk, UIIP NAS Belarus Publ., 2012, pp. 207–209. ISBN 978-985-6744-78-8
4. Mozgovoy N.I., Mozgovaya Ya.G. Issledovaniya vliyaniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv stekloplastikov na protsess rezaniya [Investigations of the influence of physical and mechanical properties of glass-fiber material on the cutting process]. *Vestnik Altaiskoy nauki – Bulletin of the Altai Science*, 2013, no. 2–1, pp. 15–19.
5. Mozgovoy N.I., Markov A.M., Dots M.V. *Stekloplastik i osobennosti ego mekhanicheskoi obrabotki* [Glass-fiber material and features of its machining]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 100 p.

6. Mozgovoy N.I., Markov A.M., Mozgovaya Ya.G. Problemy i perspektivy primeneniya plasticheskikh materialov dlya detalei mashinostroeniya [Problems and perspectives of the use of plastic materials for machine parts]. *Polzunovskii al'manakh – Polzunov Almanac*, 2013, no. 2, pp. 92–95.
7. Bondar' E.B., Markov A.M. Problemy obrabotki plastmass rezaniem [Problems processing plastic cutting]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2004, no. 2, pp. 20–21.
8. Kobelev A.G., Sharonov M.A., Kobelev O.A., Sharonova V.P. *Materialovedenie. Tekhnologiya kompozitsionnykh materialov* [Materials science. The technology of composite materials]. Moscow, Knorus Publ., 2014. 270 p.
9. Kalinichenko N.P., Kalinichenko A.N. *Vizual'nyi i izmeritel'nyi kontrol'* [Visual and measuring control]. Tomsk, TPU Publ., 2009. 300 p.
10. RD 03–606–03. Instruction for the visual and measurement control. Moscow, FGUP “NTTs “Promyshlennaya bezopasnost'” Publ., 2004. 101 p. (In Russian)
11. Kiselev D.Yu., Makarovskii I.M., comps. *Ul'trazvukovoi ekho-impul'snyi metod nerazrushayushchego kontrolya* [The ultrasonic pulse-echo method of nondestructive test]. Available at: [http://www.ssau.ru/files/education/metod\\_1/Киселев Д.Ю. Ультразвуковой эхо-импульсный.pdf](http://www.ssau.ru/files/education/metod_1/Киселев Д.Ю. Ультразвуковой эхо-импульсный.pdf) (accessed 22.05.2015)
12. Kanevskii I.N., Sal'nikova E.N. *Nerazrushayushchie metody kontrolya* [Nondestructive inspection methods]. Vladivostok, DVG TU Publ., 2007. 243 p.
13. Ermolov I.N., Lange Yu.V. *Nerazrushayushchii kontrol'*. *Spravochnik*. V 7 t. Pod obshchei red. V.V. Klyueva. T. 3: *Ul'trazvukovoi kontrol'* [Nondestructive inspection. Reference. Vol. 3: Ultrasonic inspection. Ed. by Klyuev V.V.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 864 p. ISBN 5-217-03224-3
14. *Measurement technologies. Remote visual inspection*. USA, General Electric Company, 2007.
15. Hubben E.B., Jervis D. Advances in Three Dimensional Measurement in Remote Visual Inspection. *Proceedings 18th World Conference on Nondestructive Testing*, Durban, South Africa, 16–20 April 2012. Available at: [http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/320\\_wcndtfinal00320.pdf](http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/320_wcndtfinal00320.pdf) (accessed 22.05.2015)

#### Article history:

Received 22 May 2015

Revised 20 June 2015

Accepted 17 July 2015

# ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ РЕЗА АЛЮМИНИЕВЫХ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКЕ\*

*Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор*  
*А.Х. РАХИМЯНОВ, ассистент*  
*К.Х. РАХИМЯНОВ, канд. техн. наук, доцент*  
(НГТУ, г. Новосибирск)

Получена 25 мая 2015

Рецензирование 20 июня 2015

Принята к печати 17 июля 2015

**Рахимянов А.Х.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: centerfht@mail.ru

Рассмотрены вопросы формирования микрогеометрии реза алюминиевых и медных сплавов при тонкоструйной плазменной резке, которая является перспективной технологией заготовительного производства. Экспериментальные исследования проводились на образцах из алюминия А5М и меди М1, выполненных из листового проката толщиной 3 и 2 мм соответственно. Установлено, что формирование морфологии поверхности реза алюминия определяется как процессами взаимодействия плазменного столба дуги с обрабатываемым материалом, так и осаждения части расплава в нижней части реза. Последнее объясняется недостаточной эффективностью газодинамических потоков для полного удаления продуктов расплава из канала реза вследствие высокой кинематической вязкости обрабатываемого материала. Показано, что осаждение расплава на поверхности реза ухудшает его микрогеометрию, формируя шероховатость  $Ra = 12,1$  мкм. Высокая кинематическая вязкость алюминия не позволяет исключить гратообразования на кромках реза.

При тонкоструйной плазменной резке меди морфология поверхности реза имеет однородный характер без следов осаждения расплава. При регулярном характере рельефа поверхности реза ее шероховатость достигает значений  $Ra = 5,98$  мкм. Формирование канала реза меди не сопровождается образованием грата на его кромках.

**Ключевые слова:** тонкоструйная плазменная резка, алюминиевые и медные сплавы, микрогеометрия поверхности реза, грат, технологические схемы.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-49-57

## Введение

Развитие современной промышленности невозможно без совершенствования как средств технического оснащения, так и технологических процессов на всех этапах производства, начиная от создания материалов и получения заготовок до контроля качества готовой продукции. От эффективности принятых решений на стадии заготовительного производства во многом зави-

сит ход дальнейшего развития технологического процесса. Это определяет существующую в настоящее время тенденцию в заготовительном производстве, направленную на разработку и внедрение новых технологий и оборудования, в частности, для раскрытия листовых материалов. К последним в первую очередь следует отнести таких представителей электрофизических технологий, как лазерная, тонкоструйная плазменная и гидроабразивная резки [1–10]. Анализ

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

технологий лазерной резки [1–4] показал, что наряду с обеспечением высоких показателей качества реза, отсутствием образования окалина они предназначены для раскроя материалов незначительной толщины (до 6–8 мм) при высокой энергоемкости процесса. Кроме этого для лазерных технологий характерны значительные капитальные затраты и сложность технического обслуживания оборудования.

Плазменные методы обработки [5–9] ориентированы на раскрой листовых металлических материалов значительных толщин, но при этом не обеспечивается высокая точность и качество реза.

Струйная гидроабразивная резка [10–12] позволяет получить высокую точность и хорошее качество реза, но обладает низкой производительностью процесса обработки.

В ряду технологий термической резки весьма привлекательной как с позиций достигаемой точности и качества обработки, так и экономичности процесса является тонкоструйная плазменная резка [13] как альтернатива лазерному раскрою металлических материалов [14]. Данная технология является модификацией плазменных методов резки.

Перспектива использования тонкоструйной плазменной резки в заготовительном производстве для раскроя листовых материалов показана в работах [15, 16].

Изучение эффективности определенного метода термической резки, к которой относятся как лазерная, так и плазменная технологии, предполагает количественную оценку таких показателей точности и качества обработки, как отклонение реза от перпендикулярности, микрогеометрия его поверхности и зона термического влияния (ISO 9013: 2002) [17].

Исследованию точностных показателей раскроя с позиций формирования реза при тонкоструйной плазменной резке конструкционных сталей посвящены работы [18–20], в которых показана взаимосвязь режимных параметров обработки с геометрической точностью реза и формированием его кромок. В работе [21] представлены механизмы формирования погрешностей при обработке криволинейных контуров и определены пути их снижения за счет назначения компенсационного припуска в зоне «захода – выхода» плазменной дуги на обрабатываемый

материал и выбора правильного направления обхода при обработке внутренних и наружных контуров. Вопросам математического моделирования процесса тонкоструйной плазменной резки при формообразовании криволинейных контуров посвящены исследования [22]. Авторами представлены расчеты величины компенсационного припуска при обработке сложнопрофильных контуров с учетом перераспределения тепловых потоков при тонкоструйной плазменной резке, моделированию которых посвящена работа [23].

Результаты представленных выше исследований посвящены в основном вопросам формирования точности при обработке углеродистых сталей, которые являются наиболее распространенными конструкционными материалами. В то же время представляет интерес вопрос расширения технологических возможностей тонкоструйной плазменной резки для обработки цветных металлов и сплавов. Так, в работах [24, 25] получены результаты по выявлению технологических особенностей раскроя алюминиевых и медных сплавов. Авторами отмечается образование значительной (до 9–12°) конусности реза, обусловленной высокой теплопроводностью данного класса материалов. Кроме этого выявлено влияние вязкости расплавов алюминия и меди на процесс графообразования на нижних кромках реза.

Как отмечалось, кроме показателей точности к контролируемому параметру при термических методах резки относится шероховатость поверхности реза. Целью настоящей работы является исследование формирования морфологии поверхности реза алюминиевых и медных сплавов при тонкоструйной плазменной резке.

### Материалы и методы исследования

В качестве материалов для исследований использовался алюминий марки А5М ГОСТ 21631–76 и медь марки М1 ГОСТ 495–92 в виде листового проката толщиной 3 и 2 мм, соответственно. Теплофизические свойства материалов, определяющие специфику формирования канала реза при тонкоструйной плазменной резке, приведены в таблице.

Экспериментальные исследования проводили на технологическом комплексе тонкоструй-

### Теплофизические свойства алюминия А5М и меди М1

Марка материала	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Теплоемкость, кал/г·град	Теплопроводность, ккал/м·ч·град			Температура плавления, °С	Удельная теплота плавления, кДж/кг
			20 °С	200 °С	500 °С		
А5М	2,70	0,2129	197	197	197	660	390
М1	9,00	0,0913	330	321	309	1083	213

ной плазменной резки, состав и работа которого подробно описаны в работе [26].

В качестве технологических схем раскроя алюминиевого сплава использовалась технологическая схема Ni-Focus с токовым режимом  $I = 35$  А при скорости обработки  $V = 1,2$  м/мин. В качестве плазмообразующего (режущего) газа применялся воздух при давлении 5 бар и расходе 30 условных единиц шкалы прибора установки Ni-Focus 130i, а завихряющего – азотоводородная смесь в соотношении 95/5 % при давлении 6 бар и расходе 75 условных единиц.

Для изучения особенностей раскроя медного сплава применялась технологическая схема Ni-Focus, предназначенная для резки углеродистых сталей с токовым режимом  $I = 35$  А при скорости обработки  $V = 1,5$  м/мин. Плазмообразующим (режущим) газом являлся кислород при давлении 5 бар и расходе 25 условных единиц, а завихряющим – смесь кислорода и азота при давлении 5 бар и расходе 20 условных единиц.

Для оценки морфологии поверхности использован измерительный микроскоп модели Nikon MM-400, изучение трехмерного изображения топографии поверхности реза проводили на комплексе ZYGO New View 7300, а профилографирование микрогеометрии – на профилографе-профилометре модели 252 с цифровой индикацией результатов измерения.

### Результаты и обсуждения

Анализ поверхности реза алюминия (рис. 1) свидетельствует о неоднородности ее морфологии и наличии определенной доли грата на нижней кромке.

В работе [24] представлены результаты, подтверждающие зависимость гратообразования от скорости обработки. Увеличение количества грата наблюдается при снижении скорости реза. Исключить гратообразование при раскрое алюминия не представляется возможным даже при

обработке на максимально допустимых скоростях обработки (рис. 1). Образование грата объясняется действием нескольких факторов. Во-первых, гратообразование при термических методах раскроя во многом определяется эффективностью удаления газодинамическими потоками продуктов расплава из канала реза. В основном это зависит от рационального сочетания таких параметров плазмообразующего и завихряющего газов, как давление и расход. Их значения соответствуют выбранным технологическим схемам раскроя определенного класса материала. Во-вторых, эффективность истечения продуктов расплава из зоны реза определяется его вязкостью. Алюминий обладает высоким значением кинематической вязкости, которое составляет  $1,1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, что обусловлено низкой плотностью материала (см. таблицу).

Третьей вероятной причиной, и, возможно, определяющей в повышенном гратообразовании при раскрое алюминиевых сплавов, является образование тугоплавких оксидов алюминия при взаимодействии его расплава с растворенным кислородом воздуха, используемого в данной технологической схеме в качестве плазмообразующего газа. Появление подобного рода

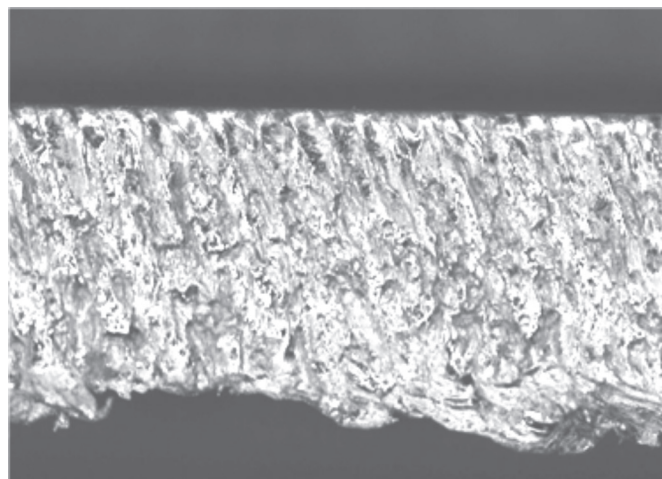


Рис. 1. Морфология поверхности реза алюминия А5М

оксидов в расплаве способствует повышению его вязкости и затруднению в полном удалении продуктов обработки из канала реза.

Анализ морфологии поверхности реза (см. рис. 1) позволил выявить наличие двух зон. Если в верхней половине реза четко просматриваются характерные для термических методов резки следы в виде бороздок от взаимодействия столба плазменной дуги с обрабатываемым материалом, то в нижней части реза морфология его поверхности представляется как результат осаждения стекающей части продуктов расплава.

Неблагоприятные условия истечения продуктов расплава алюминия из канала реза определяет невысокое качество его поверхности, о чем свидетельствуют значения шероховатости ( $Ra = 12,1$  мкм) и характер микрогеометрии, представленный на профилограмме (рис. 2).

Изучение морфологии поверхности раскрытия медных сплавов (рис. 3) показало хорошее качество реза без следов осаждения расплава на его поверхности. Это объясняется низким значением кинематической вязкости расплава ( $0,35 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с) и достаточными газодинамическими потоками

для его удаления из канала реза. Последнее определяет практическое отсутствие грата на нижней кромке реза во всем технологически значимом диапазоне скоростей обработки (рис. 3).

Сравнение поверхностей реза алюминия (см. рис. 1) и меди (рис. 3) указывает на различие их морфологий. Так, поверхность реза меди можно считать классической для термических методов разделительной резки, представляющей собой чередование следов взаимодействия плазменной дуги с обрабатываемым материалом по всей толщине реза.

Визуальное различие в характере рельефа поверхностей реза алюминия и меди подтверждается результатами профилографирования (рис. 2 и 4).

Если профилограмма поверхности реза меди (рис. 4) и ее топограмма (рис. 5) отображают ее рельеф в виде чередующихся бороздок со средней шероховатостью  $Ra = 5,98$  мкм, то профилограмма поверхности реза алюминия (рис. 2) описывает микрогеометрию осажденного его расплава.

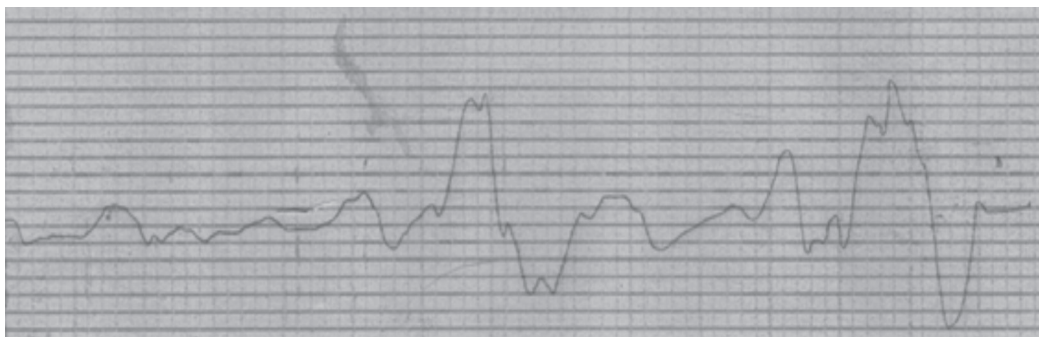


Рис. 2. Профилограмма поверхности реза алюминия А5М:

В.У. = 500; Г.У. = 50

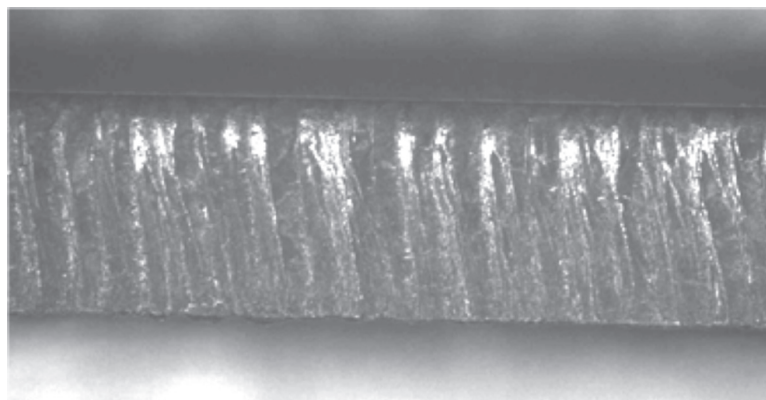


Рис. 3. Морфология поверхности реза меди М1

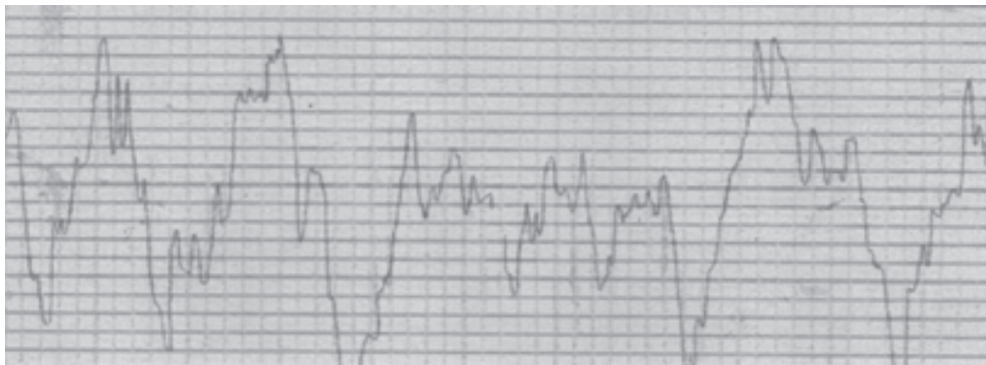


Рис. 4. Профилограмма поверхности реза меди М1:  
В.У. = 2000; Г.У. = 50

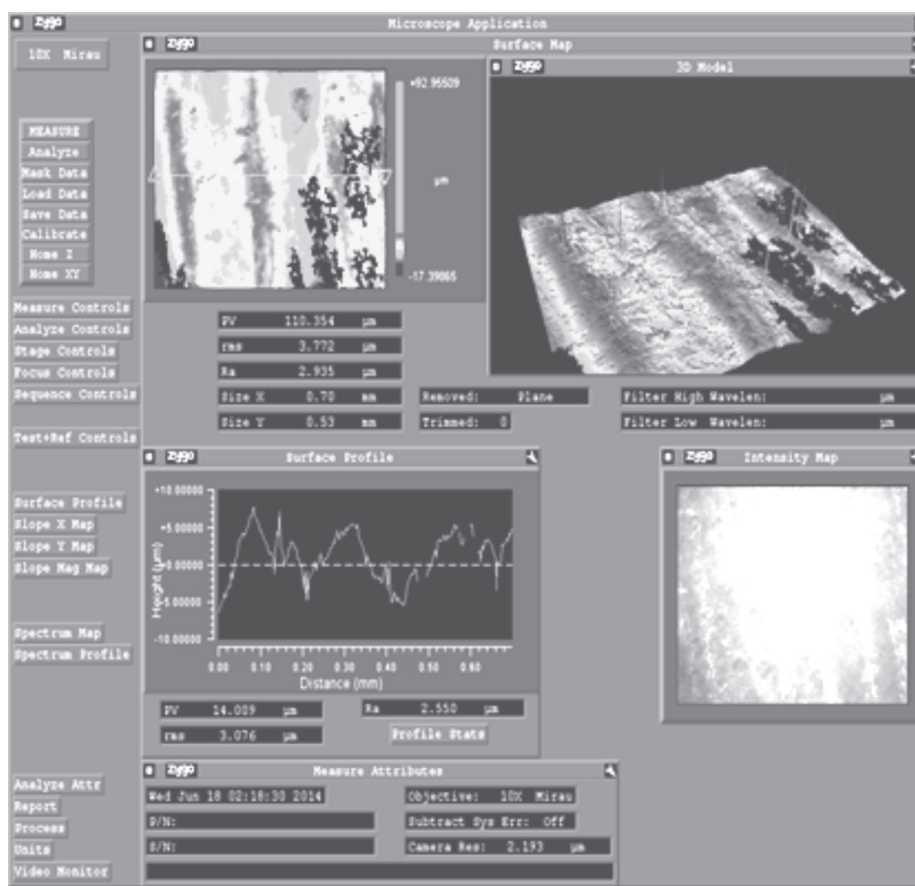


Рис. 5. Топография поверхности реза меди М1

## Выводы

1. Выявлены особенности формирования морфологии поверхности реза при тонкоструйной плазменной резке алюминиевых и медных сплавов. Экспериментально доказано, что высокое значение кинематической вязкости алюминия приводит к осаждению элементов расплава в нижней части поверхности реза. Недостаточная эффективность газодинамических потоков,

ответственных за удаление продуктов расплава из канала реза, приводит к образованию грата на нижней кромке реза алюминиевых сплавов. Осаждение расплава на поверхности реза приводит к ухудшению его микрогеометрии.

2. Низкое значение кинематической вязкости расплава меди обеспечивает однородный рельеф поверхности реза, отсутствие грата на кромках и меньшее по сравнению с алюминием значение шероховатости.

## Список литературы

1. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная резка металлов. – М.: Высшая школа, 1988. – 127 с. – ISBN 5-06-001252-2.
2. Забелин А.М., Оришич А.М., Чирков А.М. Лазерные технологии машиностроения: учебное пособие / Новосибирский государственный университет. – Новосибирск: [б. и.], 2004. – 142 с.
3. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учебное пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. – 2-е изд., стер. – М.: Изд-во НГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с. – ISBN 5-7038-2701-9.
5. Полевой Г.В., Сухинин Г.К. Газопламенная обработка металлов: учебник для среднего профессионального образования. – М.: Академия, 2005. – 336 с. – ISBN 5-7695-1604-6.
6. Быховский Д.Г. Плазменная резка. – Л.: Машиностроение, 1972. – 167 с.
7. Васильев К.В. Плазменно-дуговая резка – перспективный способ термической резки // Сварочное производство. – 2002. – № 9. – С. 26–28.
8. Васильев К.В. Воздушно-плазменная резка. – М.: Машиностроение, 1976. – 482 с.
9. Васильев К.В. Современные задачи и перспективы развития плазменно-дуговой резки // Материалы международной специализированной выставки-конгресса «Электротехнологии XXI века» (ЭЛТЕХ–2001). – СПб., 2001. – С. 27–29.
10. Шманев В.А., Шулепов А.П., Мещеряков А.В. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1995. – 144 с. – ISBN 5-217-01779-1.
11. Серикова Е.В. Гидроабразивный метод резки материалов // Строительные и дорожные машины. – 2006. – № 2. – С. 27–29.
12. Моргунов Ю.А., Федотов А.А., Швычков Д.В. Применение гидроабразивной резки при обработке сложнопрофильных поверхностей деталей // Применение гидроабразивной резки при обработке сложнопрофильных поверхностей деталей: материалы 65 Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров» Международного научного симпозиума «Автотракторостроение–2009». – М., 2009. – Т. 7. – С. 170–173.
13. Чиуеу К.Ф. Исследование эффективности технологии узкоструйной плазменной резки металлов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.08.04 / Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. – СПб., 2008. – 26 с.
14. Kirkpatrick I. High definition plasma-an alternative to laser technology // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. – 1998. – Vol. 70, iss. 3. – P. 215–217. – doi: <http://dx.doi.org/10.1108/00022669810370349>.
15. Локтионов А.А., Захаров В.В. Тонкоструйная плазменная резка как эффективная технология в заготовительном производстве // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, 2–4 декабря 2011 г.: в 6 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – Ч. 2. – С. 29–30.
16. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А. Повышение эффективности листового раскроя в заготовительном производстве // Ползуновский альманах. – 2012. – № 1. – С. 158–159.
17. ISO 9013: 2002. Резка тепловая. Классификация резов, полученных тепловым способом. Геометрические характеристики изделий и допуски на характеристики. – М.: Стандартинформ, 2002. – 25 с. – (Стандарты Международной организации по стандартизации (ИСО)).
18. Локтионов А.А. Оценка качества реза листовых материалов при тонкоструйной плазменной резке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 4 (61). – С. 86–91.
19. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А., Никитин Ю.В. Оценка геометрической точности реза листовых материалов при различных технологиях тонкоструйной плазменной резки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 3 (60). – С. 25–30.
20. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А. Точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов и пути ее повышения // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2009. – № 4 (45). – С. 31–32.
21. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А. Анализ погрешностей формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов // Современные проблемы в технологии машиностроения: Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения профессора Муханова И.И.: сборник трудов. – Новосибирск, 2009. – С. 151–153.
22. Моделирование процессов тонкоструйной плазменной резки для обеспечения точности формирования криволинейных контуров / Х.М. Рахимьянов, А.И. Журавлев, А.А. Локтионов, А.Х. Рахимьянов // Научный вестник НГТУ. – 2009. – № 4 (37). – С. 123–134.
23. Рахимьянов Х.М., Рахимьянов А.Х., Лунин С.В. Моделирование тепловых процессов тонкоструйной



плазменной резки // Инновации в машиностроении: труды 2 Международной научно-практической конференции, Кемерово, 6–8 октября 2011 г. – Кемерово, 2011. – С. 161–165.

24. Рахимьянов А.Х., Красильников Б.А. Технологические особенности плазменного раскроя алюминиевых сплавов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Международной научно-технической конференции, 23–26 сентября 2014 года / под ред. А.Г. Сулова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 71–77.

25. Рахимьянов А.Х. Тонкоструйная плазменная резка медных сплавов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Международной научно-технической конференции / под ред. А.Г. Сулова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 66–70.

26. Рахимьянов А.Х. Выбор технологических схем и оптимизация режимов тонкоструйной плазменной резки конструкционных сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 2 (63). – С. 46–55.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(68), July – September 2015, Pages 49–57

### Microgeometry formation of the cut during high-precision plasma cutting of aluminum and copper alloys

**Rakhimyanov Kh.M.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru

**Rakhimyanov A.Kh.**, Assistant, e-mail: centerfht@mail.ru

**Rakhimyanov K.Kh.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: backtof79@mail.ru

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

#### Abstract

The problems of the cut microgeometry formation during aluminum and copper alloys high-precision plasma cutting, which is a promising technology for blank production, are considered. Experimental studies were conducted on samples of aluminum A5M and copper M1 made of a sheet metal with a thickness of 3 mm and 2 mm, respectively. As technological scheme for cutting aluminum alloy a Hi-Focus mode with current  $I = 35$  A at the processing speed  $V = 1,2$  m / min is used. To study the characteristics of cutting copper alloy the Hi-Focus technological scheme, designed for cutting carbon steels, mode with current  $I = 35$  A at a processing speed  $V = 1,5$  m/min. The formation of the surface morphology of the aluminum cutting process is defined as the interaction of the plasma arc column with the material being treated, and the deposition portion of the melt at the bottom of the cut. This is explained by a lack of efficiency of gasdynamic flows to completely remove the product of melt from the channel the cut due to the high kinematic viscosity of the material being processed. It is shown that the deposition of the melt on the cut surface deteriorates the microgeometry forming roughness  $Ra = 12,1$  microns. High kinematic viscosity of aluminum does not exclude burr formation on the edges of the cut. When high-precision plasma cutting copper surface morphology of the cut is uniform in character without any traces of deposition of melt. With regular character of the surface topography of cut it reaches its roughness values  $Ra = 5,98$  microns. Formation of the channel cut copper is not accompanied by the formation of burr at its edges.

#### Keywords:

high-precision plasma cutting, aluminum and copper alloys, cut surface microgeometry, burr, technological schemes.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-49-57

#### References

1. Grigor'yants A.G., Sokolov A.A. *Lazernaya rezka metallov* [Laser cutting of metal]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 127 p. ISBN 5-06-001252-2

2. Zabelin A.M., Orishich A.M., Chirkov A.M. *Lazernye tekhnologii mashinostroeniya* [Laser technology engineering]. Novosibirsk, 2004. 142 p.
3. Grigor'yants A.G. *Osnovy lazernoi obrabotki materialov* [Basics of laser material processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 304 p.
4. Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki* [Technological processes of laser machining]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, BMSTU Publ., 2008. 664 p. ISBN 5-7038-2701-9
5. Polevoi G.V., Sukhinin G.K. *Gazoplamennaya obrabotka metallov* [Flame machining metals]. Moscow, Academia Publ., 2005. 336 p. ISBN 5-7695-1604-6
6. Bykhovskii D.G. *Plazmennaya rezka* [Plasma cutting]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 167 p.
7. Vasil'ev K.V. Plazmenno-dugovaya rezka perspektivnyi sposob termicheskoi rezki [Plasma-arc cutting – a promising method of thermal cutting] *Svarochnoe proizvodstvo – Welding International*, 2002, no. 9, pp. 26–28. (In Russian)
8. Vasil'ev K.V. *Vozdushno-plazmennaya rezka* [Air-plasma cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 482 p.
9. Vasil'ev K.V. [Modern problems and prospects of development of plasma-arc cutting]. *Materialy mezhdunarodnoi spetsializirovannoi vystavki-kongressa «Elektrotekhnologii XXI veka» (ELTEKh–2001)* [Proceedings of the International Specialized Exhibition-Congress “Electrotechnologies XXI Century” (ELTECH–2001)]. Saint Petersburg, 2001, pp. 27–29.
10. Shmanev V.A., Shulepov A.P., Meshcheryakov A.V. *Struinaya gidroabrazivnaya obrabotka detalei GTD* [Hydro-abrasive jet machining of GTE parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 144 p. ISBN 5-217-01779-1
11. Serikova E.V. Gidroabrazivnyi metod rezki materialov [Waterjet cutting method of materials]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny – Construction and road building machinery*, 2006, no. 2, pp. 27–29.
12. Morgunov Yu.A., Fedotov A.A., Shvychkov D.V. [The use of waterjet cutting in the processing of complex contoured surface parts]. *Materialy 65 Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii Assotsiatsii avtomobil'nykh inzhenerov (AAI) “Prioritety razvitiya otechestvennogo avtotraktorostroeniya i podgotovki inzhenernykh i nauchnykh kadrov” Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma “Avtotraktorostroenie – 2009”* [Proceedings of the 65th International Scientific Conference of the Association of Automobile Engineers (AAE) “National development priorities of automotive building and training of engineers and scientists” International Scientific Symposium “Automotive Building–2009”]. Moscow, 2009, vol. 7, pp. 170–173.
13. Chieu K.F. *Issledovanie effektivnosti tekhnologii uzkostruinoi plazmennoi rezki metallov*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Research of efficiency of technology narrow jet plasma cutting. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Saint Petersburg, 2008. 26 p.
14. Kirkpatrick I. High definition plasma – an alternative to laser technology. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 1998, vol. 70, iss. 3, pp. 215–217. doi: <http://dx.doi.org/10.1108/00022669810370349>
15. Loktionov A.A., Zakharov V.V. [High-precision plasma arc cutting is represented]. *Trudy 2 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Nauka. Tekhnologii. Innovatsii. Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh, 2–4 dekabria 2011 g. V 6 ch.* [Plasma Cutting as an Effective Technology in the Blank Production. Proceedings of All-Russian Scientific Conference of Young Scientists “Science. Technologies. Innovations”, 2–4 December 2011. In 6 pt.]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pt. 2, pp. 29–30. (In Russian)
16. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A. Povyshenie effektivnosti listovogo raskroya v zagotovitel'nom proizvodstve [Increased efficiency in cutting sheet blank production]. *Polzunovskii al'manakh – Polzunov Almanac*, 2012, no. 1, pp. 158–159.
17. ISO 9013: 2002. *Thermal cutting. Classification of thermal cuts. Geometrical product specification and quality tolerances*. Moscow, Standartinform Publ., 2002. 25 p. (In Russian)
18. Loktionov A.A. Otsenka kachestva reza listovykh materialov pri tonkostruinoi plazmennoi rezke [Assessment a cut of quality of sheet materials in the conditions of high-precision plasma cutting]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 4 (61), pp. 86–91.
19. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A., Nikitin Yu.V. Otsenka geometricheskoi tochnosti reza listovykh materialov pri razlichnykh tekhnologiyakh tonkostruinoi plazmennoi rezki [Evaluation of geometric precision cut of sheet materials with different high-precision plasma cutting]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 3 (60), pp. 25–30.
20. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A. Tochnost' formoobrazovaniya pri tonkostruinoi plazmennoi rezke metallicheskiykh materialov i puti ee povysheniya [Shaping accuracy at high-precision plasma arc cutting metal and the way of its increase]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2009, no. 4 (45), pp. 31–32.

21. Rakhimianov Kh.M., Loktionov A.A. [Analysis of errors in forming trickle plasma cutting metal materials]. *Sbornik trudov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sovremennye problemy v tekhnologii mashinostroeniia", posvyashchennoi 100-letiiu so dnia rozhdeniia professora Mukhanova I.I.* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Modern Problems in Mechanical Engineering Technology", dedicated to the 100th anniversary of the birth of professor Mukhanov I.I.]. Novosibirsk, 2009, pp. 151–153. (In Russian)

22. Rakhimianov Kh.M., Zhuravlev A.I., Loktionov A.A., Rakhimianov A.Kh. Modelirovanie protsessov tonkostruinoi plazmennoi rezki dlia obespecheniia tochnosti formirovaniia krivolineinykh konturov [High-precision plasma arc cutting modeling for shaping accuracy of cam contours assurance]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of NSTU*, 2009, no. 4 (37), pp. 123–134.

23. Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov A.Kh., Lunin S.V. [Mathematical modeling of high-precision plasma arc cutting is represented]. *Trudy 2 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Innovatsii v mashinostroeni"* [Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Scientific and Practical Conference "Innovations in Mechanical Engineering"], Kemerovo, 6–8 October 2011, pp. 161–165. (In Russian)

24. Rakhimyanov A.Kh., Krasil'nikov B.A. [Technological features of plasma cutting aluminum alloys]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Innovatsii v mashinostroeni – osnova tekhnicheskogo razvitiya Rossii 2014"* [Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference "Innovations in Mechanical Engineering Based on Technological Development of Russia–2014"]. Barnaul, 23–26 September 2014, pt. 2, pp. 71–77. (In Russian)

25. Rakhimyanov A.Kh. [High-precision plasma cutting of copper alloys]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Innovatsii v mashinostroeni – osnova tekhnicheskogo razvitiya Rossii 2014"* [Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference "Innovations in mechanical engineering based on technological development of Russia-2014"]. Barnaul, 23–26 September 2014, pt. 2, pp. 66–70. (In Russian)

26. Rakhimyanov A.Kh. Vybór tekhnologicheskikh skhem i optimizatsiya rezhimov tonkostruinoi plazmennoi rezki konstruktsionnykh staley [Selection of technological schemes and high-precision plasma cutting mode optimization for structural steels]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 2 (63), pp. 46–55.

### Funding

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

### Article history:

Received 25 May 2015

Revised 20 June 2015

Accepted 17 July 2015

# СТЕПЕНЬ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ АНОДНОГО РАСТВОРЕНИЯ МЕДИ

*Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор  
Б.А. КРАСИЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, профессор  
С.И. ВАСИЛЕВСКАЯ, аспирант  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Получена 3 июля 2015

Рецензирование 17 июля 2015

Принята к печати 12 августа 2015

**Рахимьянов Х.М.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: kharis51@mail.ru

Приводится оценка степени локализации процесса при интенсификации анодного растворения меди при электрохимической обработке (ЭХО) в условиях механической и гидродинамической активации. Показаны процессы гидродинамического воздействия струи электролита, направленной вдоль и перпендикулярно к поверхности анода и механическое обновление анода на электрохимическое растворение меди. Представлены результаты оценки степени локализации процесса растворения меди в 5 %-м КСl при гидродинамическом воздействии струи электролита, направленной перпендикулярно к поверхности анода, и при гидродинамическом воздействии струи электролита, движущейся вдоль поверхности анода, а также в условиях механического обновления обрабатываемой поверхности анода. Проведенные исследования позволили выявить характер анодного растворения меди при вышеперечисленных способах активации процесса ЭХО. Дана количественная оценка степени локализации процесса при различных способах интенсификации анодного растворения меди.

**Ключевые слова:** электрохимическая обработка, пассивация металла, интенсификация процесса, степень локализации, медь, потенциал, плотность тока, активация поверхности.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-58-65

## Введение

Интенсивное развитие электрохимической обработки (ЭХО) металлов и сплавов привело к созданию новых технологических процессов изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов. ЭХО по сравнению с обычной обработкой резанием имеет ряд преимуществ, что обеспечивает достижение высоких показателей точности, качества обработки и производительности процесса [1–5]. ЭХО позволяет обрабатывать заготовки из высокопрочных материалов, которые трудно или практически невозможно обрабатывать другими методами.

Однако для ЭХО большого количества металлических материалов характерно явление пассивации обрабатываемой поверхности, что в

значительной мере ухудшает процесс анодного растворения [6–10]. Поэтому детальное исследование механизма пассивации анода в условиях электрохимического формообразования представляет как теоретический, так и практический интерес. Существуют различные теории для объяснения пассивного состояния металла [10, 11]. В настоящее время наиболее аргументированы взгляды, объясняющие пассивное состояние на основе пленочного механизма торможения анодного процесса растворения металла.

К настоящему времени известен ряд методов активации поверхности анода, позволяющих снизить или полностью исключить ограничения в обработке. К ним относятся: механический, гидродинамический, лазерный методы [10, 12–16].

Изучению эффективности механического обновления анодной поверхности при ЭХО различных материалов (инструментальных сталей, аморфных и нанокристаллических сплавов, различного рода покрытий) посвящены работы [12–14]. В работе [15] показана попытка применения струи электролита для снятия ограничений, связанных с образованием пассивирующих пленок на поверхности меди. В исследовании [16] дана оценка механизмов активации поверхности при ЭХО нержавеющей стали лазерным излучением. Авторами работ [10, 12, 15, 17, 18] показано, что при интенсификации анодного растворения материалов в условиях ЭХО возможно получить высокую степень локализации процесса в зоне обработки. В связи с этим целью настоящего исследования является оценка степени локализации процесса при интенсификации анодного растворения материала при ЭХО в условиях механической и гидродинамической активации.

### Методика

#### экспериментального исследования

Основным методом изучения процесса ЭХО для оценки анодного поведения обрабатываемого материала являются поляризационные исследования, заключающиеся в определении зависимости плотности тока от потенциала [19].

В работе [12] представлены результаты поляризационных исследований ЭХО меди при механической активации анодной поверхности в водных нейтральных электролитах 5 %-го KCl, 5 %-го Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 5 %-го NaCl; 15 %-го NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> и в кислотном электролите 5 %-го HCl. Выявлено повышение степени локализации анодного растворения меди при данном методе активации. Максимальная степень локализации  $L = 73$  была достигнута при обработке в 5 %-м пассивирующем электролите хлорида калия. В связи с этим в данной работе для поляризационных исследований в условиях гидродинамической активации был выбран данный состав электролита.

В качестве обрабатываемого материала в исследованиях использована медь марки М1 ГОСТ 859–2001. Объяснение выбора указанного материала представлено авторами в работе [12, 20]. Перед каждым экспериментом исследуемую поверхность образца подготавливали согласно

методике, изложенной в работе [19, 21]. Поляризационные исследования проводились на оборудовании, описанном в работах [15, 21].

### Результаты и обсуждение

Оценка степени локализации процесса осуществлялась на основании полученных поляризационных зависимостей анодного растворения в условиях механической и гидродинамической активации. Гидродинамический метод активации обрабатываемой поверхности осуществлялся по следующим схемам:

- струей, движущейся вдоль поверхности анода (рис. 1);
- струей, направленной перпендикулярно к поверхности анода (рис. 2).

Гидродинамика электролита в межэлектродном промежутке (МЭП) – один из важных факторов, определяющих результат ЭХО. Корректный подход к проблеме учета гидродинамических условий обработки является основной задачей в теории ЭХО.

Гидродинамический способ активации поверхности материала струей, движущейся вдоль поверхности анода (рис. 1), описан авторами в работах [15, 18]. В данном способе предлагалось использовать давление струи электролита для снятия ограничений, связанных с образованием пассивирующих пленок на поверхности анода. Интенсификация ЭХО осуществлялась прокачкой электролита вдоль поверхности анода через сменные втулки с каналами круглого

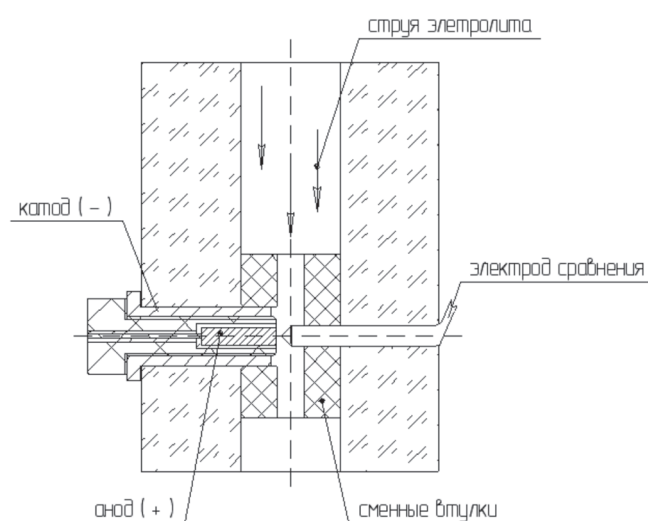


Рис. 1. Схема ячейки для ЭХО в условиях активации поверхности материала струей, движущейся вдоль поверхности анода

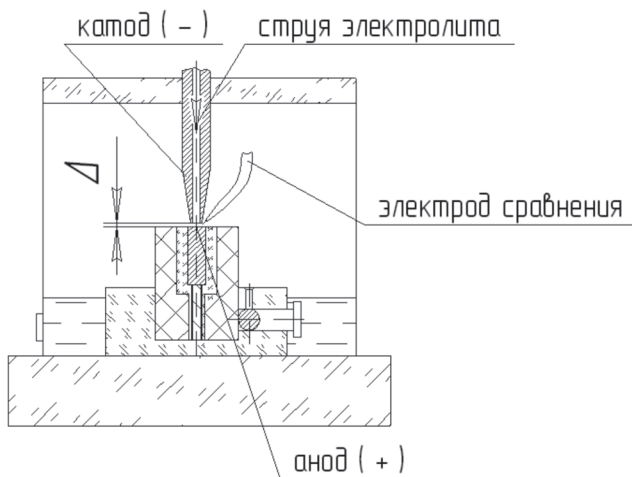


Рис. 2. Схема ячейки для ЭХО в условиях активации поверхности материала струей, направленной перпендикулярно к поверхности анода

сечения  $\varnothing 8$  мм,  $\varnothing 6$  мм и с каналом прямоугольного сечения  $2 \times 6$  мм, что обеспечивает скорости движения струи, равные 3,6 м/с; 8,4 м/с; 16,7 м/с соответственно [15].

Способ активации поверхности материала по схеме, представленной на рис. 2, реализуется следующим образом: струя электролита под давлением по каналу катода попадает на поверхность исследуемого образца (анода). Для подачи струи электролита в зону обработки от компрессора через трубку подается сжатый воздух с заданным давлением в шар-баллон, в который предварительно заливается электролит. Электролит из шара-баллона под давлением воздуха направляется через канал катода на обрабатываемую поверхность. Величина МЭП выбиралась согласно рекомендациям работы [24] и равнялась  $\Delta = 0,25 d_k$ , где  $d_k$  – диаметр канала катода.

Исследование анодного поведения меди в условиях ЭХО при рассмотренных выше гидродинамических способах активации осуществлялось в диапазоне потенциалов от 0 до 8 В при различных скоростях струи.

Для сопоставления результатов ЭХО при различных методах активации были проведены исследования анодного растворения меди в условиях механической и гидродинамической активации обрабатываемой поверхности.

При механическом методе активации анодной поверхности снимались токи включения  $i = f(x)$  при значении анодного потенциала от 0 до 8 В с шагом 0,5 В. Обработка полученных результатов позволила определить плотности

тока в начальный момент времени при соответствующих потенциалах и построить поляризационные зависимости при механической активации поверхности (рис. 3, кривая 1).

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены поляризационные зависимости электрохимического растворения меди в 5 %-м водном нейтральном пассивирующем электролите хлориде калия при механической и гидродинамической интенсификации процесса (рис. 3–5).

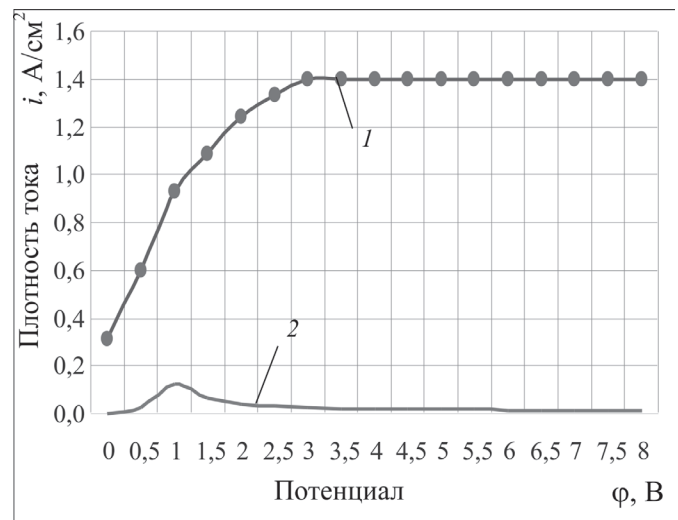


Рис. 3. Поляризационные зависимости при обработке меди в 5 %-м КСl:

1 – при механической интенсификации процесса; 2 – без интенсификации

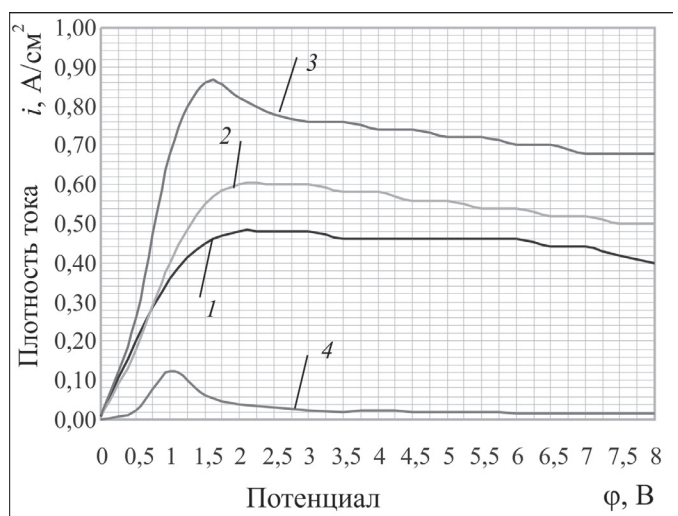


Рис. 4. Поляризационные зависимости анодного растворения меди в 5 %-м КСl при гидродинамической интенсификации процесса струей, движущейся вдоль поверхности анода со скоростями прокачки электролита:

1 – 3,6 м/с; 2 – 8,4 м/с; 3 – 16,7 м/с; 4 – без интенсификации

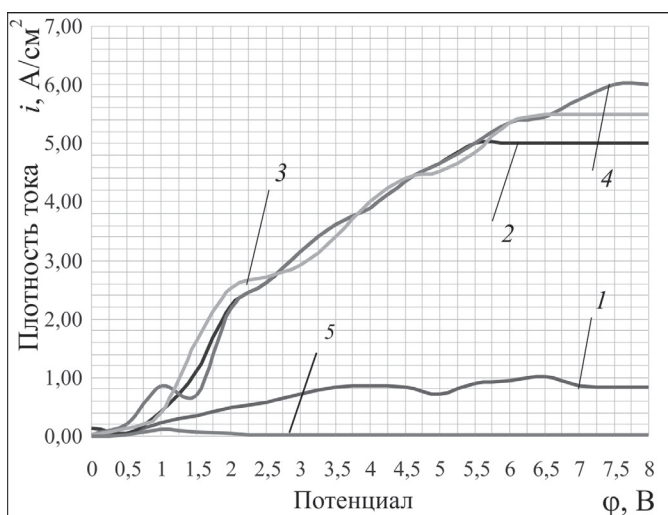


Рис. 5. Поляризационные зависимости анодного растворения меди в 5 %-м КСl при гидродинамической интенсификации процесса струей, направленной перпендикулярно к поверхности анода со скоростями прокачки электролита

1 – 9 м/с; 2 – 14 м/с; 3 – 16 м/с; 4 – 24 м/с); 5 – без интенсификации

Из рис. 3 следует, что в условиях механической интенсификации поверхности при анодном растворении материала максимальная плотность тока достигает 1,4 А/см<sup>2</sup> при потенциалах свыше 3 В. При прокачке электролита вдоль поверхности материала (рис. 4) в диапазоне потенциалов от 0 до 1,5 В наблюдается рост плотности тока тем больший, чем выше скорость прокачки электролита, а в диапазоне потенциалов от 1,5 до 8 В поляризационные зависимости характеризуются стабилизацией плотности тока.

Это связано с тем, что при растворении металла не полностью снимаются ограничения, связанные с возникновением пассивного состояния на основе пленочного или адсорбционного механизма торможения анодного процесса.

Из результатов, представленных на рис. 5, следует, что растворение обрабатываемого материала при струе, направленной перпендикулярно к поверхности анода, осуществляется во всем исследованном диапазоне потенциалов от 0 до 8 В, о чем свидетельствует непрерывное увеличение плотности тока с ростом потенциала. При этом интенсивность роста плотности тока различна при разных значениях скорости струи электролита. Если при минимальной в исследованном диапазоне скорости (рис. 5,

кривая 1), равной 9 м/с, максимальное значение плотности тока достигает 1,0 А/см<sup>2</sup>, то при повышении скорости течения струи до 14 м/с (рис. 5, кривая 2) происходит значительный рост плотности тока, достигающий 5 А/см<sup>2</sup>. Дальнейшее увеличение скорости приводит к незначительному увеличению плотности тока в диапазоне максимальных значений потенциала (рис. 5, кривые 3, 4).

При интенсификации анодного растворения материала различными методами степень локализации определялась соотношением  $L = i_0/i$  [12, 18, 22, 23, 25], где  $i_0$  – плотность тока анодного растворения материала с активацией и  $i$  – плотность тока анодного растворения материала без активации.

Анализ полученных результатов (рис. 6) свидетельствует о том, что в диапазоне потенциалов от 6 до 8 В при гидродинамическом воздействии струи электролита, направленной перпендикулярно к поверхности анода, достигается максимальная степень локализации процесса  $L = 350$ . При механической активации поверхности анода степень локализации процесса составила  $L = 90$  при ( $\phi = 4 \dots 8$  В), а при гидродинамическом воздействии струи электролита, движущейся вдоль поверхности анода в интервале потенциалов от 1,5 до 8 В, степень локализации процесса достигает  $L = 45$ .

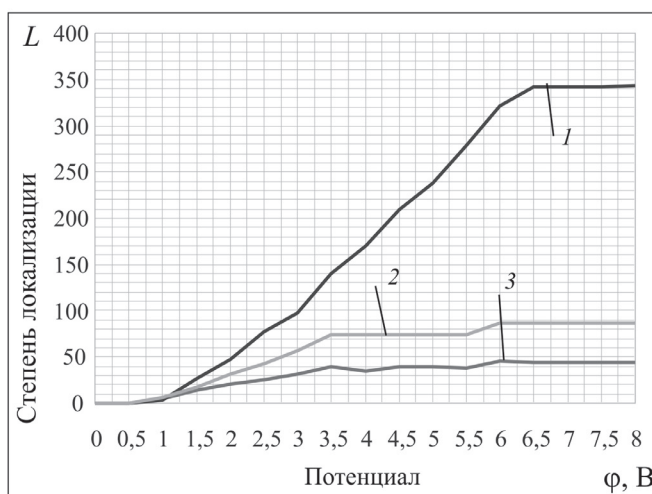


Рис. 6. Степень локализации процесса растворения меди в 5 %-м КСl:

1 – при гидродинамическом воздействии струи электролита, направленной перпендикулярно к поверхности анода; 2 – при механической активации анода; 3 – при гидродинамическом воздействии струи электролита, движущейся вдоль поверхности анода

## Выводы

Проведенные исследования позволили выявить характер анодного растворения меди в 5 %-м водном нейтральном пассивирующем электролите хлорида калия при гидродинамической и механической интенсификации процесса в условиях ЭХО. Выявлено, что при гидродинамическом воздействии струи электролита, направленной перпендикулярно к поверхности анода, достигается максимальная степень локализации, равная  $L = 350$ . Это объясняется тем, что при ударе струи электролита о поверхность анода осуществляется удаление пассивирующих пленок и снятие диффузионных ограничений, а также происходит вынос продуктов анодного растворения из МЭП. При механической интенсификации процесса с поверхности анода удаляются пассивирующие пленки, но не устраняются диффузионные ограничения. В результате этого плотность тока снижается, что приводит к снижению степени локализации до  $L = 90$ . При гидродинамическом воздействии струи электролита, движущейся вдоль поверхности анода, достигается минимальное значение степени локализации  $L = 45$ , что объясняется недостаточным уровнем силового воздействия струи электролита для полного удаления пассивирующих пленок.

## Список литературы

1. 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.
2. *Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В.* Анодное растворение быстрорежущей стали Р6М5 и ее составляющих в водных растворах // *Сборник научных трудов НГТУ*. – 2003. – № 4 (34). – С. 141–147.
3. *Кабанов Б.Н., Давыдов А.Д., Кащеев В.Д.* О взаимосвязи между особенностями анодного растворения металлов и точностью электрохимической размерной обработки // *Размерная электрохимическая обработка деталей машин. Ч. 1. Основы теории процесса: материалы IV всесоюзной конференции*. – Тула, 1975. – С. 10–14.
4. О влиянии электродных процессов на точность электрохимической размерной обработки / А.Д. Давыдов, Р.А. Мирзоев, В.Д. Кащеев, Б.Н. Кабанов // *Электрохимия*. – 1977. – Т. 8, № 10. – С. 1500–1502.
5. *Саушкин Б.П.* О динамике анодной поверхности при ЭХРО металлов в нестационарных услови-

ях // *Электронная обработка материалов*. – 1973. – № 5. – С. 11–14.

6. *Мороз И.И., Алексеев Г.А., Водяницкий О.А.* Электрохимическая обработка металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 208 с.

7. *Попилов Д.Я.* Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.

8. *Румянцев Е.М., Невский О.И., Волков В.И.* О влиянии поверхностных пленок на характер анодного растворения материалов при высоких плотностях тока // *Электронная обработка материалов*. – 1980. – № 4. – С. 17–21.

9. *Кабанов Б.Н.* Электрохимия металлов и адсорбция. – М.: Наука, 1976. – 104 с.

10. *Давыдов А.Д., Камкин А.Н.* Развитие теории анодной активации пассивных металлов // *Электрохимия*. – 1978. – Т. 14, № 7. – С. 979–992.

11. *Крылов В.С., Давыдов А.Д.* Проблемы теории электрохимического формообразования и точности размерной электрохимической обработки // *Электрохимия*. – 1975. – Т. 11, № 8. – С. 1155–1179.

12. *Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И.* Исследование электролитов, обеспечивающих 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.

13. *Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеев А.Н.* Электроалмазная обработка напыленных износостойких покрытий // *Инженерия поверхностного слоя деталей машин: труды Международной научно-практической конференции / Министерство образования и науки Российской Федерации, Кузбасский государственный технический университет, Белорусский национальный технический университет; [под ред. В.Ю. Блюменштейна и Ф.И. Пантеленко]*. – Кемерово, 2009. – С. 365–368.

14. *Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимьянов К.Х.* Точность формообразования при электроалмазной прорезке пазов в аморфных и нанокристаллических сплавах // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2006. – № 2 (31). – С. 32–33.

15. Влияние гидродинамического режима на скорость анодного растворения меди в пассивирующих электролитах / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, А.С. Захаров, С.И. Василевская // *Механики XXI века*. – 2015. – № 14. – С. 112–115.

16. *Рахимьянов Х.М., Гаар Н.П.* Интенсификация электрохимической размерной обработки нержавеющей стали лазерным излучением // *Механики XXI века*. – 2008. – № 7. – С. 149–152.



17. Изменение степени локализации анодного растворения металлов при переходе к импульсным режимам электрохимической размерной обработки / А.Д. Давыдов, В.Д. Кашеев, Б.Н. Кабанов, Е.А. Хряпина // Размерная электрохимическая обработка деталей машин – ЭХО–80: тезисы докладов. – Тула, 1980. – С. 8–13.

18. Основы повышения точности электрохимического формообразования / Ю.Н. Петров, Г.Н. Корчагин, Г.Н. Зайдман, В.П. Саушкин. – Кишинев: Штиинца, 1977. – 62 с.

19. *Фрейман Л.И., Макаров В.А., Брыскин И.Е.* Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите / под ред. Я.М. Колотыркина. – Л.: Химия, 1972. – 240 с.

20. *Дикусар А.И., Доменте Г.С., Энгельгардт Г.Р.* Анодное растворение меди в концентрированных растворах нитратов при высоких плотностях тока // Электронная обработка материалов. – 1983. – № 3. – С. 21–28.

21. *Василевская С.И., Герасимов Н.В.* Исследование анодного поведения меди в условиях электрохимической обработки // Наука. Промышленность. Оборона: труды XVI Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 70-летию Побе-

ды в Великой Отечественной войне, (Новосибирск, 22–24 апреля 2015 г.). – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – С. 178–182.

22. *Петренко В.И., Дикусар А.И.* Факторы, определяющие рассеивающую способность электролитов при электрохимической размерной обработке металлов // Теория и практика электрохимической обработки металлов. – Кишинев: Штиинца, 1976. – С. 43–64.

23. *Давыдов А.Д.* Механизм локализации процесса анодного растворения металлов при электрохимической размерной обработке // Электрохимия. – 1975. – [Т.] 11, вып. 5. – С. 809–810.

24. *Волков К.Н.* Моделирование крупных вихрей турбулентного теплообмена в области взаимодействия круглой струи с плоской преградой // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47, № 3. – С. 31–42.

25. *Саушкин Б.П., Зайдман Г.Н.* О рассеивающей способности электролитов, используемых в электрохимической размерной обработке // Материалы III Всесоюзной конференции по электрохимической размерной обработке металлов «Новое в электрохимической размерной обработке металлов». – Кишинев: Штиинца, 1972. – С. 45–46.

## OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(68), July – September 2015, Pages 58–65

### The degree of the process localization at the intensification of anodic dissolution of copper

**Rakhimyanov Kh.M.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru

**Krasilnikov B.A.**, Ph.D. (Engineering), Professor, e-mail: \_167bak@ngs.ru

**Vasilevskaya S.I.**, Ph.D. student, e-mail: Svetlana.vasilevskaya.87@mail.ru

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

#### Abstract

The problem of the evaluation of the degree of process localization during the anodic dissolution intensification of copper at the electrochemical machining (ECM) under conditions of mechanical and hydrodynamic activation is considered. The processes of hydrodynamic effect of electrolyte jet directed along and perpendicular to the surface of the anode and the effect of mechanical anode stripping on electrochemical dissolution of copper are shown. The results of evaluation of the degree of localization of the copper dissolution process in 5 % KCl under hydrodynamic drag of electrolyte jets directed perpendicular to the surface of the anode during the hydrodynamic drag of the jet of electrolyte, moving along the surface of the anode, and also under condition of mechanical renovation of treated anode surface, are presented. Studies have revealed the nature of the anodic dissolution of copper at the above mentioned methods of activation of ECM process. A quantitative assessment of the degree of the process localization at different methods of intensification of anodic dissolution of copper is given. It is found that under the hydrodynamic drag of electrolyte jet directed perpendicular to the surface of the anode, the maximum degree of localization is equal to  $L = 350$ . When the mechanical process intensification passivation films are removed from the anode surface, but diffusion limitations does not eliminates. As a result, the current density decreases, resulting in lower degree of

localization to  $L = 90$ . In the hydrodynamic drag of the jet of electrolyte, moving along the surface of the anode is achieved by the minimum value of the degree of localization of  $L = 45$ , due to the insufficient level of force impact of the electrolyte jet to completely removal passivating films.

### Keywords:

electrochemical processing, passivation of metal, intensification of the process, the degree of localization, copper, potential, current density, activation of a surface.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-58-65

### References

1. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Yanpolskii V.V., Krasil'nikov D.B. Elektrokhimicheskaya obrabotka bezvol'framovykh tverdykh splavov [Electrochemical processing of tungsten carbide]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2010, no. 3 (48), pp. 3–7.
2. Rakhimyanov Kh.M., Yanpolskii V.V. Anodnoerastvorenie bystrorezhushchei stali R6M5 i ee sostavlyayushchikh v vodnykh rastvorakh [Anodic dissolution of HSS R6M5 and its components in a water solution]. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU – Transaction of scientific papers of Novosibirsk state technical university*, 2003, no. 4 (34), pp. 141–147.
3. Kabanov B.N., Davydov A.D., Kashcheev V.D. [On the relationship between the characteristics of the anodic dissolution of metals and precision electrochemical machining], *Materialy IV vsesoyuznoi konferentsii “Razmernaya elektrokhimicheskaya obrabotka detalei mashin”*. Ch. 1. *Osnovy teorii protsessov* [Proceedings of the IV All-Union Conference “Dimensional Electrochemical Machining of Machine Parts”. Pt. 1. Basic Theory of the Process]. Tula, 1975, pp. 10–14. (In Russian)
4. Davydov A.D., Mirzoev R.A., Kashcheev V.D., Kabanov B.N. O vliyaniy elektrodnykh protsessov na tochnost' elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotki [Effect of electrodes processes on the accuracy of electrochemical dimensional machining]. *Elektrokhimiya – Russian Journal of Electrochemistry*, 1977, vol. 8, no. 10, pp. 1500–1502. (In Russian)
5. Saushkin B.P. O dinamike anodnoi poverkhnosti pri EKhRO metallov v nestatsionarnykh usloviyakh [The dynamics of the anode surface at electrochemical dimensional machining of metals in nonstationary conditions]. *Elektronnaya obrabotka materialov – Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 1973, no. 5, pp. 11–14. (In Russian)
6. Moroz I.I., Alekseev G.A., Vodyanitskii O.A. *Elektrokhimicheskaya obrabotka metallov* [Electrochemical machining of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 208 p.
7. Popilov D.Ya. *Elektrofizicheskaya i elektrokhimicheskaya obrabotka materialov. Spravochnik* [Electrophysical and electrochemical machining of materials. Directory]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 400 p.
8. Rumyantsev E.M., Nevskii O.I., Volkov V.I. O vliyaniy poverkhnostnykh plenok na kharakter anodnogo rastvoreniya materialov pri vysokikh plotnostyakh toka [On the influence of surface films on the character of anodic dissolution of materials at high current densities]. *Elektronnaya obrabotka materialov – Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 1980, no. 4, pp. 17–21. (In Russian)
9. Kabanov B.N. *Elektrokhimiya metallov i adsorbtsiya* [Electrochemistry of metals and adsorption]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 104 p.
10. Davydov A.D., Kamkin A.N. Razvitie teorii anodnoi aktivatsii passivnykh metallov [Development of the theory of passive activation of the anode metal]. *Elektrokhimiya – Russian Journal of Electrochemistry*, 1978, vol. 14, no. 7, pp. 979–992. (In Russian)
11. Krylov V.S., Davydov A.D., Kozak E. Problemy teorii elektrokhimicheskogo formoobrazovaniya i tochnosti razmernoi elektrokhimicheskoi obrabotki [The problems of the electrochemical shaping theory and precision of a dimensional]. *Elektrokhimiya – Russian Journal of Electrochemistry*, 1975, vol. 11, no. 8, pp. 1155–1179. (In Russian)
12. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Vasilevskaya S.I. [Research electrolytes, providing precision electrochemical machining of copper M1]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Innovatsii v mashinostroenii – osnova tekhnicheskogo razvitiya Rossii–2014”* [Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference “Innovations in Mechanical Engineering Based on Technological Development of Russia–2014”]. Barnaul, 2014, pt. 2, pp. 100–104. (In Russian)
13. Rakhimyanov Kh.M., Yanpolskiy V.V., Moiseenko A.N. [Electro-diamond processing of sprayed wear resistant coatings]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Inzheneriya poverkhnostnogo*

*sloya detalei mashin*» [Proceedings of the International Scientific-Practical Conference “Engineering of the Surface Layer of Machine Parts”], Kemerovo, 2009. pp. 365–368. (In Russian)

14. Rakhimyanov Kh.M., Krasil'nikov B.A., Rakhimyanov K.Kh.. Tochnost' formoobrazovaniya pri elektroalmaznoi prorezke pazov v amorfnykh i nanokristallicheskiykh splavakh [Forming accuracy at electro-diamond slotting grooves in the amorphous and nanocrystalline alloys]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2006, no. 2 (31), pp. 32–33.

15. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Zakharov A.S., Vasilevskaya S.I. Vliyaniye 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.

16. Rakhimyanov Kh.M., Gaar N.P. Intensifikatsiya elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotki nerzhavayushchei stali lazernym izlucheniem [Intensification electrochemical dimensional machining of stainless steel by laser light]. *Mekhaniki XXI veku – Mechanics of the XXI century*, 2008, no. 7, pp. 149–152.

17. Davydov A.D., Kashcheev V.D., Kabanov B.N., Khryapina E.A. [Changing the degree of localization of the anodic dissolution of metals in the transition to a pulsed mode electrochemical machining]. *Tezisy dokladov Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Razmernaya elektrokhimicheskaya obrabotka detalei mashin. EKHO–80”* [Abstracts of All-Russian Scientific and Technical Conference “Dimensional Electrochemical Machining of Machine Parts. ECM–80”]. Tula, 1980, pp. 8–13. (In Russian)

18. Petrov Yu.N., Korchagin G.N., Zaidman G.N., Saushkin V.P. *Osnovy povysheniya tochnosti elektrokhimicheskogo formoobrazovaniya* [Basics improve the accuracy of electrochemical shaping]. Kishinev, Shtiintsa Publ., 1977. 62 p.

19. Freiman L.I., Makarov V.A., Bryskin I.E. *Potentsiostaticheskie metody v korrozionnykh issledovaniyakh i elektrokhimicheskoi zashchite* [Potentiostatic methods in studies of corrosion and electrochemical protection]. Leningrad, Khimiya Publ., 1972. 240 p.

20. Dikumar A.I., Domente G.S., Engel'gardt G.R. Anodnoe rastvorenie medi v kontsentrirrovannykh rastvorakh nitratov pri vysokikh plotnostyakh toka [Anodic dissolution of copper in the concentrated solutions of nitrates at high current densities]. *Elektronnaya obrabotka materialov – Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 1983, no. 3, pp. 21–28.

21. Vasilevskaya S.I., Gerasimov N.V. [Research the behavior of anode copper in conditions of electrochemical machining]. *Trudy XVI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Nauka. Promyshlennost'. Oborona», posvyashchennoi 70-letiyu Pobedy v Velikoi Otechestvennoi voine* [Proceedings of the XVI All-Russian Scientific and Technical Conference “Science. Industry. Defense”, dedicated to the 70th anniversary of the Victory of the Great Patriotic War]. Novosibirsk, 2015, pp. 178–182. (In Russian)

22. Petrenko V.I. Dikumar A.I. [Factors determining the throwing power of electrolytes in the electrochemical dimensional machining of metals]. *Sbornik statei Instituta prikladnoi fiziki AN MSSR «Teoriya i praktika elektrokhimicheskoi obrabotki metallov»* [Proceedings of the Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of the MSSR “Theory and Practice of Electrochemical Machining of Metals”], 1976, pp. 43–64. (In Russian)

23. Davydov A.D. Mekhanizm lokalizatsii protsessa anodnogo rastvoreniya metallov pri elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotke [The mechanism of the localization process of anodic dissolution of metals in the electrochemical processing]. *Elektronnaya obrabotka materialov – Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 1975, vol. 11, no. 5, pp. 809–810. (In Russian)

24. Volkov K.N. Modelirovaniye krupnykh vikhrei turbulentnogo teploobmena v oblasti vzaimodeystviya krugloi strui s ploskoi pregradoi [Large eddy simulation in a fully developed turbulent flow in a channel and comparison of subgrid eddy viscosity models]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2006, vol. 47, no. 3, pp. 31–42. (In Russian)

25. Saushkin B.P., Zaidman G.N. [On the scattering power of electrolytes used in electrochemical dimensional machining]. *Materialy III Vsesoyuznoi konferentsii po elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotke metallov «Novoe v elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotke metallov»* [Proceedings of the III All-Union Conference on Electrochemical Dimensional Machining of Metals “New in Electrochemical Dimensional Machining of Metals”]. Kishinev, 1972, pp. 45–46. (In Russian)

#### Article history:

Received 3 July 2015

Revised 17 July 2015

Accepted 12 August 2015

# ШЛИФОВАНИЕ МИКРОПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ ИМПРЕГНИРОВАННЫМИ КРУГАМИ

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

Поступила 30 апреля 2015  
Рецензирование 29 мая 2015  
Принята к печати 30 июня 2015

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

Высокая химическая и адгезионная активность микропористых покрытий на никелевой и железной основе к абразивным зернам шлифовальных кругов способствует схватыванию контактирующих тел и интенсивному налипанию частиц покрытия на рабочую поверхность режущего инструмента. Эти явления вызывают рост тепловой и силовой напряженности процесса, вследствие чего возрастает износ кругов, шероховатость поверхности, в поверхностных слоях деталей происходят структурные и фазовые превращения. Поэтому одной из первоочередных задач для повышения эффективности шлифования является, с одной стороны, снижение температуры, а с другой – уменьшение бесполезных затрат энергии. Адгезионно-химическую активность микропористых покрытий к абразивным зернам можно уменьшить за счет изыскания способов, снижающих поверхностную энергию контактирующей пары. В теории физико-химической механики материалов основным является положение об облегчении деформирования тел в присутствии среды, содержащей поверхностно-активные вещества.

В статье предлагается путь повышения эффективности процесса шлифования микропористых покрытий за счет снижения взаимодействия контактирующих пар внедрением в зону резания специальных составов, которые при соприкосновении с ювенильными поверхностями обрабатываемого материала образуют на нем защитные пленки и тем самым препятствуют прямому контакту покрытия с зернами круга. С этой целью испытаны новые составы жидких импрегнаторов при обработке микропористых покрытий на плоскошлифовальном станке методом врезного шлифования без применения смазочно-охлаждающих жидкостей. Импрегнаторами для кругов служили водорастворимые полимеры, а также водные растворы аминов, жирных кислот и карбамидов.

В результате проведенных комплексных исследований режущей способности кругов из электрокорунда на керамической связке, пропитанных различными составами импрегнаторов, в сравнении с непропитанным кругом и влияния импрегнаторов на основные показатели процесса шлифования (стойкость и износ абразивного инструмента, энергетические затраты, шероховатость шлифованной поверхности) установлено, что в рассмотренных условиях импрегнированные круги из электрокорунда обладают более высокой режущей способностью по сравнению с непропитанным кругом. Оценка результатов исследований по рейтинговому методу показала, что наибольшей режущей способностью при плоском шлифовании микропористых покрытий на никелевой и железной основе обладают круги, пропитанные импрегнатором на основе триэтаноламина и олеиновой кислоты.

**Ключевые слова:** микропористые покрытия, абразивный инструмент, шлифование, пропитка, стойкость кругов, режущая способность, импрегнатор.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-66-74

## Введение

Шлифование труднообрабатываемых микропористых покрытий (далее покрытий) деталей обычным абразивным инструментом (АИ) в настоящее время является малоэффективным способом обработки прежде всего из-за низкой стойкости шлифовальных кругов вследствие их «засаливания», интенсивного затупления и износа [1]. Применение традиционных путей улучшения процесса шлифования (подбор режимов резания [2–4] и кругов оптимальной характеристики [5, 6], повышение однородности зернового состава [7], способов и режимов правки АИ [8, 9], специальных смазочно-охлаждающих жидкостей [10–13] и др.) часто не дает необходимого эффекта.

В то же время существует еще один путь совершенствования процесса абразивной обработки покрытий, заключающийся в изменении технологической среды путем так называемой пропитки, или импрегнирования, кругов специальными веществами, улучшающими их режущие свойства [14]. Импрегнирование представляется исключительно перспективным методом в силу гибкости, простоты его применения и высокой эффективности. Пропитка готовых абразивных кругов может осуществляться в соответствующих растворах, расплавах, суспензиях как в нагретом, так и в холодном состоянии.

Выбор импрегнатора определяется характером его воздействия на обрабатываемый металл и абразивный круг. В общем случае импрегнатор может оказывать влияние на процесс шлифования [15]: а) косвенное, через изменение физико-механических и других свойств инструмента; б) непосредственное, участвуя в контактных процессах зоны резания. Более важным, особенно при жидкой пропитке, является непосредственное воздействие. В основе контактных процессов лежит взаимодействие поверхностей абразивного и обрабатываемого материалов, т. е. образование поверхностных связей, их работа и разрушение. Практическим результатом такого взаимодействия является схватывание инструментального и обрабатываемого материала, которое часто приводит к «засаливанию» кругов. Оно обусловлено потенциальной реакционной способностью контактирующих тел. Импрегнатор, создавая прослойку между абразивным

и обрабатываемыми материалами, препятствует схватыванию и ликвидирует «засаливание» кругов.

В машиностроении при изготовлении деталей из однородных (монокристаллических) материалов широко применяются комплексные составы, например, на основе стеарина с добавками серы и стеарата алюминия [16, 17], а также кислород- и фторсодержащих веществ [18]. В результате снижаются коэффициент трения, сила резания и износ круга, повышается качество поверхности по параметру шероховатости. Пропитка абразивных кругов на керамической связке водным раствором йодистого натрия и эпалама [19] и водными дисперсиями сополимеров акрилатного и стирольного типов [20] позволяет исключить прижоги обработанной поверхности и повысить стойкость АИ. Для повышения эффективности шлифования фасонных деталей из труднообрабатываемых материалов и заточки режущего инструмента из быстрорежущих сталей применяют пропитку кругов поверхностно- и химически-активными веществами и полимерными соединениями [21, 22].

Все вышеупомянутые импрегнаторы используются для пропитки кругов на керамической связке при изготовлении деталей как с применением смазочно-охлаждающих жидкостей, так и без СОЖ. Вместе с тем в технической литературе пока нет аналогичных данных, относящихся к обработке износостойких покрытий деталей. В связи с этим в филиале ФГБОУ ВПО «АлтГТУ» в г. Рубцовске авторами совместно с ООО «Научные исследования и химические продукты» (г. Новосибирск) проводятся широкие исследования влияния импрегнаторов на процессы шлифования труднообрабатываемых покрытий. Цель этих исследований – определение эффективного вида импрегнатора для предварительного шлифования микропористых покрытий.

## Методика

### экспериментального исследования

Импрегнаторы вводились в поры круга в жидком виде путем свободного капиллярного поднятия раствора. Жидкие импрегнаторы значительно упрощают операцию пропитки и создают условия для непосредственного влияния на процесс шлифования путем участия в кон-

тактных процессах зоны резания. По результатам предварительных исследований в качестве импрегнаторов использовали пропиточные составы трех групп: водорастворимые полимеры, амины и жирные кислоты, карбамиды.

В итоге для исследований влияния импрегнаторов на режущую способность кругов при шлифовании покрытий были подготовлены следующие пропиточные составы (указаны в процентах):

*Состав № 0:* без пропитки (базовый).

*Состав № 1:* 0,01 %-й раствор полиакриламида.

*Состав № 2:*

масло индустриальное – 8,9;

ПАВ – 2,4;

жирные кислоты – 2,7;

вода – 86.

*Состав № 3:*

карбометилцеллюлоза – 0,45;

водный раствор силиката натрия (жидкое стекло) – 9,0;

вода – 90,55.

*Состав № 4:*

карбометилцеллюлоза – 1,0;

водный раствор силиката натрия (жидкое стекло) – 50,0;

вода – 49,0.

*Состав № 5:*

полиакриламид – 0,02;

неонол – 0,45;

вода – 99,53.

*Состав № 6:*

полиакриламид – 0,08;

тиокарбамид – 0,05;

вода – 99,87.

*Состав № 7:*

полиакриламид – 0,1;

тиокарбамид – 1,0;

вода – 98,9.

*Состав № 8:*

триэтанолламин – 27,8;

олеиновая кислота – 5,2;

0,01 %-й раствор полиакриламида – 67.

*Состав № 9:*

триэтанолламин – 7,0;

олеиновая кислота – 1,3;

0,01 %-й раствор полиакриламида – 91,7.

*Состав № 10:*

триэтанолламин – 40;

вода – 60.

*Состав № 11:*

триэтанолламин – 60;

вода – 40.

*Состав № 12:*

тиокарбамид – 1,0;

вода – 99,0.

*Состав № 13:*

тиокарбамид – 5,0;

вода – 95,0.

*Состав № 14:*

карбамид – 5;

тиокарбамид – 5;

вода – 90.

*Состав № 15:*

триэтанолламин – 6,0;

олеиновая кислота – 4,0;

вода – 90.

*Состав № 16:*

триэтанолламин – 7,0;

олеиновая кислота – 1,3;

вода – 91,7.

*Состав № 17:*

триэтанолламин – 27,8;

олеиновая кислота – 5,2;

вода – 67.

*Состав № 18:*

триэтанолламин – 69,6;

олеиновая кислота – 13,1;

вода – 17,3.

*Состав № 19:*

триэтанолламин – 41,7;

олеиновая кислота – 7,9;

вода – 50,4.

Все пропитанные круги проходили испытания на специальном стенде при скорости 44 м/с в течение 20...30 с для проверки влияния составов импрегнаторов на прочностные свойства АИ. Установлено, что прочность инструмента после импрегнирования не снижается. Это свидетельствует об отсутствии влияния пропитки на имеющиеся в инструменте связи.

Технологические испытания указанных составов проведены на плоскошлифовальном станке модели 3601 периферией круга методом врезного шлифования с использованием абразивных кругов формы 1 с размерами 150 × 20 × 32 мм ГОСТ Р52781–2007 с характеристикой 25AF60O6V35 (25A25HCT16K7).

Обработке подвергали широко распространенные плазменные покрытия на никелевой (по-

крытие ПВ) и железной (покрытие ПЖ) основе [2]. Обрабатывались плазменно-напыленные образцы призматической формы с размерами  $100 \times 70 \times 22$  мм. Режимы шлифования: скорость резания – 22 м/с; скорость продольного хода стола – 7 м/мин; вертикальная подача – 0,01 мм/дв. ход. Шлифование производилось без применения смазочно-охлаждающих жидкостей. Для оценки технологической эффективности различных импрегнаторов использовали следующие критерии:

– период стойкости  $T$ , мин абразивного круга, определяемый по появлению следов дробления или прижогов на шлифованной поверхности покрытий;

– коэффициент шлифования по объему  $K_{ш}$ ,  $\text{мм}^3/\text{мм}^3$ ;

– удельную мощность шлифования  $K_N$ ,  $\text{Вт} \cdot \text{мин}/\text{мм}^3$ ;

– комплексный критерий  $K_M$ ,  $\text{мм}^3/\text{мин} \cdot \text{Вт} \cdot \text{мкм}$ ;

– параметр шероховатости шлифованных образцов  $R_a$ , мкм.

Продолжительность каждого опыта равнялась периоду стойкости круга. Размерный износ

АИ измеряли индикатором часового типа с ценой деления 0,001 мм. Шероховатость шлифованной поверхности контролировалась на профилографе – профилометре АБРИС – ПМ7. Для замера мощности шлифования применялся однофазный лабораторный ваттметр Д539. Каждую серию испытаний повторяли не менее трех раз, что обеспечивало достоверность полученных результатов с вероятностью  $P = 0,95$ . По каждой серии экспериментов определялись средние значения показателей.

### Результаты экспериментальных исследований и обсуждение

Усредненные результаты по выбранным показателям для всех испытанных пропиточных составов при шлифовании покрытий представлены в табл. 1.

Из результатов испытаний (см. табл. 1) видно, что варьируя составами импрегнаторов при шлифовании покрытий ПВ и ПЖ, можно более чем в 4 раза изменить значение  $T$ , более чем

Таблица 1

Усредненные показатели плоского врезного шлифования покрытий на никелевой (числитель) и железной (знаменатель) основе кругом 25AF60O6V, пропитанным различными импрегнаторами

Составы импрегнаторов	$T$ , мин	$R_a$ , мкм	$K_{ш}$ , $\frac{\text{мм}^3}{\text{мм}^3}$	$K_N$ , $\frac{\text{Вт} \cdot \text{мин}}{\text{мм}^3}$	$K_M$ , $\frac{\text{мм}^3}{\text{мин} \cdot \text{Вт} \cdot \text{мкм}}$
№ 0	0,35/0,68	0,62/0,42	7,7/13,3	0,79/0,85	2,05/2,81
№ 1	0,28/0,57	0,63/0,53	6,1/11,8	0,86/0,88	1,85/2,14
№ 2	0,32/0,68	0,61/0,49	7,4/16,0	0,86/0,86	1,90/2,36
№ 3	0,30/0,62	0,73/0,50	7,1/12,1	0,96/0,92	1,43/2,16
№ 4	0,22/0,53	0,68/0,47	5,8/10,0	1,34/0,87	1,10/2,45
№ 5	0,28/0,66	0,65/0,50	6,8/12,6	0,93/0,96	1,66/2,08
№ 6	0,35/0,52	0,67/0,51	8,6/12,1	0,96/0,92	1,56/2,13
№ 7	0,50/0,73	0,61/0,49	11,7/15,3	0,90/0,89	1,81/2,30
№ 8	0,46/0,73	0,69/0,46	10,7/17,4	0,78/0,90	1,86/2,41
№ 9	0,41/0,69	0,66/0,49	10,0/15,9	0,87/0,90	1,73/2,26
№ 10	0,68/0,90	0,60/0,48	15,6/20,8	0,82/0,91	2,04/2,29
№ 11	0,70/0,92	0,62/0,48	16,1/21,5	0,85/0,89	1,90/2,34
№ 12	0,52/0,74	0,59/0,46	12,7/16,4	0,83/0,93	2,04/2,34
№ 13	0,63/0,86	0,56/0,46	14,1/18,6	0,83/0,90	2,16/2,42
№ 14	0,81/0,95	0,56/0,51	17,9/22,7	0,86/0,89	2,09/2,19
№ 15	0,50/0,72	0,66/0,52	10,9/16,9	0,84/0,90	1,79/2,14
№ 16	0,46/0,79	0,66/0,47	10,6/17,4	1,04/0,89	1,46/2,39
№ 17	0,56/0,82	0,61/0,50	14,2/19,5	0,86/0,87	1,90/2,29
№ 18	0,93/1,03	0,58/0,51	19,5/24,1	0,86/0,93	2,00/2,11
№ 19	0,86/0,97	0,61/0,45	18,5/22,6	0,86/0,91	1,91/2,43

в 3,3 раза – размерный износ круга, более чем в 1,3 раза – энергетические затраты.

Очевидно, для практических целей оценка импрегнаторов по одному критерию неприемлема, а по нескольким критериям одновременно затруднен выбор их рационального состава. Однако можно избежать затруднения, если использовать рейтинговый метод оценки результатов испытаний [23]. В табл. 2 представлены результаты оценки испытаний при ранжировании составов импрегнаторов по важнейшим критериям: периоду  $T$  стойкости круга, коэффициентам шлифования по объему  $K_{ш}$  и комплексному критерию  $K_M$ , характеризующим энергетические затраты, производительность и шероховатость шлифованных поверхностей. Число баллов, характеризующее каждый критерий, равно единице для состава, имеющего по данному критерию наименьшую технологическую эффективность и максимальное значение для импрегнатора, показавшему лучшие результаты. Из табл. 2 видно,

что при шлифовании покрытия ПВ к лучшему импрегнатору относится состав № 18 (55 баллов), а при обработке покрытия ПЖ наибольшую технологическую эффективность показал состав № 19 (55 баллов).

Рейтинговый критерий оценки можно использовать также и для выбора универсальных импрегнаторов, предназначенных для шлифования покрытий различных типов кругами на керамической связке (табл. 2).

Видно, что наиболее универсальным импрегнатором для шлифования покрытий на никелевой и железной основе кругами на керамической связке является состав № 19 (107 баллов) на основе триэтаноламина и олеиновой кислоты. Хорошие результаты получены также при использовании импрегнаторов № 11 (92,5 балла) и № 14 (99 баллов).

Повышение режущей способности кругов, пропитанных составом № 19, объясняется образованием в процессе шлифования граничного

Таблица 2

**Рейтинговая оценка различных импрегнаторов при плоском шлифовании покрытий на никелевой (числитель) и железной (знаменатель) основе кругом 25AF60O6V**

Составы импрегнаторов	Число баллов, характеризующих критерии			Суммарное число баллов	Суммарное число баллов при обработке двух видов испытанных покрытий
	периода стойкости $K_T$	износа круга $K_{Kш}$	энергетических затрат и качества $K_{K_M}$		
№ 0	6,5/6,5	6/6	18/20	30,5/32,5	63
№ 1	2,5/3	2/2	9/4,5	13,5/9,5	23
№ 2	5/6,5	5/9	12/14	22/29,5	51,5
№ 3	4/4	4/3,5	2/6	10/13,5	23,5
№ 4	1/2	1/1	1/19	3/22	25
№ 5	2,5/5	3/5	5/1	10,5/11	21,5
№ 6	6,5/1	7/3,5	4/3	17,5/7,5	25
№ 7	11,5/10,5	12/7	8/11	31,5/28,5	60
№ 8	9,5/10,5	10/13	10/16	29,5/39,5	69
№ 9	8/8	8/8	6/8	22/24	46
№ 10	16/16	16/16	16,5/9,5	48,5/41,5	90
№ 11	17/17	17/17	12/12,5	46/46,5	92,5
№ 12	13/12	13/10	16,5/12,5	42,5/34,5	77
№ 13	15/15	14/4	20/17	49/36	85
№ 14	18/18	18/19	19/7	55/44	99
№ 15	11,5/9	11/11	7/4,5	29,5/24,5	54
№ 16	9,5/13	9/12	3/15	21,5/40	61,5
№ 17	14/14	15/15	12/9,5	41/38,5	79,5
№ 18	20/20	20/20	15/2	55/42	97
№ 19	19/19	19/18	14/18	52/55	107



смазочного слоя, предотвращающего схватывание ювенильных поверхностей абразивного зерна и обрабатываемых плазменных покрытий. Указанный смазочный слой образуется в результате разрушения слабых химических связей поверхности абразивных зерен с молекулами триэтаноламина и олеиновой кислоты.

### Выводы

1. Круги, пропитанные предложенными импрегнаторами (№ 1–19), в основном оказались эффективнее непропитанного круга. Импрегнирование абразивного инструмента на керамической связке оказывает влияние на все показатели операции шлифования микропористых покрытий, но больше всего на стойкость круга между правками и среднюю скорость его износа.

2. Исследования показали, что наиболее эффективным при шлифовании микропористых покрытий на никелевой и железной основе является импрегнатор № 19: стойкость кругов увеличивается в 1,5–2,5 раза, коэффициент шлифования возрастает в 1,7–2,4 раза при низкой шероховатости шлифованной поверхности.

### Список литературы

1. Надежность и ремонт машин / В.В. Курчаткин, Н.Ф. Тельнов, К.А. Ачкасов, В.И. Савченко, В.Н. Бугаев, А.Н. Батищев; ред. В.В. Курчаткин. – М.: Колос, 2000. – 776 с.: ил. – (Учебники и учебные пособия для высших учебных заведений). – ISBN 5-10-003278-2.

2. Алексеев Н.С., Капорин В.А., Иванов С.В. Влияние скорости шлифования плазменных покрытий на режущую способность кругов // Техника в сельском хозяйстве. – 2014. – № 5. – С. 26–30.

3. Неклюдов В.И. Выбор режущего инструмента и режимов при точении и шлифовании покрытия ПН85Ю15 // Трение. Износ. Смазка. – 2003. – Т. 5, № 4. – С. 65–69.

4. Fan X.R. Force modeling for intermittent grinding process: PHD thesis / Michigan Technology University. – Michigan, 2005. – 129 p.

5. Алексеев Н.С. Влияние зернистости кругов на некоторые показатели шлифования // Вестник машиностроения. – 2003. – № 4. – С. 66–69.

6. Kremen Z.I. A new generation of high-porous vitrified CBN wheels // Industrial Diamond Review. – 2003. – № 4. – P. 53–56.

7. Коротков А.Н., Цехин А.А. Влияние формы абразивного зерна на режущую способность и износ шлифовальных кругов // Вестник Кузбасского госу-

дарственного технического университета. – 1999. – № 2. – С. 17–19.

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

9. Горленко О.А., Бишутин С.Г. Взаимосвязь числа активных зерен с характеристиками и режимами правки абразивного инструмента // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1999. – № 1. – С. 62–66.

10. Выбор смазочно-охлаждающей жидкости для шлифования плазменных покрытий на железной основе / Р.Ф. Мустафаев, Н.С. Алексеев, В.А. Капорин, А.В. Рязанов, С.В. Иванов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 4 (57). – С. 28–30.

11. Белоус В.И. Модифицирование смазочно-охлаждающих жидкостей при шлифовании труднообрабатываемых материалов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 7 (84). – С. 66–70.

12. C60 fullerol formation catalysed by quaternary ammonium hydroxide / J. Li, A. Takeuchi, M. Ozawa, X. Li, K. Saigo, K. Kitazawa // Journal of the Chemical Society, Chemical Communications. – 1993. – Iss. 23. – P. 1784–1785.

13. Performance of novel MoS<sub>2</sub> nanoparticles based grinding fluids in minimum quantity lubrication grinding / B. Shen, A.P. Malshe, P. Kalita, A.J. Shih. – 2008. – Vol. 36. – P. 357–364.

14. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 144 с.

15. Никитин А.В. Шлифование труднообрабатываемых материалов импрегнированными кругами как способ повышения их режущих свойств // Инструмент и технологии. – 2010. – № 28. – С. 52–58.

16. Исследование процесса шлифования инструментальных сталей абразивными кругами, пропитанными специальным составом / Г.Г. Садыгов, Э.А. Ахундов, Ф.М. Мамедов, Ч.Г. Байрамов // Перспективы развития производства асинхронных двигателей в свете решений XXVI съезда КПСС: материалы VI Всесоюзной научно-технической конференции. – Владимир: ВНИПТИЭМ, 1983. – С. 136–140.

17. Доронин Ю.В. Опыт применения импрегнированного абразивного инструмента при шлифовании труднообрабатываемых материалов // Прогрессивные процессы шлифования, инструмент и его рациональная эксплуатация: тезисы докладов Все-

союзной научно-технической конференции, Ереван, 14–16 октября 1986 г. – М.: [б.и.], 1986. – С. 62–64.

18. Применение кислород- и фторсодержащих импрегнаторов для пропитки шлифовальных кругов / Р.М. Мубаракшин, Ю.В. Доронин, В.И. Бардин, С.А. Гребенкин // Современные способы повышения качества абразивно-алмазной и упрочняющей обработки: межвузовский сборник научных трудов. – Пермь: ППИ, 1985. – С. 94–97.

19. Влияние вида импрегнатора на коэффициент режущей способности абразивного инструмента / И.Г. Попов, В.К. Кононов, Ю.А. Шабалин, Г.М. Мещеряков // Высокоэффективные методы и инструмент для механической обработки авиационных материалов: межвузовский сборник научных трудов. – Куйбышев: КуАИ, 1984. – С. 53–54.

20. Данилова Е.А., Лукина Н.В., Рублева О.О. Исследование эксплуатационных свойств импрегнированных абразивных инструментов // Труды ТГТУ:

сборник научных статей молодых ученых и студентов / Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2007. – Вып. 20. – С. 95–96.

21. Мубаракшин Р.М. Управление режущей способностью и износостойкостью абразивного инструмента методом импрегнирования // Вестник машиностроения. – 1991. – № 5. – С. 45–47.

22. Шестаков И.Л., Мубаракшин Р.М., Гребенкин И.В. Повышение эффективности процесса заточки быстрорежущих сталей импрегнированными кругами // XXVII научно-техническая конференция по результатам научно-исследовательских работ, выполненных в 1988–1990 гг.: тезисы докладов. – Пермь: ППИ, 1991. – С. 23.

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

## OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(68), July – September 2015, Pages 66–74

### Grinding of microporous coatings using impregnated grinding wheels

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

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

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

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

#### Abstract

High chemical and adhesive activity of the nickel- and iron-based microporous coatings in contact with abrasive grinding wheels helps to fasten contacting bodies and to maximize adherence of the coating particles to the working surface of the cutting tool. These phenomena increase heat and power intensity of the process that in turn causes the increasing wheel wear, surface roughness as well as structural and phase transformations in surface layers of some parts. Consequently, one of the primary targets in order to improve the grinding efficiency is to reduce the temperature, on the one hand, and to reduce the useless energy consumption, on the other hand. The adhesive and chemical activity of microporous coatings with respect to abrasive grains can be reduced by finding ways reducing the surface energy of the contacting pair. The central idea in the theory of physical-chemical mechanics of materials is a concept to facilitate the deformation of bodies in the medium with surface-activated substances. These substances embrittle metal and accelerate its deformation through adsorption and electrocapillary effects.

The paper proposes a method to improve the efficiency of grinding the microporous coatings by reducing the interaction between the contacting pairs through the introduction of special compounds in the cutting area, which in contact with juvenile surfaces of the material being processed form protective films on the material and thus prevent direct contact of the coating with wheel grains. New compounds of liquid impregnators are tested when grinding the microporous coatings using a flat surface grinder and a plunge-cut grinding method without lubricating-cooling fluids. Water soluble polymers and aqueous solutions of amines, fatty acids and carbamides are used as impregnators for wheels.

The paper provides the results of comprehensive studies of the cutting power of electrocorundum wheels with ceramic bond impregnated with different compounds compared with non-impregnated wheels. The influence of impregnators on core parameters of the grinding process such as resistance and wear of an abrasive tool, energy consumption and roughness of a ground surface are studied. The studies revealed that when grinding the microporous coatings under given conditions the electrocorundum impregnated wheels have higher cutting power as compared with non-impregnated wheels. Comprehensive analysis of the studies based on a rating method revealed that when using the flat grinding method for the nickel- and iron-based microporous coatings the highest cutting power is attributed to wheels impregnated by triethanolamine and oleic acid impregnators.

**Keywords:**

microporous coatings, abrasive tool, grinding, impregnation, wheel resistance, cutting power, impregnator.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-66-74

**References**

1. Kurchatkin V.V., Tel'nov N.F., Achkasov K.A., Savchenko V.I., Bugaev V.N., Batishchev A.N. *Nadezhnost' i remont mashin* [Reliability and repair of machines]. Moscow, Kolos Publ., 2000. 776 p. ISBN 5-10-003278-2
2. Alekseev N.S., Kaporin V.A., Ivanov S.V. Vliyanie skorosti shlifovaniya plazmennyykh pokrytii na rezhushchuyu sposobnost' krugov [Effect of grinding speed plasma coatings on cutting ability of wheels]. *Tekhnika v sel'skom khozyaistve – Equipment for agriculture*, 2014, no. 5, pp. 26–30.
3. Neklyudov V.I. Vybor rezhushchego instrumenta i rezhimov pri tochenii i shlifovanii pokrytiya PN85Yu15 [The choice of cutting tools and modes for turning and grinding coating ПН85Ю15]. *Trenie, iznos, smazka – Friction, wear, lubricant*, 2003, vol. 5, no. 4, pp. 65–69.
4. Fan X.R. *Force modeling for intermittent grinding process*. PhD thesis. Michigan Technology University, Michigan, 2005. 129 p.
5. Alekseev N.S. Vliyanie zernistosti krugov na nekotorye pokazateli shlifovaniya [Influence of grain wheels on some parameters grinding]. *Vestnik mashinostroeniya – Russian Engineering Research*, 2003, no. 4, pp. 66–69. (In Russian)
6. Kremen Z.I. A new generation of high-porous vitrified CBN wheels. *Industrial Diamond Review*, 2003, no. 4, pp. 53–56.
7. Korotkov A.N., Tsekhin A.A. Vliyanie formy abrazivnogo zerna na rezhushchuyu sposobnost' i iznos shlifoval'nykh krugov [Influence of the form of abrasive grains of the cutting ability and wear of grinding wheels]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Kuzbass State Technical University*, 1999, no. 2, pp. 17–19.
8. Kazakov S.N. [Selection of coolant and abrasive wheel dressing method for pre-plunge grinding rollers with plasma coatings]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "Mashinostroenie"* [Republican interdepartmental collection of scientific works of the Belarusian National Technical University "Mechanical Engineering"]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 1980, no. 14, pp. 58–62.
9. Gorlenko O.A., Bishutin S.G. Vzaimosvyaz' chisla aktivnykh zeren s kharakteristikami i rezhimami pravki abrazivnogo instrumenta [The relationship of active grains with features and modes dressing abrasive tools]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin – Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 1999, no. 1, pp. 62–66. (In Russian)
10. Mustafaev R.F., Alekseev N.S., Kaporin V.A., Ryazanov A.V., Ivanov S.V. Vybor smazочно-okhlazhdayushchei zhidkosti dlya shlifovaniya plazmennyykh pokrytii na zheleznoi osnove [The selection of lubricant – coolants for grinding iron-based plasma coatings]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2012, no. 4 (57), pp. 28–30.
11. Belous V.I. Modifitsirovanie smazочно-okhlazhdayushchikh zhidkosteii pri shlifovanii trudnoobrabatyvayemykh materialov [Modificatin of cutting fluids in grinding of hard materials]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace Technic and Technology*, 2011, no. 7 (84), pp. 66–70.
12. Li J., Takeuchi A., Ozawa M., Li X., Saigo K., Kitazawa K. C 60 fullerol formation catalysed by quaternary ammonium hydroxide. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 1993, iss. 23, pp. 1784–1785.
13. Shen B., Kalita P., Malshe A.P., Shih A.J. Performance of novel MoS<sub>2</sub> nanoparticles based grinding fluids in minimum quantity lubrication grinding. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, 2008, vol. 36, pp. 357–364.

14. Ostrovskii V.I. *Teoreticheskie osnovy protsessa shlifovaniya* [Theoretical foundations of the grinding process]. Leningrad, Leningrad University Publ., 1981. 144 p.
15. Nikitin A.V. Shlifovanie trudnoobrabatyvaemykh materialov impregnirovannymi krugami kak sposob povysheniya ikh rezhushchikh svoistv [Grinding hard materials impregnated wheels as a way to improve their cutting properties]. *Instrument i tekhnologii – Tools and Technology*, 2010, no. 28, pp. 52–58.
16. Sadygov G.G., Akhundov E.A., Mamedov F.M., Bairamov Ch.G. [Investigation of the process of grinding tool steels by abrasive wheels impregnated with a special compound]. *Materialy VI Vsesoyuznoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Perspektivy razvitiya proizvodstva asinkhronnykh dvigatelei v svete reshenii XXVI s”ezda KPSS”* [Proceedings of the VI All-Union Scientific and Technical Conference “Prospects of development of manufacture of induction motors in the light of the XXVI Congress of the CPSU”]. Vladimir, 1983, pp. 136–140.
17. Doronin Yu.V. [Experience with impregnated abrasive tools for grinding hard materials]. *Tezisy dokladov Vsesoyuznoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Progressivnye protsessy shlifovaniya, instrument i ego ratsional’naya ekspluatatsiya”*, Erevan, 14–16 oktyabrya 1986 g. [Abstracts of the All-Union Scientific and Technical Conference “Progressive grinding processes, tools and rational exploitation”, Yerevan, 14–16 October, 1986]. Moscow, 1986, pp. 62–64.
18. Mubarakshin R.M., Doronin Yu.V., Bardin V.I., Grebenkin S.A. [Application of oxygen- and fluorinated impregnator for impregnating grinding wheels]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov “Sovremennye sposoby povysheniya kachestva abrazivno-almaznoi i uprochnyayushchei obrabotki”* [Interuniversity Collection of Proceedings “Modern Ways of Improving the Quality of the Diamond Abrasive and Hardening Treatment”], 1985, pp. 94–97.
19. Popov I.G., Kononov V.K., Shabalin Yu.A., Meshcheryakov G.M. [Influence of the type impregnator by a factor cutting ability of abrasive tools]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov “Vysokoeffektivnye metody i instrument dlya mekhanicheskoi obrabotki aviatsionnykh materialov”* [Interuniversity Collection of Proceedings “Highly Efficient Methods and Tools for Machining Aircraft Materials”], 1984, pp. 53–54.
20. Danilova E.A., Lukina N.V., Rubleva O.O. [Research of operational properties impregnated abrasive tools]. *Trudy TGTU: sbornik nauchnykh statei molodykh uchenykh i studentov* [Proceedings of the TGTU: Collection of Scientific Papers of Young Scientists and Students], 2007, iss. 20, pp. 95–96.
21. Mubarakshin R.M. Upravlenie rezhushchei sposobnost’yu i iznosostoikost’yu abrazivnogo instrumenta metodom impregnirovaniya [Management of cutting capacity and durability of abrasive tools by impregnating]. *Vestnik mashinostroeniya – Russian Engineering Research*, 1991, no. 5, pp. 45–47.
22. Shestakov I.L., Mubarakshin R.M., Grebenkin I.V. [Improving the efficiency of the grinding process of high-speed steels using a impregnated wheels]. *Tezisy dokladov XXVII nauchno-tekhnicheskoi konferentsii po rezul’tatam nauchno-issledovatel’skikh rabot, vypolnennykh v 1988–1990 g.* [Abstracts of XXVII Scientific Conference on the Results of the Research Work Carried out in 1988–1990]. Perm’, 1991, p. 23.
23. 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.

#### Article history:

Received 30 April 2015

Revised 29 May 2015

Accepted 30 June 2015

# ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ

*А. Ю. ГОРЕЛОВА, аспирант, инженер-исследователь  
М. Г. КРИСТАЛЬ, доктор техн. наук, профессор  
(ВолГТУ, г. Волгоград)*

Поступила 16 июня 2015

Рецензирование 3 июля 2015

Принята к печати 7 августа 2015

**Горелова А. Ю.**—400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28,  
Волгоградский государственный технический университет,  
e-mail: forasyoo@gmail.com

Обработка глубоких отверстий сопровождается вибрациями системы СПИЗ различного рода. Среди них выделяют резонансные вибрации, возникающие при кратности частоты вынужденных колебаний, зависящей от режимов обработки, частоте собственных колебаний инструмента. Они приводят к появлению погрешностей формы и размера отверстия. Для уменьшения амплитуды резонансных вибраций предложен метод обработки глубоких отверстий, заключающийся в использовании инструмента, оснащенного гироскопическим стабилизатором. Предложен новый инструмент для обработки глубоких отверстий. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для исследования процесса гашения колебаний инструмента по предложенному методу. Достигнуто уменьшение амплитуды резонансных колебаний в 9 раз при частотах вынужденных колебаний в диапазоне 152...1100 рад/с для частот собственных колебаний модели инструмента  $\omega_{01} = 9,41$  рад/с,  $\omega_{02} = 9,55$  рад/с,  $\omega_{03} = 9,99$  рад/с,  $\omega_{04} = 10,11$  рад/с. Установлено, что для достижения наименьшего значения амплитуды вибраций необходимо поддерживать систему СПИЗ в состоянии, близком к резонансному. Это позволит минимизировать увод оси отверстия и его последствия, снижающие точность обработки глубокого отверстия.

**Ключевые слова:** расточной инструмент, гироскопический стабилизатор для инструмента.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-75-81

## Введение

Многие изделия содержат глубокие отверстия (ГО), т. е. такие, у которых отношение длины  $L$  к диаметру  $d$  превышает 10 ( $L/d > 10$ ), и для их обработки требуется применение специальных технологических средств [1]. К таким изделиям относят: гильзы гидроцилиндров, ротора турбин, прокатные валы, гребные валы судов, стволы огнестрельного оружия, решетки ядерных реакторов [2].

Особенность обработки таких изделий состоит в том, что обрабатывающий инструмент (резцовая головка) закреплен на борштанге, длина которой превышает длину обрабатываемого отверстия. Различают три основные схемы обработки ГО: вращательное движение совершает инструмент, деталь либо инструмент при

этом совершает встречное движение подачи; вращательное движение совершает деталь, инструмент либо деталь имеет движение подачи; инструмент и деталь совершают вращательное движение в противоположных направлениях, инструмент либо деталь имеют движение подачи. Обработку длинномерных массивных заготовок чаще всего обрабатывают по схеме, где инструмент совершает поступательное движение подачи, продвигаясь в глубь вращающейся заготовки. Таким образом, длина борштанги, находящаяся вне опор, увеличивается, что приводит к изменению ее жесткости, а следовательно, и частоты собственных колебаний системы СПИЗ (станок-приспособление-инструмент-заготовка). Следствием этого является возникновение вибраций различного рода, что снижает точность изготовления глубокого отверстия.

При этом СПИЗ подвержена вынужденным колебаниям различной природы. Выделяют вибрации, возникающие в инструменте, в том числе самопроизвольно, и вибрации, передающиеся от станка, по причине недостаточной жесткости его элементов [3, 4, 5]. В работе [6] отмечено, что в процессе резания на борштангу действует крутящий момент, который совместно с неравномерным сходом стружки приводит к изменению усилия резания и вызывает крутильные колебания и вибрации. Вибрации достигают наибольшей амплитуды при резонансе, т. е. при кратности частоты вынужденных колебаний заготовки, определяемой режимом обработки, частоте собственных колебаний инструмента [7]. Так как длина борштанги изменяется по мере обработки, происходит смещение резонансных частот. Установлено, что частота продольных и крутильных колебаний не меняется в процессе обработки, а частота поперечных колебаний меняется [2]. Это снижает эффективность использования известных пассивных демпферов [8, 9, 10], так как их настройка возможна на уменьшение амплитуды колебаний для одной частоты вынужденных колебаний. Виброизоляторы не обеспечивают снижения амплитуды вибраций инструмента при резонансе, так как изолируют инструмент только от вибраций, передающихся от станка при контакте металл-металл.

Известные системы управления положением инструмента и активные динамические гасители [11, 12, 13] обеспечивают уменьшение амплитуды вибраций инструмента за счет использования оперативной информации о процессе обработки и привода перемещения инструмента. Такие системы являются дорогостоящими и требуют особых условий эксплуатации, поэтому их использование не всегда целесообразно.

В работе [14] описана теоретическая возможность снижения амплитуды колебаний маятника, оснащенного гироскопическим успокоителем. Этот подход может быть использован для снижения амплитуды колебаний расточного инструмента.

Целью работы является повышение точности обработки глубокого отверстия за счет снижения амплитуды вибраций инструмента, в том числе при резонансе. Основная задача – разработка метода виброгашения инструмента в широком диапазоне частот его вынужденных колебаний

с использованием свойств двухстепенного гироскопа.

В рамках метода виброгашения предложен инструмент [15] для обработки глубоких отверстий, оснащенный стабилизатором, выполненным в виде корпуса, в котором на одной оси установлены два двухстепенных гироскопа в кардановом подвесе. Оси вращения роторов гироскопов расположены взаимно перпендикулярно, а рамы выведены из равновесия закрепленными на них дополнительными грузами. Каждый гироскоп реагирует на вибрации отклонением своей рамы, которая качается около положения равновесия в противофазе с вынужденными колебаниями, что приводит к уменьшению их амплитуды. Такая схема обуславливает снижение составляющих амплитуды колебаний каждым из гироскопов в соответствии с положением осей вращения их роторов, что позволяет обеспечить гашение вибрации инструмента, возникающей в произвольном направлении.

## Методика

### экспериментального исследования

Для исследования характеристик работы модели каждого из гироскопов разработан экспериментальный стенд (рис. 1). Цель эксперимента – определение эффективности снижения амплитуды резонансных колебаний по предложенному методу. Под термином «эффективность» следует понимать  $\alpha = A_1/A_0$  отношения амплитуды  $A_1$  колебаний модели в поперечном направлении с активным гироскопическим стабилизатором (скорость вращения ротора  $\omega \neq 0$ ) к амплитуде  $A_0$  модели с неактивным стабилизатором (скорость вращения ротора  $\omega = 0$ ). Частота вынужденных колебаний варьировалась в диапазоне 152...1100 рад/с для четырех значений частот собственных колебаний, определяемых суммарной жесткостью подвесов гироскопа ( $\omega_{01} = 9,41$  рад/с,  $\omega_{02} = 9,55$  рад/с,  $\omega_{03} = 9,99$  рад/с,  $\omega_{04} = 10,11$  рад/с).

На плите-основании 1 (рис.1) установлены кронштейны 2 и 3, которые поддерживают с помощью упругих подвесов 4 корпус модели 5 с гироскопическим стабилизатором колебаний. Модель 5 содержит ротор 6, соединенный с поворотной рамой 7. Рама соединена с корпусом модели 5 посредством карданного подвеса.

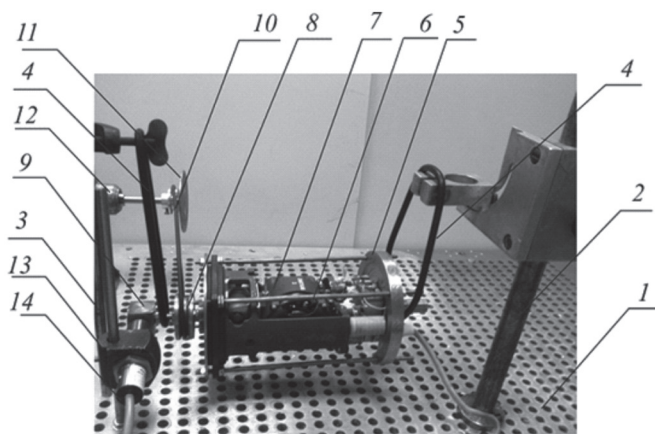


Рис. 1. Экспериментальная установка

Такое соединение обеспечивает две степени подвижности для гироскопа, третью степень подвижности обеспечивает корпус модели 5, подвешенный на упругих подвесах 4, которые выполняют функцию внешнего кольца карданного подвеса. Модель с гироскопическим стабилизатором содержит шкив 8 и экран 9 в виде металлического куба. Шкив 8 соединен ремнем со шкивом 10, установленным на валу 11 двигателя 12. На плите-основании 1 также установлен кронштейн 13, в котором закреплен индукционный датчик 14, регулируемый по высоте, вырабатывающий сигнал перемещения экрана 9.

Модель гироскопического успокоителя подвешивалась в выбранном комплекте из двух упругих подвесов на кронштейнах 2 и 3. Эксперимент производили последовательно с четырьмя наборами подвесов, которые обеспечивают указанные выше частоты собственных колебаний модели. Датчик 14 выставляли по вертикали на высоте экрана 9, по горизонтали с зазором 1,5 мм, задавали вынужденные колебания  $\omega = 152$  рад/с. Показания датчика перемещения 14 регистрировались по виртуальным приборам для случаев: с вращающимся ( $A_1$ ) и с невращающимся ( $A_0$ ) ротором гироскопического стабилизатора. По отношению  $\alpha = A_1/A_0$  оценивалась эффективность работы гироскопи-

ческого успокоителя. Далее частоту вынужденных колебаний увеличивали с шагом 70 рад/с и производили следующее измерение.

### Результаты и обсуждения

Для четырех частот собственных колебаний модели существуют области (рис. 2) как эффективного гашения колебаний (расположены ниже линии  $\alpha = 1$ ), так и увеличения исходной амплитуды ( $\alpha > 1$ ). Эффективность  $\alpha$  гашения колебаний имеет пиковые значения, которые для частот  $\omega > 950$  рад/с расположены в области эффективного гашения для исследуемой колебательной системы.

Время полного успокоения колебаний модели инструмента после единичного возмущающего воздействия для случая с вращающимся ротором гироскопического стабилизатора (с гироскопической стабилизацией) составило 2 с, а для невращающегося ротора (без гироскопической стабилизации) – 9 с. Эффективность гашения колебаний  $\alpha = 0,625$  (рис. 3).

Эффективность  $\alpha$  гашения колебаний модели для частоты вынужденных колебаний, близкой к частоте собственных колебаний каждой модели  $\alpha = 0,01$  (рис. 4) При этом установлено, что момент включения вращения ротора не приводит к увеличению амплитуды колебаний системы, что позволяет отключать вращение ротора при работе системы в обычном режиме и включать при приближении к резонансу.

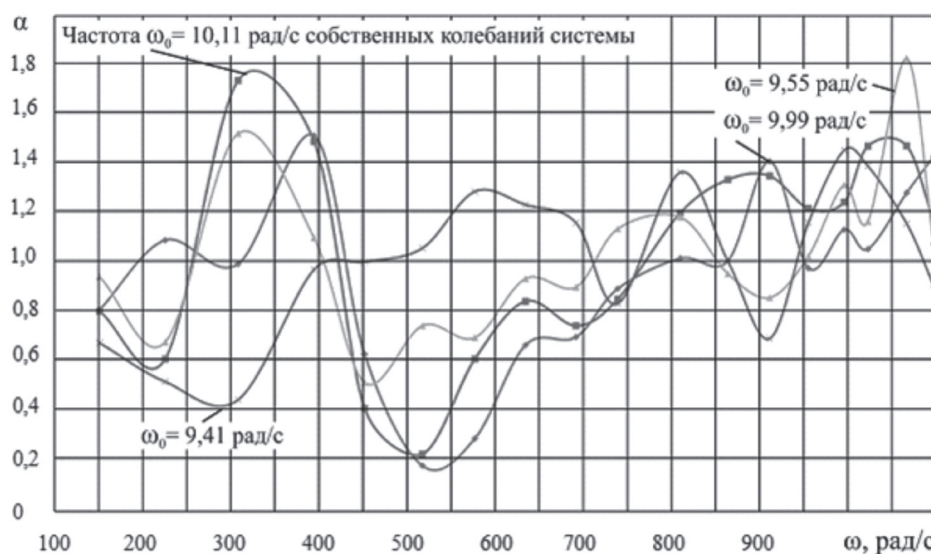


Рис. 2. Зависимость эффективности  $\alpha$  гашения колебаний от частоты  $\omega$  вынужденных колебаний системы

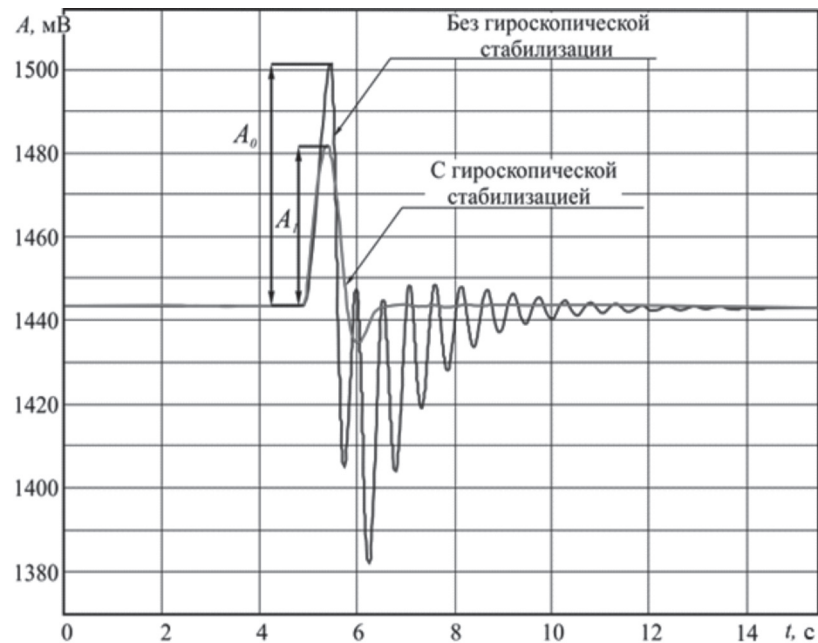
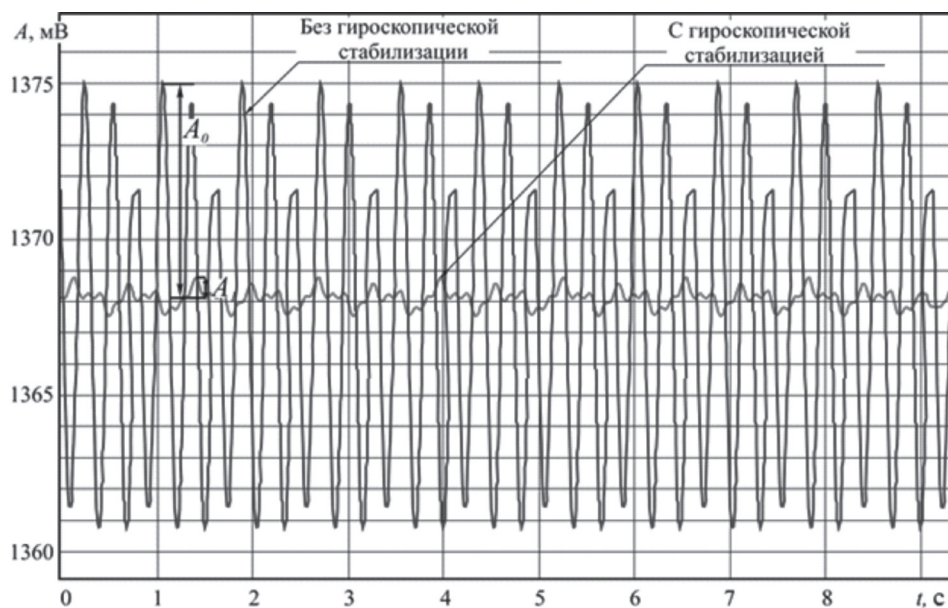


Рис. 3. Реакция модели на единичное воздействие


 Рис. 4. Зависимость амплитуды колебаний  $A$  модели от времени  $t$ 

### Выводы

Предложенный метод повышения точности обработки глубоких отверстий, включающий инструмент, оснащенный стабилизатором, выполненным в виде корпуса, в котором на одной оси установлены два двухстепенных гироскопа в кардановом подвесе, позволяет снизить амплитуду вынужденных колебаний инструмента в 9 раз при частотах вынужденных колебаний в диапазоне 152...1100 рад/с для частот

собственных колебаний модели инструмента  $\omega_{01} = 9,41$  рад/с,  $\omega_{02} = 9,55$  рад/с,  $\omega_{03} = 9,99$  рад/с,  $\omega_{04} = 10,11$  рад/с.

Установлено, что для достижения наименьшего значения амплитуды вибраций необходимо поддерживать систему СПИЗ в состоянии, близком к резонансному. Это позволит минимизировать увод оси отверстия и его последствия, снижающие точность обработки глубокого отверстия.



### Список литературы

1. *Троицкий Н.Д.* Глубокое сверление. – Л.: Машиностроение, 1971. – 176 с.
2. *Ушаков А.И.* Динамические процессы при обработке глубоких отверстий: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.05. – М., 1974. – 177 с.
3. Обработка глубоких отверстий / Н.Ф. Уткин, Ю.Н. Кижняев, С.К. Плужников, А.А. Шаманин, Ф.М. Дроздов, Б.А. Немцев, Н.А. Бычков, В.Ф. Борзов. – Л.: Машиностроение, 1988. – 269 с.
4. *Минков М.А.* Технология изготовления глубоких точных отверстий. – М.; Л.: Машиностроение, 1965. – 176 с.
5. *Костюкович С.С., Дечко Э.М., Долгов В.И.* Точность обработки глубоких отверстий. – Минск: Вышэйшая школа, 1978. – 144 с.
6. *Отений Я.Н., Смольников Н.Я., Ольштынский Н.В.* Прогрессивные методы обработки глубоких отверстий: монография. – Волгоград: ВолгГТУ, 2003. – 136 с.
7. *Горелова, А.Ю., Плешаков А.А., Кристаль М.Г.* Методы повышения точности обработки глубоких отверстий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 7–2. – С. 363–370.
8. Патент 2365471 Российская Федерация, МПК В 23 В 29/00. Резцедержатель, демпфирующий вибрации / П. Михик. – № 2006131554/02; заявл. 02.02.2005; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24. – 9 с.
9. Патент 2298456 Российская Федерация, МПК В 23 В 29/02. Расточной инструмент / Н.А. Корюкина. – № 2005135279/02; заявл. 14.11.2005; опубл. 10.05.2007, Бюл. № 13. – 5 с.
10. Патент 2421302 Российская Федерация, МПК В 23 В 35/00. Способ сверления глубокого отверстия

в детали / С.Г. Комаишко, А.Г. Комаишко, Г.Н. Кулик, М.В. Моисей, С.К. Плужников, К.В. Суздаль, А.Ю. Тонконог; патентообладатель Открытое акционерное общество «Дефорт». – № 2010105941/02; заявл. 15.02.2010; опубл. 20.06.2011, Бюл. № 17. – 9 с.

11. Patent DE 102004024170 A1, Int. Cl. B 23 C 5/00, B 23 C 9/00, B 23 B 29/12. Rotary mechanical tool system for e.g. drilling process, has gyroscopic unit controlled depending on dynamic characteristic changes during chipping process, where axis of rotation of unit is identical to axis of rotation of tool / В. Aschenbach. – N DE200410024170; application 14.05.2004; date of publication 01.12.2005. – 4 p.

12. Magnetorheological fluid-controlled boring bar for chatter suppression / M. Deqing, K. Tianrong, J.S. Albert, C. Zichen // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209, iss. 4. – P. 1861–1870. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.04.037.

13. *Matsubara A., Maeda M., Yamaji I.* Vibration suppression of boring bar by piezoelectric actuators and LR circuit // CIRP Annals–Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 63, iss. 1. – P. 373–376. – doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.132.

14. *Николаи Е.Л.* Теоретическая механика. Ч. 3. – 2-е изд. – Л.; М.: ГОНТИ НКТП СССР, 1939. – 311 с.

15. Полезная модель к патенту 152126 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 23 В 29/00. Резцедержатель, демпфирующий вибрации / А.Ю. Горелова, А.А. Плешаков, М.Г. Кристаль; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ). – № 2014147420/02; заявл. 25.11.2014; опубл. 10.05.2015, Бюл. № 13. – 2 с.

## OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(68), July – September 2015, Pages 75–81

### The deep hole boring tool

**Gorelova A. Yu.**, Ph.D. student, Research Engineer, e-mail: forasyoo@gmail.com

**Kristal M. G.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: crysmar@mail.ru

Volgograd State Technical University, 28 Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation

#### Abstract

A great number of parts which are used in machine building industry contain deep holes. Its production requires a special tool with a large length-to-diameter ratio boring bar. The boring bar significantly changes its length during lengthy blanks processing. Therefore, natural frequency of the tool changes too. Deep hole boring is inevitably

accompanied by the appearance of the resonance, when the forced oscillation frequency, dependent on the operating mode, multiplies the natural oscillation frequency of the tool. There is another phenomenon accompanying the deep holes' machining, called chatter. This kind of self-excited vibration can also lead to resonance.

It causes various working errors to appear, the one hardest to reduce being the wall thickness variation, which is presented due to the tool axis deviation in relation to the axis of the hole. Authors suggested a boring bar equipped with gyroscopic stabilizer. It contains a frame mounted on the body of stabilizer by the means of cardan suspension, which provides two degrees of freedom for the gyroscope. The third degree of freedom is offered by the boring bars' body. Gyroscopic stabilizer mounted inside the boring bar and behind the tool. Thus, when the boring bar starts to bend the frame simultaneously starts to swing and it achieves the lateral vibration suppression.

The paper covers the proposed method of deep holes manufacturing. A structure of gyroscopic stabilizer for boring bars with a large length-to-diameter ratio is presented. The experimental stand for the study of the process of damping by the proposed method is described.

Ninefold reduction of the amplitude of the resonant vibrations is achieved in the forced oscillations frequency range of 152...1100 rad/s for following values of the natural oscillations frequency of the tool model:  $\omega_{01} = 9,41$  rad/s,  $\omega_{02} = 9,55$  rad/s,  $\omega_{03} = 9,99$  rad/s,  $\omega_{04} = 10,11$  rad/s.

It is established, that achieving lower values of the vibrations amplitude requires the tool to be maintained in a resonant or near-resonant state. It allows minimizing tool axis deviation and its consequences, which reduce the accuracy of the deep hole machining.

#### Keywords:

deep hole boring tool, gyroscopic stabilizer of the tool.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-75-81

#### References

1. Troitskii N.D. *Glubokoe sverlenie* [The Deep hole drilling]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971. 176 p.
2. Ushakov A.I. *Dinamicheskie protsessy pri obrabotke glubokikh otverstii. Diss. kand. tekhn. nauk* [Dynamic processes in the deep holes processing. PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 1974. 177 p.
3. Utkin N.F., Kizhnyayev Yu.N., Pluzhnikov S.K., Shamanin A.A., Drozdov F.M., Nemtsev B.A., Bychkov N.A., Borzov V.F. *Obrabotka glubokikh otverstii* [The Deep holes machining]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1988. 269 p.
4. Minkov M.A. *Tekhnologiya izgotovleniya glubokikh tochnykh otverstii* [Technology of precise holes manufacturing]. Moscow, Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1965. 176 p.
5. Kostyukovich S.S., Dechko E.M., Dolgov V.I. *Tochnost' obrabotki glubokikh otverstii* [Accuracy of deep holes manufacturing]. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 1978. 144 p.
6. Otenii Ya.N., Smol'nikov N.Ya., Ol'shtynskii N.V. *Progressivnye metody obrabotki glubokikh otverstii* [Progressive methods of deep holes manufacturing]. Volgograd, VolgGTU Publ., 2003. 136 p. ISBN 5-230-04102-2
7. Gorelova A.Y., Pleshakov A.A., Kristal M.G. *Metody povysheniya tochnosti obrabotki glubokikh otverstii* [Ways to increase the accuracy of deep holes' manufacturing]. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – News of the Tula State University. Technical sciences*, 2013, no. 7–2, pp. 363–370.
8. Mikhik P. *Reztsezhatel', dempfiruyushchii vibratsii* [Tool holder that damps vibrations]. Patent RF, no. 2365471, 2009.
9. Korjukina N.A. *Rastochnoi instrument* [Boring tool]. Patent RF, no. 2298456, 2007.
10. Komaishko S.G., Komaishko A.G., Kulik G.N., Moisej M.V., Pluzhnikov S.K., Suzdal' K.V., Tonkonog A.Yu. *Sposob sverleniya glubokogo otverstiya v detail* [Method of drilling deep holes]. Patent RF, no. 2421302, 2011.
11. Aschenbach B. Rotary mechatronical tool system for e.g. drilling process, has gyroscopic unit controlled depending on dynamic characteristic changes during chipping process, where axis of rotation of unit is identical to axis of rotation of tool. Patent DE, no. 102004024170 A1, 2005.
12. Deqing M., Tianrong K., Albert J.S., Zichen C. Magnetorheological fluid-controlled boring bar for chatter suppression. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, iss. 4, pp. 1861–1870. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.04.037
13. Matsubara A., Maeda M., Yamaji I. Vibration suppression of boring bar by piezoelectric actuators and LR circuit. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2014, vol. 63, iss. 1, pp. 373–376. doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.132

14. Nikolai E.L. *Teoreticheskaya mekhanika*. Ch. 3 [Theoretical Mechanics. Pt. 3]. 2<sup>nd</sup> ed. Leningrad, Moscow, GONTI NKTP USSR Publ., 1939. 311 p.

15. Gorelova A.Yu., Pleshakov A.A., Kristal M.G. *Reztsederzhatel', dempfiruyushchii vibratsii* [Vibration damping toolholder]. Patent RF (Useful Model), no. 152126, 2015.

**Article history:**

Received 16 June 2015

Revised 3 July 2015

Accepted 7 August 2015

# СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ АКТИВАЦИИ МЕДНОГО ПОРОШКА ПМС-1 ДЛЯ СИНТЕЗА ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ SLS

*А.А. САПРЫКИН<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент*  
*А.В. ГРАДОБОЕВ<sup>1</sup>, доктор техн. наук, профессор*  
*В.И. ЯКОВЛЕВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент*  
*Е.А. ИБРАГИМОВ<sup>1</sup>, ст. преподаватель*  
*Е.В. БАБАКОВА<sup>1</sup>, ассистент*  
*(<sup>1</sup>ЮТИ НИ ТПУ, г. Юрга*  
*<sup>2</sup>АлтГТУ, г. Барнаул)*

Поступила 13 апреля 2015  
Рецензирование 20 июня 2015  
Принята к печати 17 июля 2015

**Сапрыкин А.А.** – 652055, г. Юрга, Кемеровская обл., ул. Ленинградская, 26,  
Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского Томского  
политехнического университета,  
e-mail: sapraa@tpu.ru

Развитие методов послойного синтеза готовых прототипов и изделий позволяет внедрять данные технологии в различные сферы деятельности, начиная от легкой и заканчивая военной промышленностью и медициной. Особый интерес вызывает возможность изготовления металлических изделий сложной геометрической формы. Технологии послойного лазерного спекания дают возможность использовать в качестве строительного материала металлические порошки и их смеси. Исходные физико-химические свойства порошков определяют условия и технологические режимы, при которых будет проходить синтез изделия. К таким свойствам относятся: гранулометрический состав, форма частиц, температура плавления, теплопроводность материала и др. В процессе спекания металлических порошков возникает эффект коагуляции, что отрицательно влияет на качество спекаемого изделия. Одним из способов изменения начальных свойств порошка, а также изменение эффекта коагуляции является его предварительная активация. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния предварительной активации порошка марки ПМС-1 (ГОСТ 4960–09) на изменения его первоначальных свойств. Показано изменение пористости и механической прочности образцов, полученных методом селективного лазерного спекания (СЛС) в зависимости от способа активации порошка. Активация порошка проводилась гамма-излучением радиоактивного изотопа  $Co^{60}$  и механически. Насыпная плотность порошка определялась методом «воронки». Изменение структуры порошка определялось на металлографическом микроскопе. Экспериментальные образцы изготавливались на технологическом лазерном комплексе «ВАРИСКАФ-100М». Механическая прочность на сжатие определялась на настольной универсальной испытательной системе. Результаты экспериментов показали, что при механической активации значительно изменяются гранулометрические свойства порошка. Частицы порошка образуют агломераты пластинчатой формы размерами до 0,5 мм. Насыпная плотность порошка, активированного механическим способом, увеличивается до 35 % при времени обработки 1,5 минуты и до 45 % при трех минутах. В результате лазерного воздействия наблюдаются процессы как спекания частиц порошка, так и полного их сплавления. При активации ионизирующим излучением структура и насыпная плотность порошка не изменяются. При спекании наблюдается повышенная окисленность материала и усадка образца.

**Ключевые слова:** селективное лазерное спекание, медный порошок ПМС-1, коагуляция, механоактивация, ионизирующее излучение.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-82-88

## Введение

В настоящее время технология послойного лазерного спекания позволяет изготавливать изделия из различных порошковых материалов, а также их смесей [1, 2]. Достоинство данного метода заключается в получении готового изделия либо прототипа сложной геометрической формы за короткие сроки с меньшими затратами. В технологии СЛС наибольший интерес представляет синтез изделий из металлических порошков [3, 4].

Порошок марки ПМС-1 (ГОСТ 4960–09) широко распространен в порошковой металлургии для производства спеченных изделий в автомобильной, металлургической, электротехнической, авиационной, машиностроительной промышленности для изготовления колец, втулок, подшипников, электрических контактов, электродов, щеток электрических машин и фильтров для тонкой очистки масел [5].

При послойном лазерном синтезе порошок подвергается интенсивному локальному тепловому воздействию. В результате частицы порошка меди оплавляются и формируют крупные образования – капли (эффект коагуляции). Вследствие этого в спеченных образцах образуются поры, которые неблагоприятно влияют на эксплуатационные характеристики изделия. Уменьшить эффект коагуляции можно за счет увеличения смачиваемости частиц порошка. В ряде работ, например [6–8], показано влияние предварительной активации порошка на изменение эффекта коагуляции в процессе формирования образца технологией СЛС.

Цель данной работы: определить наиболее подходящий способ предварительной активации металлического порошка, его влияние на изменение физических свойств порошка и предела прочности на сжатие образцов, полученных технологией СЛС.

## Методы и оборудование экспериментального исследования

Основными характеристиками, влияющими на процесс СЛС, является размер и форма частицы порошка, а также его насыпная плотность и

активность поверхности [9, 10]. Активации и последующему спеканию был подвергнут медный порошок марки ПМС-1 (ГОСТ 4960–09).

Процесс активации гамма-излучением проводился с помощью установки «Исследователь» на основе изотопа  $Co^{60}$ . Данная установка представляет собой свинцовый контейнер с установленным в нем облучателем с источником излучения. Порошок облучался дозами от  $10^4$  до  $10^6$  Р, что соответствовало времени облучения от 3 до 120 мин.

Для механоактивации была использована шаровая мельница планетарного вида (рис. 1). Порошок подвергался ударной нагрузке в течение 1,5...3 мин.

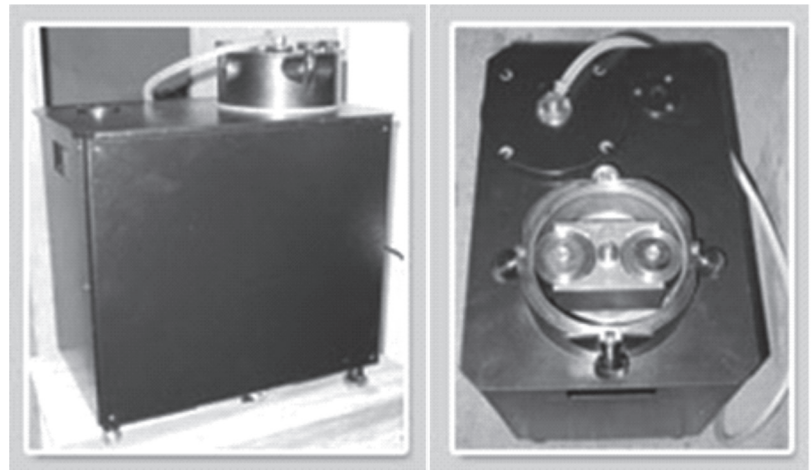


Рис. 1. Планетарная мельница-активатор АГО-2С

Изменение размера и формы частиц порошка регистрировались на металлографическом микроскопе МЕТАМ РВ.

Экспериментальные образцы были изготовлены на СЛС-установке «ВАРИСКАФ-100М». Данная установка позволяет управлять следующими технологическими режимами: скорость сканирования, мощность излучения лазера, шаг сканирования, контролируемая газовая атмосфера и температура подогрева порошка [11]. Установка представлена на рис. 2.

Изготовленные образцы представляли собой куб со сторонами 10 мм. Спекание образцов проводилось при следующих технологических режимах: мощность излучения лазера составляла 15 и 30 Вт; скорость сканирования составляла 2000 мм/мин.; шаг сканирования ( $x, y, z$ ) 0,2 мм; начальная температура порошка 27 °С. Все образцы порошка спекались в защитной среде аргона.

## Результаты и обсуждение

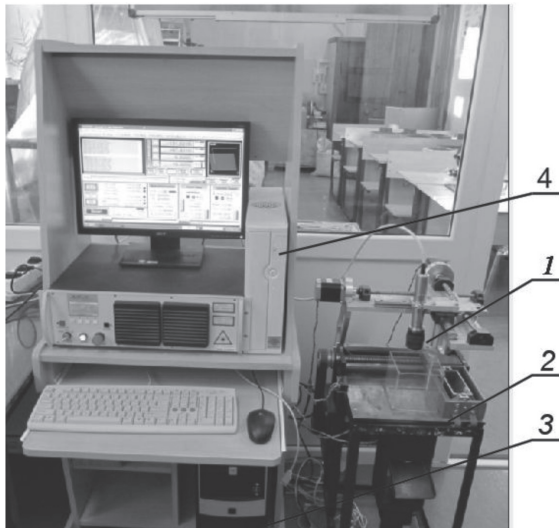


Рис. 2. Установка послойного лазерного спекания:

1 – лазер; 2 – трехкоординатный стол; 3 – персональный компьютер; 4 – система ЧПУ

Прочность спеченных образцов на сжатие определялась на настольной универсальной испытательной системе с двумя колоннами INSTRON 5966. Скорость нагружения образцов составляла 30 мм/мин.

Анализируя изменения размера и формы частиц порошка после активации необходимо отметить следующее: а) при механоактивации наблюдается существенное изменение как размера, так и формы частиц порошка (рис. 3); б) после активации гамма-излучением частицы порошка не изменились по форме и размеру (рис. 4).

В порошке после 1,5 и 3 мин механической активации наблюдается образование укрупненных частиц порошка в форме пластин размерами до 0,5 мм. Данное образование связано с эффектами агломерации порошка в процессе механоактивации. Насыпная плотность порошков определялась методом ИСО 3923-1 [12]. Необходимо отметить существенное изменение насыпной плотности порошка после механоактивации, причем время обработки оказывает значительное влияние на результат. Порошок после ионизирующего излучения не изменил свою насыпную плотность. Результаты сравнения изменения насыпной плотности порошка представлены на рис. 5.

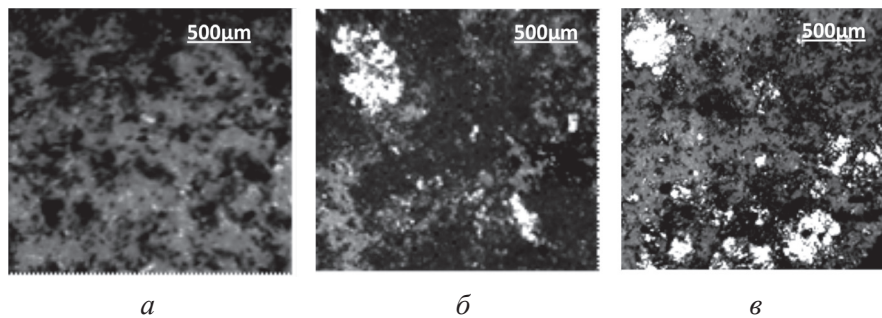


Рис. 3. Структура порошка ПМС-1 до и после механоактивации ( $\times 40$ ):

а – не активирован; б – активация 1,5 мин; в – активация 3 мин

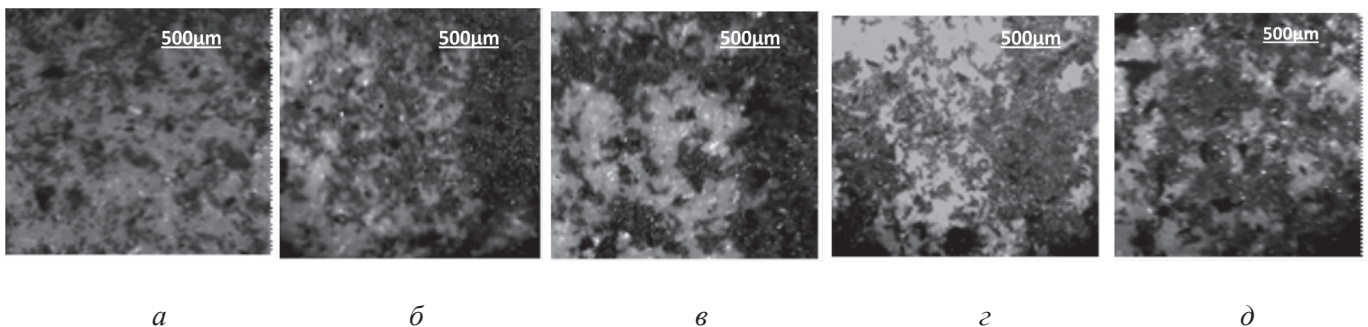


Рис. 4. Структура порошка ПМС-1 до и после гамма-облучения ( $\times 40$ ):

а – необлученный; б – доза гамма-облучения  $10^4$  Р; в – доза гамма-облучения  $10^5$  Р; г – доза гамма-облучения  $5,7 \cdot 10^6$  Р; д – доза гамма-облучения  $10^6$  Р

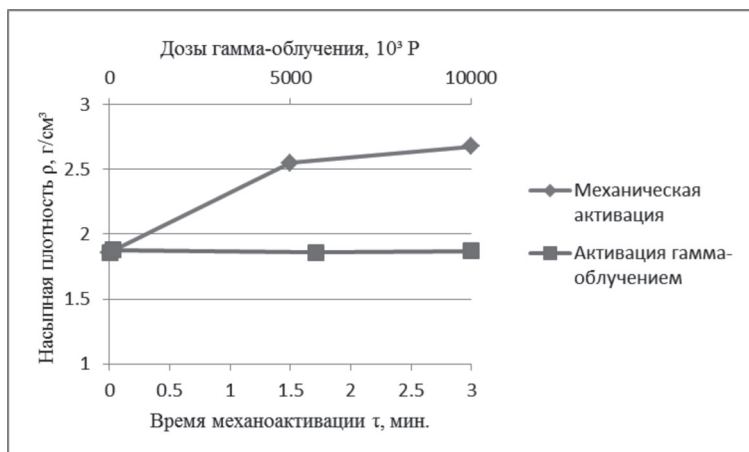


Рис. 5. Изменение насыпной плотности порошка

При спекании образцов из порошков, активированных гамма-излучением, наблюдались следующие изменения. При дозе  $10^5 R$  уменьшился размер коагулированных частиц спекенного порошка до 30 % относительно неактивированного порошка. При дозе облучения  $10^6 R$  на поверхности образца наблюдается усадка спекенного порошка. При дозах  $10^4 R$  и  $5,7 \cdot 10^6 R$  существенных изменений не наблюдалось. Необходимо отметить, что при всех дозах гамма-облучения поверхность образцов интенсивно окислялась и имела радужный окрас [13–15], образцы получа-

лись хрупкими и разрушались при малейшем механическом воздействии на них.

После механоактивации, процесс спекания порошка значительно отличался от процесса спекания неактивированного порошка. При мощности излучения лазера 15 Вт порошок частично оплавлялся. При мощности излучения лазера 30 Вт наблюдалось как оплавление частиц порошка, так и полное их расплавление с образованием жидкой ванны металла. В результате образцы, спекенные из механоактивированного порошка, получились значительно прочнее, чем образцы из неактивированного порошка. Результаты измерения прочности на сжатие представлены в таблице.

**Прочность спекенных образцов на сжатие**

Время активации, мин.	0	1,5	3
Прочность на сжатие, МПа	0,28	1,47	1,21

Образцы, изготовленные из активированного и неактивированного порошка, представлены на рис. 6 и 7.

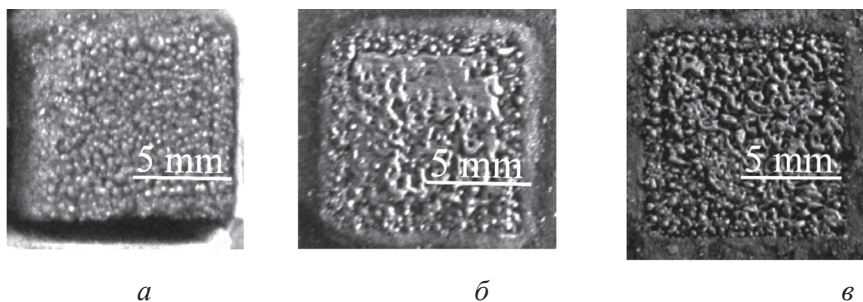


Рис. 6. Спекенные образцы при мощности лазера 30 Вт:

*a* – не активирован; *b* – механоактивация 1,5 мин; *в* – механоактивация 3 мин

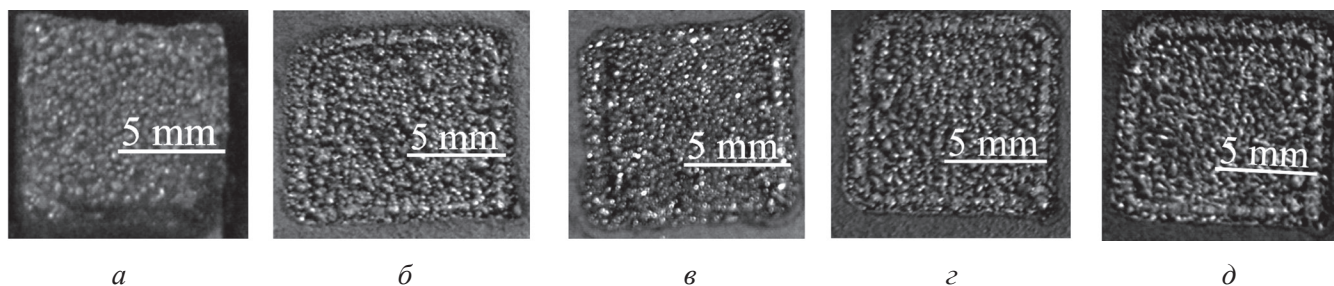


Рис. 7. Спекенные образцы при мощности лазера 15 Вт:

*a* – необлученный; *b* – доза гамма-облучения  $10^4 R$ ; *в* – доза гамма-облучения  $10^5 R$ ; *z* – доза гамма-облучения  $5,7 \cdot 10^6 R$ ; *д* – доза гамма-облучения  $10^6 R$

## Выводы

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Механическая активация порошка приводит к увеличению размера частиц и изменению их формы, а также увеличивается насыпная плотность порошка до 45 %. Вследствие увеличения насыпной плотности порошка и изменения морфологии частиц в процессе лазерного спекания наблюдается оплавление и полное расплавление частиц с образованием жидкой ванны, при этом прочность спеченных образцов на сжатие увеличилась с 0,28 до 1,47 МПа.

2. Активация гамма-излучением не влияет на изменение формы и размера частиц порошка. Также не изменяется и насыпная плотность порошка. Спеченные образцы получились хрупкими и разрушались при незначительном внешнем воздействии так же, как и образцы из неактивированного порошка.

3. Из предложенных методов предварительной активации порошка наиболее перспективным для применения в технологии СЛС является механоактивация, однако образование укрупненных частиц порошка затрудняет их распределение по поверхности при формировании нового слоя. Гамма-активация никаких существенных изменений в процесс спекания порошка не вносит.

## Список литературы

1. Харанжевский Е.В. Лазерный синтез поверхностных наноструктурных покрытий систем Al-C // Вестник Удмуртского университета. – 2011. – № 4–1. – С. 6–12.
2. Kumar S., Kruth J.-P. Composites by rapid prototyping technology // *Materials & Design*. – 2010. – Vol. 31, iss. 2. – P. 850–856. – doi: 10.1016/j.matdes.2009.07.045.
3. Direct selective laser sintering of iron-graphite powder mixture / K. Murali, A.N. Chatterjee, P. Saha, R. Palai, S. Kumar, S.K. Roy, P.K. Mishra, A.R. Choudhury // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – Vol. 136, iss. 1–3. – P. 179–185. – doi: 10.1016/S0924-0136(03)00150-X.
4. Gibson I.B., Rosen D.W., Stucker B. Additive manufacturing technologies. Rapid prototyping to direct digital manufacturing. – New York, USA: Springer, 2009. – 459 p. – ISBN-10: 1441911197. – ISBN-13: 978-1441911193.

5. Кузнецов В.Е. Системы быстрого изготовления прототипов и их расширения // *CAD/CAM/CAE Observer*. – 2003. – № 4 (13). – С. 2–7.

6. Влияние механической активации металлических порошков на их реакционную способность и свойства плазменных покрытий / В.А. Полуобяров, А.Е. Лапин, З.А. Коротаева, А.Н. Черепанов, О.П. Солоненко, Н.С. Коботаева, Е.Е. Сироткина, М.А. Корчагин // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2002. – Т. 10, № 1–2. – С. 219–225.

7. Influence of mechanical activation on microstructure and crystal structure of sintered MgO-TiO<sub>2</sub> system / S. Filipović, N. Obradović, V.B. Pavlović, S. Marković, M. Mitrić, M.M. Ristić // *Science of Sintering*. – 2010. – Vol. 42, iss. 2. – P. 143–151. – doi: 10.2298/SOS100518002F.

8. Сапрыкина Н.А., Сапрыкин А.А., Яковлев В.И. Влияние механической активации металлических порошков на качество поверхностного слоя, полученного технологией послойного синтеза // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2012. – № 4 (57). – С. 108–110.

9. Структура и физико-механические свойства спеченных материалов системы Fe-Si, полученных из механически активированных на воздухе порошков / Г.А. Дорогина, Э.С. Горкунов, Ю.В. Субачев, С.М. Задворкин, И.А. Кузнецов, Е.А. Туева, А.В. Долматов // *Физика и химия обработки материалов*. – 2011. – № 5. – С. 56–61.

10. Ibragimov E.A., Saprykin A.A., Babakova E.V. Influence of laser beam machining strategy at SLS synthesis // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 1040. – P. 764–767. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.764.

11. Saprykina N.A., Saprykin A.A. Engineering support for improving quality of layer-by-layer laser sintering // *The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST 2012, September 18–21, 2012*. – Tomsk: TPU Press, 2012. – P. 129–132.

12. ИСО 3923–1:2008. Порошки металлические. Определение насыпной плотности. Ч. 1. Метод с использованием воронки. – М.: Стандартинформ, 2012. – 5 с.

13. Градобоев А.В., Суржиков А.П. Радиационная стойкость СВЧ приборов на основе арсенида галлия. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005 – 277 с.

14. Мамонтов А.П., Чернов И.П. Эффект малых доз ионизирующего излучения. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Дельтапдан, 2009. – 288 с.

15. Ильин А.П. Развитие электровзрывной технологии получения нанопорошков в НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете // *Известия Томского политехнического университета*. – 2003. – Т. 306, № 1. – С. 133–139.



## Comparison of activation technologies powder ECP-1 for the synthesis of products using SLS

**Saprykin A.A.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: sapraa@tpu.ru

**Gradoboev A.V.**<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: Gradoboev1@mail.ru

**Yakovlev V.I.**<sup>2</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: anicpt@rambler.ru

**Ibragimov E.A.**<sup>1</sup>, Senior Lecturer, e-mail: egor83@list.ru

**Babakova E.V.**<sup>1</sup>, Assistant, e-mail: babakova@tpu.ru

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

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

### Abstract

Development of methods for the synthesis of layer prototypes and finished products allows to introduce these technologies in various spheres of activity, ranging from mild to military industry and medicine. Of particular interest is the possibility of producing metal products with complex geometric shapes. Layer by layer laser sintering technology enable the use as a building material, metal powders, and mixtures thereof. The initial physical and chemical properties of powders determine the conditions and technological conditions under which will be a synthesis of the product. Such properties include particle size distribution, particle shape, melting point, thermal conductivity and others. During sintering of metal powders there is an effect of coagulation, which is bad for the quality of the sintered product. One way to change the initial properties of the powder, as well as change in the effect of coagulation is its pre-activation. This paper presents the results of experimental research, the influence of pre-activation of the powder brand ECP-1 (GOST standards 4960–09) to change its original properties. Shows the change porosity and mechanical strength of samples produced by selective laser sintering (SLS), depending on the method of activation of the powder. Activation of powder conducted gamma radiation radioactive isotope Co<sup>60</sup> and mechanically. The bulk density of the powder was determined by the «funnel». Changing the structure of the powder was determined on the metallographic microscope. The experimental samples were made on the technological of laser complex «VARISKAF-100M». The mechanical compressive strength was determined on a desktop universal testing system. Experimental results have shown that the mechanical activation significantly altered granulometric properties of the powder. The powder particles agglomerate plate-sizes up to 0,5 mm. The bulk density of the powder, which is activated by mechanical means, increases up to 35 % in the processing time of 1.5 min. and 45 % at 3 min. In consequence of the laser impact such processes as sintering of the powder particles and their complete fusion are observed. When activated by ionizing radiation structure and bulk density of the powder does not change. During sintering there is increased oxidation of the material and the shrinkage of the sample.

### Keywords:

selective laser sintering, powder ECP-1, mechanical activation, ionizing radiation.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-82-88

### References

1. Kharanzhevskiy E.V., Pisareva T.A. Lazernyi sintez poverkhnostnykh nanostrukturnykh pokrytii sistem Al-C [Laser synthesis of Al-C nanostructured surface coatings]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta – Bulletin of Udmurt University*, 2011, no. 4–1, pp. 6–12.
2. Kumar S., Kruth J.-P. Composites by rapid prototyping technology. *Materials & Design*, 2010, vol. 31, iss. 2, pp. 850–856. doi: 10.1016/j.matdes.2009.07.045
3. Murali K., Chatterjee A.N., Saha P., Palai R., Kumar S., Roy S.K., Mishra P.K., Choudhury A.R. Direct selective laser sintering of iron-graphite powder mixture. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 136, iss. 1–3, pp. 179–185. doi: 10.1016/S0924-0136(03)00150-X
4. Gibson I.B., Rosen D.W., Stucker B. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York, USA, Springer Publ., 2009. 459 p. ISBN-10: 1441911197. ISBN-13: 9781441911193

5. Kuznetsov V.E. Sistemy bystrogo izgotovleniya prototipov i ikh rasshireniya [Rapid prototyping systems and their extensions]. *CAD/CAM/CAE Observer*, 2003, no. 4 (13), pp. 2–7.
6. Poluboyarov V.A., Lapin A.E., Korotaeva Z.A., Cherepanov A.N., Solonenko O.P., Kobotaeva N.S., Sirotkina E.E., Korchagin M.A. Vliyanie mekhanicheskoi aktivatsii metallicheskih poroshkov na ikh reaktivnost' i svoystva plazmennyykh pokrytii [The effect of mechanical activation of metal powders on their reactivity and properties of plasma-deposited coatings]. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya – Chemistry for Sustainable Development*, 2002, vol. 10, iss. 1–2, pp. 219–225. (In Russian)
7. Filipović S., Obradović N., Pavlović V.B., Marković S., Mitrić M., Ristić M.M. Influence of mechanical activation on microstructure and crystal structure of sintered MgO-TiO<sub>2</sub> system. *Science of Sintering*, 2010, vol. 42, iss. 2, pp. 143–151. doi: 10.2298/SOS100518002F
8. Saprykina N.A., Saprykin A.A., Yakovlev V.I. Vliyanie mekhanicheskoi aktivatsii metallicheskih poroshkov na kachestvo poverkhnostnogo sloya, poluchennogo tekhnologii posloinogo sinteza [Effect of mechanical activation of metal powders on the quality of the surface layer, resulting layered synthesis technology]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2012, no. 4 (57), pp. 108–110.
9. Dorogina G.A., Gorkunov E.S., Subachyov Yu.V., Zadvorkin S.M., Kuznetsov I.A., Tueva E.A., Dolmatov A.V. Struktura i fiziko-mekhanicheskie svoystva spechennykh materialov sistemy Fe-Si, poluchennykh iz mekhanicheskii aktivirovannykh na vozdukh poroshkov [Structure and physico-mechanical properties of the sintered materials of Fe-Si, obtained from mechanically activated powders in air]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov – Inorganic Materials: Applied Research*, 2011, no. 5, pp. 56–61. (In Russian)
10. Ibragimov E.A., Saprykin A.A., Babakova E.V. Influence of laser beam machining strategy at SLS synthesis. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1040, pp. 764–767. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.764
11. Saprykina N.A., Saprykin A.A. Engineering support for improving quality of layer-by-layer laser sintering. *The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST 2012*, Tomsk, 18–21 September 2012, pp. 129–132.
12. ISO 3923–1:2008. Metallic powders. Determination of apparent density. Pt. 1: Funnel method. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 5 p. (In Russian)
13. Gradoboev A.V., Surzhikov A.P. *Radiatsionnaya stoikost' SVCh priborov na osnove arsenida galliya* [Radiation resistance microwave devices based on gallium arsenide]. Tomsk, TPU Publ., 2005. 277 p.
14. Mamontov A.P., Chernov I.P. *Effekt malykh doz ioniziruyushchego izlucheniya* [Effects of ionizing radiation at low doses]. 2<sup>nd</sup> ed. Tomsk, Del'tapdan Publ., 2009. 288 p.
15. Il'in A.P. Razvitie elektrovzryvnoi tekhnologii polucheniya nanoporoshkov v NII vysokikh napryazhenii pri Tomskom politekhnicheskom universitete [Development of the electroexplosive technology for production of nanopowders in Research Institute of High Voltage at the Tomsk Polytechnic University]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2003, vol. 306, no. 1, pp. 133–139.

**Article history:**

Received 13 April 2015

Revised 20 June 2015

Accepted 17 July 2015

# УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ ШВОВ СТАЛИ 12Х18Н10Т\*

*Н.Б. ПУГАЧЕВА<sup>1</sup>, доктор техн. наук, доцент  
ведущий научный сотрудник  
Д.И. ВИЧУЖАНИН<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
старший научный сотрудник  
Е.Б. ТРУШИНА<sup>1</sup>, вед. технолог  
Н.П. АНТЕНОРОВА<sup>1</sup>, вед. технолог  
Н.С. МИЧУРОВ<sup>1</sup>, аспирант  
А.М. ОРИШИЧ<sup>2</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор,  
зав. лабораторией  
А.Н. ЧЕРЕПАНОВ<sup>2</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор,  
главный научный сотрудник  
А.Г. МАЛИКОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук, научный сотрудник  
(<sup>1</sup>ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург,  
<sup>2</sup>ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск)*

Поступила 30 апреля 2015  
Рецензирование 29 мая 2015  
Принята к печати 30 июня 2015

**Пугачева Н.Б.** – 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская 34,  
Институт машиноведения УрО РАН,  
e-mail: nat@imach.uran.ru

Основные трудности, возникающие при сварке аустенитных сталей, связаны с необходимостью повышения стойкости металла шва и околошовной зоны против образования горячих трещин, которые обычно подразделяют на кристаллизационные и подсолидусные. Повышение сопротивляемости металла к образованию кристаллизационных трещин достигается путем подавления столбчатой кристаллизации и измельчения структуры за счет повышения скорости охлаждения, чистоты сплавов по примесям, использования легирования элементами-модификаторами или элементами, способствующими образованию высокотемпературных вторых максимально пластичных фаз (например  $\delta$ -феррита). Эти пути сужают температурный интервал хрупкости и повышают запас пластичности. Для повышения сопротивляемости аустенитных сталей образованию подсолидусных горячих трещин при сварке рекомендуют: легирование сплавов элементами, способствующими созданию фрагментарной литой структуры, повышение чистоты основного металла по примесям внедрения, сокращение времени нахождения металла при температуре высокой диффузионной подвижности (увеличение скорости охлаждения металла сварных швов), ограничение деформаций за счет выбора рациональной конструкции соединений и др. Перечисленные выше направления реализуются при лазерной сварке, которая характеризуется высокими скоростями нагрева и охлаждения, малой длительностью пребывания металла в расплавленном состоянии. Это способствует уменьшению диффузионного взаимодействия и формированию мелко-дисперсной фрагментарной литой структуры материала шва. Интенсивное конвективное перемешивание расплава в сварочной ванне способствует удалению неметаллических включений. Особую роль могут играть добавки тугоплавких нанопорошков (НП) в формирующийся материал сварных

\* Работа выполнена при финансовой поддержке совместного проекта № 12-С-1-1026 «Создание научно-технологических основ применения лазерного излучения при сварке разнородных металлов и сплавов», выполняемого в ИМАШ УрО РАН (г. Екатеринбург) и ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск), гранта РФФИ 14-08-00633а.

швов. Специально подготовленные хорошо смачиваемые тугоплавкие нанопорошковые частицы при вводе их в расплав формируют дисперсную систему, в которой ядром каждой частицы суспензии служит твердая фаза. В результате этого каждая наночастица становится потенциальной затравкой для зарождения новой фазы. Благодаря этому в расплаве в процессе его охлаждения формируется мелкодисперсная кристаллическая структура, вследствие чего повышаются механические характеристики затвердевшего сплава. В статье обсуждается проблема повышения прочности сварного шва на примере стали марки 12X18H10T (AISI 321). Неразъемные сварные соединения выполнены при помощи лазерной сварки с применением нанопорошковых добавок. В ходе работы определены значения усталостной прочности сварных соединений, полученных с помощью  $\text{CO}_2$ -лазера без добавок и с добавками нанопорошков TiN и  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , плакированных титаном и железом. Исследована роль микроструктуры, размера зерна, характера распределения микротвердости в формировании поверхности разрушения при выбранных условиях испытаний. Установлено, что среднее значение временного сопротивления для сварного шва составило 690 МПа, что превышает его значение для самой стали (650 МПа). Даже присутствие микропор в материале сварных швов не снизило прочностные свойства по сравнению с основой. Рельеф изломов образцов соответствует вязкому разрушению. Добавки нанопорошков увеличили долговечность материала полученных соединений в 2,8 раза при значениях максимального напряжения цикла более 460 МПа. При этом зоны долома по механизму вязкого разрушения составляли 65 % от всей площади изломов образцов с нанопорошками и 78 % – без них. При меньших значениях максимальных напряжений цикла доля зоны долома составляла около 50 % площади изломов образцов.

**Ключевые слова:** лазерная сварка, прочность, усталость, микроструктура, микротвердость, фрактография.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-89-98

## Введение

При сварке коррозионностойких аустенитных сталей довольно часто возникают горячие трещины, обусловленные химической неоднородностью материала шва [1, 2]. Решение данной проблемы возможно при использовании высококонцентрированных источников энергии, таких как электронный и лазерный лучи. Использование для сварки энергии лазерного излучения обеспечивает особые условия для формирования структуры соединения за счет высоких скоростей нагрева и охлаждения в сочетании с интенсивным конвективным перемешиванием расплава в сварочной ванне [3–5]. При этом обеспечивается максимальная химическая однородность получаемого соединения и удаление газов из расплава [6, 7]. Особенно ярко эти преимущества проявляются при обработке высоколегированных коррозионностойких сталей, для которых свойственна дендритная ликвация в литом состоянии [8]. На современном этапе разработки технологии лазерной сварки коррозионностойких сталей наиболее актуально установление роли различных параметров и режимов технологической обработки на прочность получаемых соединений, особенно в условиях усталостного воздействия, наиболее близкого реальным условиям эксплуатации. Авторы работ [9, 10] обнаружили положительное влияние добавок

нанопорошков на прочность лазерных сварных соединений, которое объясняют с точки зрения повышения центров кристаллизации в условиях сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения. Авторы работы [11] также отмечают важную роль микро- и наночастиц на изменение условий структурообразования, особенно на начальной стадии процесса кристаллизации, что связывают с изменением величины поверхностной энергии на межфазных границах.

Целью данных исследований являлось установление степени влияния добавок нанопорошков TiN и  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , плакированных титаном и железом, на кратковременную и усталостную прочность полученных с помощью  $\text{CO}_2$ -лазера соединений стали марки 12X18H10T, а также определение роли микроструктуры, размера зерна, характера распределения микротвердости в формировании поверхности разрушения.

## Материалы и методика эксперимента

Сварку листов из стали марки 12X18H10T [12] толщиной 3 мм проводили встык с помощью  $\text{CO}_2$ -лазера постоянного действия. Режимы сварки указаны в табл.1. Нанопорошки TiN,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , плакированные титаном и железом по технологии, разработанной в ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН, наносили в виде быстросохнущей суспензии на боковые поверх-

ности стыков. Средний размер частиц составил  $40 \pm 20$  нм. Плакирование обеспечивает улучшение смачиваемости наночастиц в расплаве и повышение их устойчивости к растворению и коагуляции. Для защиты металла сварочной ванны и перегретых околошовных участков к вершине шва и к его корню подавали гелий через специальные сопла. На всех образцах проведен анализ макро- и микроструктуры с помощью оптического микроскопа NEOPHOT-21. Определен характер распределения значений микротвердости по высоте и ширине швов, измерения выполнены на приборе LEICA при нагрузке 0,25 Н (0,025 кгс). О наличии нанопорошков в полученных сварных швах судили по результатам фазового рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-700, а также микрорентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGAII XMU (Чехия) с волнодисперсионной и энергодисперсионной приставками фирмы OXFORD.

Статическое растяжение образцов и усталостное нагружение\* осуществляли на сервогидравлической испытательной машине Instron 8801 при скорости растяжения 1 мм/мин. Определяли предел прочности при растяжении  $\sigma_b$  по ГОСТ 6990–66. Форма и размеры образцов приведены ранее в работе [7]. Циклические испытания проводили по синусоидальному циклу с частотой нагружения 5 Гц при коэффициенте асимметрии цикла  $R = 0$ . Было определено количество циклов до разрушения при различных уровнях приложенной нагрузки. Рельеф поверхности разрушения образцов после механических испытаний исследован на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGAII XMU с использованием терминов и определений элементов фрактотграфии поверхности [13, 14].

### Результаты исследований и их обсуждение

После лазерной сварки по выбранным режимам сформировались узкие швы с коэффициентом формы (соотношение глубины проплавления к ширине шва), равным 2,6...2,9 (рис. 1 и табл. 1). В полученных сварных соединениях явно

\* Испытания механических свойств проведены на оборудовании Центра коллективного пользования ИМАШ УрО РАН.

различимы две зоны: зона термического влияния (далее по тексту ЗТВ), отличающаяся от сплавоосновы более крупным зерном (рис. 2, а, б), и собственно сварной шов (далее по тексту СШ) с выраженной мелкодендритной структурой (рис. 2, в, з). Зеренное строение сварного шва соответствует литому состоянию стали: в центре располагаются равноосные полиэдрические зерна, от которых к основе вытянуты вдоль направления теплоотода более крупные зерна. В донной части швов размеры зерен в 1,5–2 раза меньше по сравнению с поверхностной областью и они более равноосны (табл. 1). Значения микротвердости распределены достаточно равномерно по ширине СШ как и легирующие элементы – отличия содержания наиболее тугоплавкого титана в осях дендритов и междендритных пространствах составляют не более 0,35 мас. %, никеля – не более 0,5 мас. %, хрома – не более 0,2 мас. %.

Высокие скорости охлаждения при лазерном воздействии обеспечивают формирование ультрадисперсных дендритов: если вблизи границ материала СШ с ЗТВ можно наблюдать ветви дендритов второго порядка, по расстоянию между которыми можно приблизительно оценить скорость кристаллизации расплава в сварочной ванне, то в центральной части СШ наблюдаются только оси первого порядка – дендриты в виде мелкодисперсных игл. Следует отметить, что по сравнению с малоуглеродистыми конструкционными сталями [5] дендритное строение лазерных сварных швов стали 12Х18Н10Т выражено более ярко.

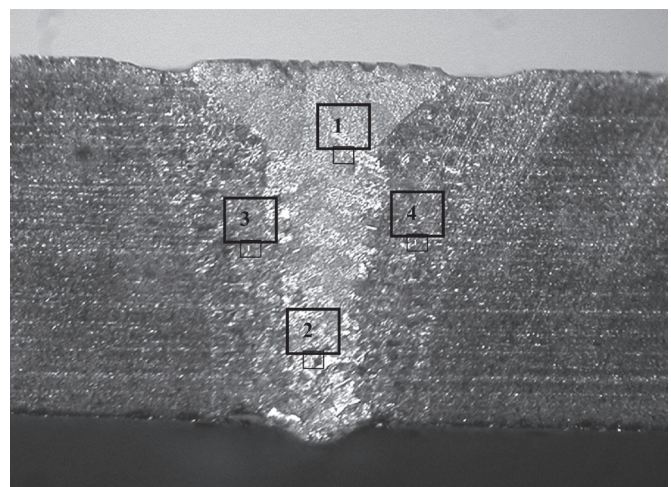


Рис. 1. Макроструктура сварных швов сплава BT1-0 с обозначением зон для микроструктурных исследований

**Характеристики материала сварных швов стали 12X18H10T**

Номер образца	Материал	Режим сварки		Параметры СШ				Параметры ЗТВ				$d$ , мм		
		$P$ , кВт	$V$ , м/мин	$l$ , мм	HV 0,05			$l$ , мм	HV 0,05			Основа	ЗТВ	СШ
					$C_p$	max	min		$C_p$	max	min			
1	12X18H10T	2,1	1,0	1,08	233	413	151	0,45	201	225	183	0,01	0,04	0,25
2				1,15	252	291	210	0,4	253	267	245	0,01	0,04	0,35
3	12X18H10T + нанопорошки			1,03	287	354	223	0,7	293	313	302	0,01	0,05	0,4
4				1,1	230	254	127	0,7	258	284	227	0,01	0,05	0,3

Условные обозначения:  $P$  – мощность лазерного излучения;  $V$  – скорость движения образца относительно лазерного луча;  $l$  – ширина СШ или ЗТВ;  $d$  – размер аустенитного зерна

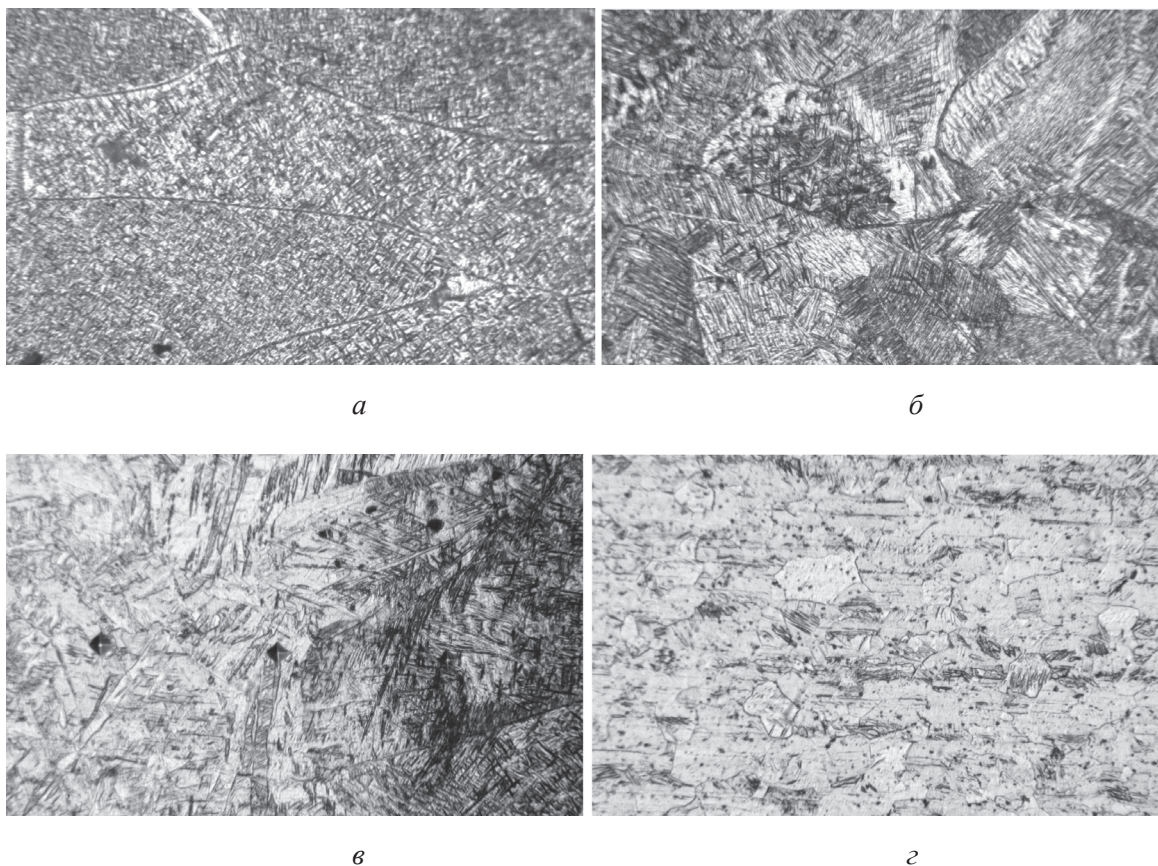


Рис. 2. Микроструктура сварного соединения титанового сплава ВТ1-0:

$a$  – верхняя часть СШ (зона 1 на рис. 1);  $б$  – корень СШ (зона 2 на рис. 1);  $в$  – граница СШ и ЗТВ (зона 3 на рис. 1);  $з$  – ЗТВ (зона 4 на рис. 1)

Механизм действия нанопорошков был предложен ранее в работах [9, 10]. Он заключается в следующем: ввиду того что атомы на поверхности наночастиц имеют соседей только с одной стороны, их равновесие нарушается и происходит структурная релаксация, которая приводит

к смещению межатомного расстояния в слое толщиной 2–3 нм, поэтому поверхностные слои частиц оказываются растянутыми, а внутренние – сжатыми, так как избыточное лапласовское давление на них ( $p = 2\gamma/r$ ) достигает сотен килобар. В наночастицах реализуется особый

тип дальнего порядка, при котором межатомное расстояние закономерно изменяется при переходе от центра частицы к ее поверхности. При этом трансляционная симметрия, характерная для макроматериалов, отсутствует, но дальний порядок существует, а средние межатомные расстояния существенно меньше (примерно до 10 %), чем в соответствующих массивных материалах, таких, например, как порошки, получаемых методом порошковой металлургии. Наночастицы имеют существенно искаженную кристаллическую решетку, что влияет на энергию активации большинства процессов, в которых они участвуют, меняя их привычный ход и последовательность [15].

Большинство тугоплавких соединений плохо смачиваются расплавами металлов и сплавов, для улучшения смачиваемости в процессе подготовки модифицирующих композиций наночастицы подвергаются плакированию металлами с помощью центробежных планетарных мельниц, пресс-форм, химического адсорбирования в расплавах [9] и др. При этом плакирующий (адсорбционный) слой должен обеспечить не только хорошую смачиваемость частиц, но и устойчивость их к плавлению и растворению в модифицируемом сплаве. Химические элементы, образующие на поверхности тугоплавкой частицы устойчивые химические соединения, предохраняющие вещество частиц от растворения, препятствующие коагуляции частиц, обеспечивающие смачиваемость расплавом и «сшивающие» частицы со структурными элементами расплава, назвали протекторами [9, 10]. Примерами тугоплавких соединений являются карбиды, нитриды и бориды с высокой температурой плавления: TiC (3257 °C), ZrC (3537 °C), TaC (3985 °C), TiN (2950 °C), ZrN (2980 °C), TaN (3087 °C), TiB<sub>2</sub> (3200 °C) [16], а примерами протекторов – химические элементы, образующие с материалом частицы устойчивые химические соединения, например, Ti, Ni, Cr, Si, Nb и др. Именно это использовали при выборе состава и способа приготовления нанопорошков, вводимых в состав сварного шва.

Присутствие нанопорошков было зафиксировано при микрорентгеноспектральном анализе площади поверхности шлифа размером 100×100 мкм. Поскольку титан и хром входят в состав исследованной стали, определить присут-

ствие их нанопорошков не представляется возможным, равно как и частиц TiN, присутствие которых в стали 12X18H10T подтверждено результатами микрорентгеноспектрального анализа. Следы иттрия были отмечены в материале СШ всех исследованных образцов в виде пиков на рентгеновских спектрах, при количественном анализе было зафиксировано равномерное распределение иттрия по анализируемой площади поверхности в количествах не более 0,05 мас. %. При фазовом рентгеноструктурном анализе материала сварных швов рефлексы от TiN и Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> имели интенсивность на уровне фона, что обусловлено малым их содержанием.

Несмотря на защиту сплава при сварке от газонасыщения в сварном шве наблюдали некоторую микропористость. На шлифах поры не видны, они различимы только на поверхности разрушения после механических испытаний. Внутренняя микропористость сварного шва явилась причиной незначительной неравномерности распределения значений микротвердости: минимальные значения соответствуют близкому к отпечатку расположению микропор, максимальные значения достигают 293 HV 0,05. Следует отметить ультрамелкодисперсный ямочный излом на образцах после статического растяжения, который соответствовал ЗТВ.

Результаты испытаний на статическое растяжение показали, что материал сварного шва, несмотря на некоторую внутреннюю пористость, является достаточно прочным (табл. 2) и соответствует требуемым для исследованной стали 12X18H10T значениям: временное сопротивление отрыву регламентировано интервалом 530...650 МПа [12]. Следует подчеркнуть, что при статическом растяжении прочность материала сварных соединений оказалась нечувствительна к добавкам нанопорошков при лазерной сварке. Изломы образцов после статического растяжения соответствуют вязкому разрушению. Если после растяжения образцов стали 12X18H10T без сварных швов формируется чисто ямочный рельеф поверхности, то рельеф поверхности разрушения сварных швов наряду с ямками различной глубины содержит отдельные фрагменты сотового рельефа – скопление мелких плоских ямок в виде сот, направленных в одном направлении и характерных для разрушения литых сплавов (направление совпадает с

Результаты испытаний механических свойств образцов со сварными швами

Номер образца	Материал	Растяжение		Циклирование		
		Место разрыва	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma$ , МПа	$\sigma / \sigma_B$	$N$
1	Сталь 12X18H10T	Зона термического влияния и сварной шов	650	549	0,79	4920
2			730	481	0,69	18 340
3			690	414	0,6	70 080
4	Сталь 12X18H10T + нанопорошки	Зона термического влияния и сварной шов	660	549	0,8	14 170
5			720	480	0,69	32 927
6			720	411	0,6	46 418

направлением дендритов). Появление на поверхности разрушения сотового рельефа свидетельствует о малой доле локальной пластической деформации при разрушении, подобный рельеф относится к вязкому разрушению и характерен для пластичных материалов [13, 14].

Усталостные испытания показали, что при максимальных напряжениях цикла, больших 460 МПа, добавки нанопорошков привели к существенному повышению долговечности – количество циклов до разрушения в 2,8 раза по сравнению с образцами, полученными сваркой без нанопорошков (рис. 3 и табл. 2). Рельеф поверхности разрушения образцов со сварными швами соответствует общепринятому представлению об усталостном изломе: явно выделяются зоны очагов, стабильного развития трещин и долома (рис. 4). Наиболее ярко такие неоднородные изломы проявляется при нагрузках менее 460 МПа,

когда положительное влияние нанопорошков не выявлено: зоны долома занимают 58 % площади изломов для образцов с нанопорошками и 53 % – без нанопорошков, т. е. практически одинаковы и составляют около половины сечения образцов. При больших значениях максимальных напряжений в циклах зоны долома на поверхности разрушения образцов с нанопорошками занимают 65 %, а без них – 78 %. Учитывая, что доломы для всех испытанных образцов происходят по механизму вязкого разрушения, т. е. с условно высокой работой разрушения, можно предположить, что при напряжениях выше 460 МПа структурное состояние материала СШ стали 12X18H10T, сформированное с участием нанопорошков при лазерной сварке, обеспечивает более длительное замедленное (стабильное) развитие усталостных трещин и снижение площади опасного сечения, в котором происходит долом.

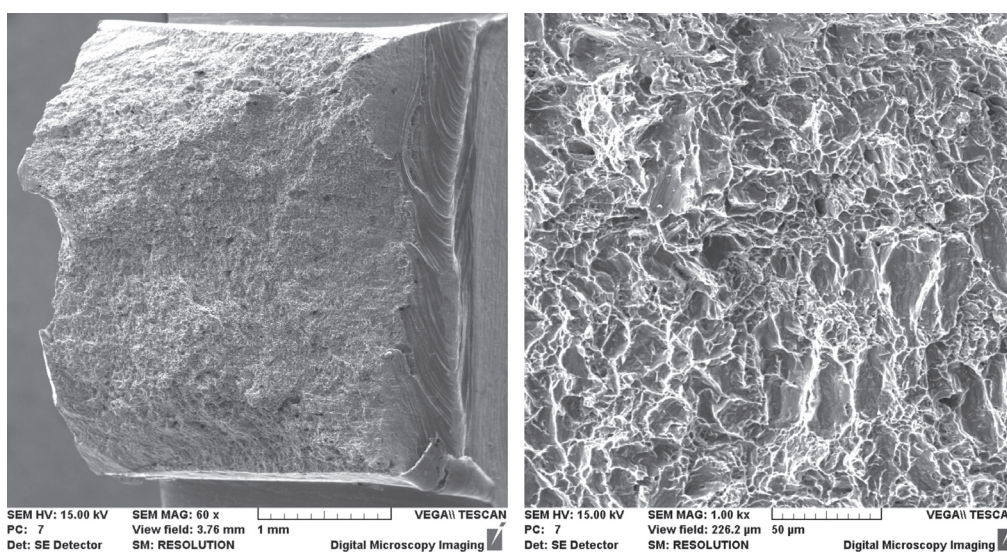


Рис. 3. Рельеф поверхности разрушения образцов сплава BT1-0 со сварными швами после статического растяжения без добавления нанопорошков



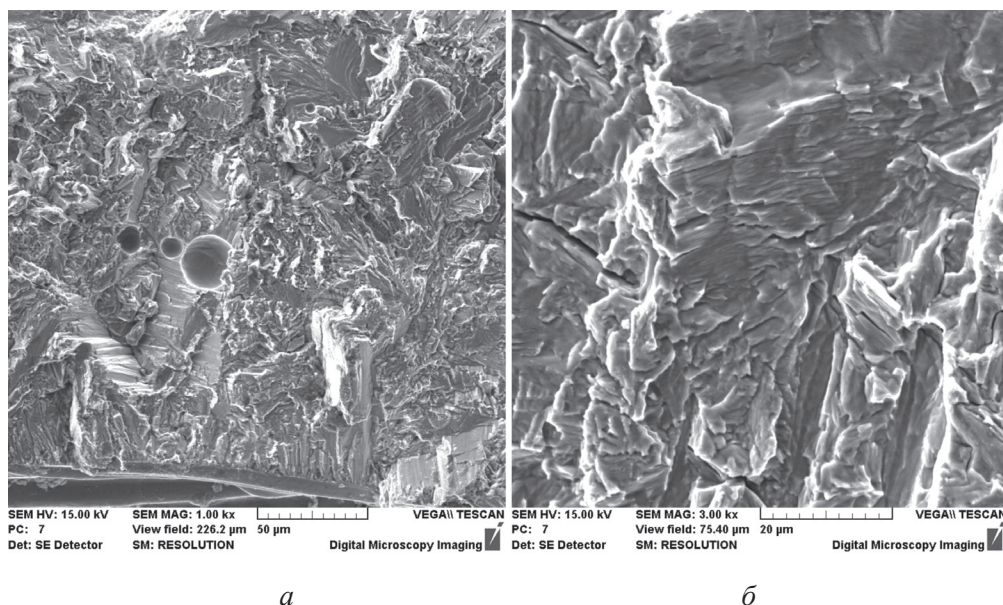


Рис. 4. Рельеф поверхности разрушения в очаге (сварной шов с нанопорошками, максимальное напряжение цикла 464 МПа):

*a* – хрупкий транскристаллитный перистый излом; *б* – усталостные бороздки на плоских поверхностях

## Выводы

1. Сварка стали 12X18H10T с помощью  $\text{CO}_2$ -лазера непрерывного действия позволила сформировать сварные швы с коэффициентом формы не ниже 2,6...2,9 и шириной менее 1,2 мм. Структура сварного шва соответствует литому состоянию: равноосные зерна в центре и вытянутые – в направлении теплоотвода, размеры их больше по сравнению с зернами основы. Крупные аустенитные зерна заполнены разориентированными ультрадисперсными дендритами, состоящими из осей первого порядка с достаточно высокой степенью химической однородности.

2. В зонах термического влияния, толщина которых не более 0,7 мм, фазовый состав стали не меняется. Увеличивается в 1,5–2 раза размер аустенитного зерна.

3. По средним значениям микротвердости все зоны сварных соединений практически равноценны. Падения значений микротвердости соответствуют некоторой внутренней микропористостью материала сварных соединений. Добавки нанопорошков не оказали влияния на микроструктуру и значения микротвердости полученных сварных соединений.

4. Среднее значение временного сопротивления для сварного шва составило 690 МПа, что превышает его значение для самой стали

(650 МПа). Даже присутствие микропор в материале сварных швов не снизило прочностные свойства по сравнению с основой. Рельеф изломов образцов соответствует вязкому разрушению.

5. Добавки нанопорошков увеличили долговечность материала полученных соединений в 2,8 раза только при значениях максимального напряжения цикла более 460 МПа. При этом зоны долома по механизму вязкого разрушения составляли 65 % от всей площади изломов образцов с нанопорошками и 78 % – без них. При меньших значениях максимальных напряжений цикла доля зоны долома составляла около 50 % площади изломов образцов.

## Список литературы

1. Шоршоров М.Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана. – М.: Наука, 1965. – 336 с.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 5. Лазерная сварка металлов / под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высшая школа, 1988. – 207 с.
3. Прочность и структура неразъемных соединений титана и аустенитной стали, полученных лазерной сваркой с промежуточными слоями / Н.Б. Пугачева, С.В. Смирнов, Д.И. Вичужанин, Ю.В. Афонин, А.М. Оришич, С.М. Задворкин, Л.С. Горулева // Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 7. – С. 26–32.

4. Структура сварных швов стали 12X18H10T и титанового сплава ВТ1-0 с промежуточной медной пластиной после лазерного проплавления / Н.Б. Пугачева, Е.Б. Трушина, Е.И. Пугачева, А.М. Оришич, А.Н. Черепанов // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 1 (73). – С. 166–174.
5. Влияние лазерной обработки на микроструктуру конструкционной малоуглеродистой стали / Н.Б. Пугачева, Е.Б. Трушина, Н.П. Антенорова // Металлы. – 2014. – № 4. – С. 77–85.
6. Laser welding of titanium and its alloys for medical applications: current knowledge and future direction / A. Buddery, M. Dargusch, D. StJohn, J. Drennan, S. Nabulsi // Materials Science Forum. – 2009. – Vol. 618–619. – P. 291–294. – doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.618-619.291.
7. Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys / A. Akman, A. Demir, N. Canel, N. Sinmazcelic // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209, iss. 8. – P. 3705–3713. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.08.026.
8. Laser welding of Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr / T. Shariff, X. Cao, R.R. Chromik, J.G. Baradari, P.Wanjara, J.Cuddy, A. Birur // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2011. – Vol. 50, iss. 3. – P. 263–272. – doi: http://dx.doi.org/10.1179/1879139511Y.0000000009.
9. Металлография сплавов железа / Н. Лямбер, Т. Греди, А. Хабракен, М. Дадьян, А. Гранжон; под ред. Н. Лямблера. – М.: Металлургия, 1985. – 248 с.
10. Модифицирование сталей и сплавов дисперсными инокуляторами / В.П. Сабуров, Е.Н. Еремин, А.Н. Черепанов, Г.Н. Миннеханов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. – 212 с.
11. Применение нанопорошков тугоплавких соединений при лазерной сварке и обработке металлов / А.Н. Черепанов, Ю.В. Афонин, А.Г. Маликов, А.М. Оришич // Тяжелое машиностроение. – 2008. – № 4. – С. 25–26.
12. Полухин В.А., Белякова Р.М., Ватолин Н.А. Влияние технологических микропримесей на фрагментацию фаз при получении наноструктурированных материалов из сплавов на основе железа в режиме скоростного охлаждения // Физика и химия обработки материалов. – 2011. – № 3. – С. 63–67.
13. Стали и сплавы. Марочник: справочник / сост.: В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев, В.С. Палеев, И.В. Гервасьева, С.Я. Палеева; под ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гервасьева. – М.: Интермет инжиниринг, 2001. – 608 с.
14. РД 50–672–88. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Классификация видов изломов металлов. – Утверждены и введены в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29.07.88 № 2800. – М.: Госстандарт СССР, 1989. – 21 с.
15. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций: учебное пособие для вузов / Г.В. Клевцов, Л.Р. Ботвина, Н.А. Клевцова, Л.В. Лимарь. – М.: МИСиС, 2007. – 264 с. – ISBN: 978-5-87623-176-5.
16. Наномодифицирование сварных соединений при лазерной сварке металлов и сплавов / А.М. Оришич, А.Н. Черепанов, В.П. Шапеев, Н.Б. Пугачева – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. – 252 с.

## OBRAOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(68), July – September 2015, Pages 89–98

### Fatigue strength of steel AISI 321 laser welded seams

**Pugacheva N.B.**<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, e-mail: nat@imach.uran.ru

**Vichuzhanin D.I.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), senior researcher, e-mail: mmm@imach.uran.ru

**Trushina E.B.**<sup>1</sup>, Advanced manufacturing engineer, e-mail: trushina@imach.uran.ru

**Antenorova N.P.**<sup>1</sup>, Advanced manufacturing engineer, e-mail: n.antenorova@yandex.ru

**Michurov N.S.**<sup>1</sup>, Ph.D. student, e-mail: n.michurov@gmail.com

**Orishich A.M.**<sup>2</sup>, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of laboratory, e-mail: laser@itam.nsc.ru

**Cherepanov A.N.**<sup>2</sup>, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief scientist, e-mail: ancher@itam.nsc.ru

**Malikov A.G.**<sup>2</sup>, Ph.D. (Engineering), Scientific associate, e-mail: smalik@ngs.ru

<sup>1</sup> Institute of Engineering Science Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya str., Yekaterinburg, 630049, Russian Federation

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

## Abstract

The main difficulties in austenitic steels welding are associated with the need to increase the resistance of the weld metal and heat affected zone to formation of hot cracks, which are usually divided into crystallization and subsolidus ones. Increased resistance of metal to formation of crystallization cracks is achieved by suppressing the columnar crystallization and structure refining by increasing the cooling rate, alloys purity, using the doping elements-modifiers or elements contributing to the formation of high-temperature second maximally plastic phases (e.g.  $\delta$ -ferrite). These methods narrow the temperature range of brittleness and increase the plasticity reserve. To increase the resistance of austenitic steels to formation of subsolidus hot cracks during welding, the following methods are recommended: alloying with elements that contribute to creating a fragmented cast structure, increasing the purity of the base metal of interstitial impurities, reducing the time spent by the metal at a high diffusion mobility (increasing the cooling rate of the weld metal), restricting deformations by selecting a rational design of joints, etc. The methods listed above are realized in laser welding, which is characterized by high rates of heating and cooling, a little time of stay of the metal in the molten state. It reduces the diffusion interaction and contributes to formation of fine fragmented cast structure of the joint material. Intense convective stirring of the melt in the weld pool helps to remove non-metallic inclusions. A special role can be played by adding refractory nanopowders (NP) into the forming material the welds. Specially prepared well-wettable refractory nanopowder particles, being introduced into the melt, form a dispersed system in which the solid phase serves as the core of each suspension particle. As a result, each nanoparticle becomes a potential seed for the emergence of the new phase. Due to this, during cooling of the melt, a fine crystalline structure is formed in it, thereby increasing the mechanical characteristics of the solidified alloy. The paper addresses the problem of increasing the strength of the weld on the example of AISI 321 (12Kh18N10T) steel. One-piece welded joints are made by laser welding with the use of nanopowder additives. The values of fatigue strength of the welded joints of the steel under investigation produced with a  $\text{CO}_2$  laser and additives of nanopowders TiN and  $\text{Y}_2\text{O}_3$  clad with titanium and iron are determined. The role of the microstructure, grain size, the nature of distribution of microhardness in the formation of the fracture surface under chosen test conditions is studied. It is found out that the average value of tensile strength for the weld is 690 MPa, which exceeds its value for the steel itself (650 MPa). Even the presence of micropores in the material of the welds did not reduce the mechanical properties compared to the base ones. The relief of the sample fractures corresponds to the viscous failure. The additives of nanopowders increased durability of the material of the joints obtained 2.8 times at the maximum cycle stresses above 460 MPa. At that, the zones of complete fracture by the mechanism of viscous failure constituted 65% of the total area of samples fractures with nanopowders and 78% without them. At lower values of the maximum cycle stresses, share of the complete fracture zone was about 50% of the area of sample fractures.

### Keywords:

laser welding, strength, fatigue, microstructure, microhardness, fractography.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-89-98

## References

1. Shorshorov M.Kh. *Metallovedenie svarki stali i splavov titana* [Metallurgy of welding steel and titanium alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 336 p.
2. Grigr'yants A.G., Shiganov I.N. *Lazernaya tekhnika i tekhnologiya. V 7 kn. Kn. 5: Lazernaya svarka metallov* [Laser equipment and technology. In the 7th book. Bk. 5: Laser welding of metals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 207 p.
3. Pugacheva N.B., Smirnov S.V., Vichuzhanin D.I., Afonin Yu.V., Orishich A.M., Zadvorkin S.M., Goruleva L.S. Prochnost' i struktura neraz'emnykh soedinenii titana i austenitnoi stali, poluchennykh lazernoi svarkoi s promezhutochnymi sloyami [Influence of laser-welding mode on structure and strength of one-piece connections of titanium alloy austenitic steel with intermediate copper plate]. *Deformatsiya i razrushenie materialov – Russian metallurgy (Metally)*, 2012, no. 7, pp. 26–32.
4. Pugacheva N.B., Trushina E.B., Pugacheva E.I., Orishich A.M., Cherepanov A.N. Struktura svarnykh shvov stali 12Kh18N10T i titanovogo splava VT1-0 s promezhutochnoi mednoi plastinoy posle lazernogo proplavlenniya [Welded seams' structure of Cr18Ni10Ti (12X18H10T) steel and VT1-0 (BT1-0) titan alloy with an intermediate copper plate after laser melting]. *Voprosy materialovedeniya – Inorganic Materials: Applied Research*, 2013, no. 1 (73), pp. 166–174. (In Russian)

5. Pugacheva N.B., Trushina E.B., Antenorova N.P. Vliyanie lazernoi obrabotki na mikrostrukturu konstruktsionnoi malouglerodistoi stali [Effect of laser processing on the microstructure of a structural low-carbon steel]. *Metally – Russian Metallurgy (Metally)*, 2014, no. 4, pp. 77–85. (In Russian)
6. Buddery A., Dargusch M.S., StJohn D.H., Drennan J., Nabulsi S. Laser welding of titanium and its alloys for medical applications: Current knowledge and future direction. *Materials Science Forum*, 2009, vol. 618–619, pp. 291–294. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.618-619.291
7. Akman A., Demir A., Canel N., Sinmazçelik T. Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, iss. 8, pp. 3705–3713. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.08.026
8. Shariff T., Cao X., Chromik R.R., Baradari J.G., Wanjara P., Cuddy J., Birur A. Laser welding of Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2011, vol. 50, iss. 3, pp. 263–272. doi: <http://dx.doi.org/10.1179/1879139511Y.0000000009>
9. Lambert N., Graeday T., Habraken L., Dadian M., Granjon H. *De ferri metallographia*. Deusseldorf, Verlag Stahleisen, 1983. 440 p. ISBN-10: 3514002142. ISBN-13: 978-3514002142. (Russ. ed.: Lyamber N., Gredi T., Khabraken A., Dad'yan M., Granzhon A. *Metallografiya splavov zheleza*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 248 p.)
10. Saburov V.P., Eremin E.N., Cherepanov A.N., Minnekhanov G.N. *Modifitsirovanie staley i splavov dispersnymi inokulyatorami* [Modification of steels and alloys by disperse inoculators]. Omsk, OmGTU Publ., 2002. 212 p.
11. Cherepanov A.N., Afonin Yu.V., Malikov A.G., Orishich A.M. Primenenie nanoporoshkov tugoplavkikh soedinenii pri lazernoi svarke i obrabotke metallov [On application of refractory nanopowders to laser processing of materials]. *Tyazheloe mashinostroenie – Heavy Engineering Industry*, 2008, no. 4, pp. 25–26.
12. Polukhin V.A., Belyakova R.M., Vatolin N.A. Vliyanie tekhnologicheskikh mikroprimesei na fragmentatsiyu faz pri poluchenii nanosrukturnirovannykh materialov iz splavov na osnove zheleza v rezhime skorostnogo okhlazhdeniya rasplava [Effect of technological minor additives on the phase fragmentation during preparation of nanostructured Fe-based materials by melt quenching]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov – Inorganic Materials: Applied Research*, 2011, no. 3, pp. 63–67. (In Russian)
13. Sorokin V.G., Gervas'ev M.A., eds. *Stali i splavy. Marochnik. Spravochnik* [Steels and alloys. Grades and specifications. Handbook]. Moscow, Internet Engineering Publ., 2001. 608 p. ISBN 5-89594-056-0
14. RD 50–672–88. Methodological recommendations. Strength tests and calculations. Classification of fractures of metals. Moscow, State Standard of the USSR Publ., 1989. 21 p. (In Russian)
15. Klevtsov G.V., Botvina L.R., Klevtsova N.A., Limar' L.V. *Fraktodiagnostika razrusheniya metallicheskh materialov i konstruktssii* [Fractometrical diagnosis of destruction of metallic materials and structures]. Moscow, MISIS Publ., 2007. 264 p. ISBN: 978-5-87623-176-5
16. Orishich A.M., Cherepanov A.N., Shapeev V.P., Pugacheva N.B. *Nanomodifitsirovanie svarnykh soedinenii pri lazernoi svarke metallov i splavov* [Nano-modification of welds by laser welding metals and alloys]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2014. 252 p.

## Funding

The work is supported by co-project number 12-C-1-1026 “Creating scientific and technological bases for the application of the laser for welding dissimilar metals and alloys“, performed in Institute of Engineering Science UB RAS (Yekaterinburg) and Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk) and RFBR grant 14-08-00 633 a.

## Article history:

Received 30 April 2015

Revised 29 May 2015

Accepted 30 June 2015

# СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ЦИКЛИЧЕСКАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ 40X13, ОБРАБОТАННОЙ ИНТЕНСИВНЫМИ ПОТОКАМИ ИОНОВ АЗОТА

*В.А. КУКАРЕКО, доктор физ.-мат. наук  
(ГНУ ОИМ НАН Беларуси, г. Минск)*

Поступила 15 июня 2015

Рецензирование 10 июля 2015

Принята к печати 7 августа 2015

**Кукареко В.А.** – 220072, г. Минск, ул. Академическая, 12, Республика Беларусь  
Государственное научное учреждение  
«Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»,  
e-mail; v\_kukareko@mail.ru

Исследовано влияние ионно-лучевого азотирования на структурно-фазовое состояние и циклическую долговечность высокохромистой мартенситной стали 40X13. Установлено, что обработка стали интенсивными потоками ионов азота эффективно повышает ее микротвердость и сопротивление усталостному разрушению в области многоциклового усталости. Сделано заключение, что на циклическую долговечность большое влияние оказывает уровень действующих в поверхностных слоях напряжений сжатия. Наиболее высокие уровни напряжений сжатия и циклической долговечности достигаются в результате ионной обработки стали при 670 К, обеспечивающей наряду с образованием нитридов также и высокую концентрацию растворенного в матричной фазе азота.

**Ключевые слова:** сталь 40X13, ионно-лучевое азотирование, фазовый состав, циклическая долговечность.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-99-106

## Введение

Сопротивление разрушению под воздействием циклических деформаций является одной из важнейших механических характеристик конструкционных материалов [1]. Поскольку усталостная трещина зарождается как правило в поверхностных слоях, то модифицирование поверхности является перспективным способом увеличения выносливости металлических материалов [1–3]. Многочисленные исследования влияния высокоэнергетической ионно-лучевой обработки на усталость конструкционных материалов свидетельствуют о том, что внедрение ионов различных элементов замедляет кинетику зарождения и распространения усталостных трещин и существенно повышает циклическую

долговечность модифицированных материалов [4]. Новые перспективы открывает применение низкоэнергетических ионно-лучевых технологий с использованием пучков заряженных частиц высокой плотности [4, 5]. В частности, использование потоков ускоренных ионов азота с энергией 2...3 кэВ и плотности ионного тока  $j = 1...2$  мА/см позволяет при сравнительно кратковременном облучении (1,5...2 ч) получать флюенс легирования  $\sim 3...4 \cdot 10^{19}$  ион·см<sup>-2</sup> и достигать в поверхностных слоях облучаемых материалов сверхвысокую концентрацию азота (~30 ат.%) [4, 6, 7]. В процессе ионно-лучевой обработки металлических материалов за счет радиационно-стимулированной диффузии азот транспортируется в глубокие подповерхностные слои и модифицирует их [4–8]. Вместе с тем

эффективность использования метода ионно-лучевого азотирования для повышения выносливости сталей и сплавов, а также особенности усталостного разрушения материалов, подвергнутых обработке ионами азота, изучены недостаточно. В связи с этим представляет интерес исследование влияния ионно-лучевого азотирования на циклическую долговечность высокохромистой стали мартенситного класса 40X13, широко используемой для изготовления режущего и мерительного инструмента, пружин, клапанных пластин и других деталей, работающих в агрессивных средах [9].

### Материал и методика исследования

Исследование проводилось на пластинчатых образцах, изготовленных из листового проката стали 40X13 (ГОСТ 5582–75). Ионно-лучевая обработка образцов проводилась на ускорителе ионов, оснащенный источником с замкнутым дрейфом электронов УВН–2М, разработанном в ФТИ НАН Беларуси [10]. Энергия ионов азота составляла 1...3 кэВ и плотность ионного тока 2 мА/см<sup>2</sup>. Флюенс легирования составлял  $\sim 3 \cdot 10^{19}$  см<sup>-2</sup>. Температура образцов в процессе ионно-лучевой обработки поддерживалась на уровне 670 и 770 К. Испытания на циклическую долговечность осуществлялись на установке УИП-2 по методу симметричного поперечного изгиба консольно закрепленных пластинчатых образцов (ГОСТ 23026–78) с размерами рабочей части 55×15×2,2 мм. Амплитуда циклических деформаций составляла  $e_a = 0,32...0,59$  %, что соответствовало напряжениям  $\sigma_a = 600...1100$  МПа.

Исследование структурного состояния и фазового состава исследуемых образцов стали 40X13 проводилось с использованием рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном  $CoK_{\alpha}$  излучении. Съёмка образцов осуществлялась при ускоряющем напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Запись интенсивности рассеянного рентгеновского излучения проводилась в режиме сканирования (по точкам) с фиксированным временем счета 15 с на точку. Шаг сканирования составлял 0,1°. Фазовый анализ проводился с использованием стандартной базы данных PDF. Для определения напряжений в поверхностных слоях применялся метод рентгеновской тензо-

метрии, основанный на использовании способа наклонной съёмки [11]. Расчет напряжений в направлении продольной оси модифицированного азотом пластинчатого образца проводился по формуле

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{1 + \mu} \frac{d_{\psi} - d_0}{d_0} \frac{1}{\sin^2 \psi},$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\psi$  – угол наклона;  $d_{\psi}$  – межплоскостное расстояние для дифракционной линии (220) матричной  $\alpha$ -фазы, снятой под углом  $\psi = 50^\circ$ ,  $d_0$  – межплоскостное расстояние для дифракционной линии (220), снятой под углом  $\psi = 0^\circ$ . При расчете  $\sigma_{\varphi}$  для азотированного слоя стали 40X13 использовались следующие упругие константы:  $E = 210$  ГПа,  $\mu = 0,3$ . Твердость по Виккерсу определялась при нагрузке 295 Н (30 кгс). Микротвердость измерялась при нагрузке 0,196 Н (20 гс) на приборе ПМТ–3.

### Результаты и обсуждение

#### Структура и фазовый состав стали 40X13.

На рис. 1 представлены фрагменты рентгеновских дифрактограмм от поверхностных слоев образцов стали 40X13 в исходном закаленном состоянии, а также после ионно-лучевого азотирования при различных температурах. Структурные параметры модифицированных азотом слоев, а также их микротвердость и фазовый состав приведены в таблице. На рис. 2 а, б изображена микроструктура азотированных слоев. Из представленных данных можно видеть, что в результате ионно-лучевой обработки стали 40X13 при 670 К на поверхности образуется модифицированный азотом слой толщиной 12...15 мкм, имеющий микротвердость  $\approx 1700$  НВ 0,02. Фазовый состав слоя включает в себя нитриды  $\varepsilon-(Fe,Cr)_{2-3}N$  и  $\gamma'-(Fe,Cr)_4N$ , азотистый мартенсит  $\alpha_N$ , а также фазу  $\alpha''-(Fe,Cr)_8N$ , которая формируется на базе азотистого мартенсита и отличается от него упорядоченным расположением азота в кристаллической решетке  $\alpha$ -фазы [12]. Кроме этого на дифрактограмме присутствуют дифракционные линии ( $\alpha$ -фаза) от незазотированной стальной подложки. Повышенная твердость азотированного слоя обусловлена высокой легированностью нитридных фаз атомами хрома. Ионно-лучевая обработка стали при 770 К

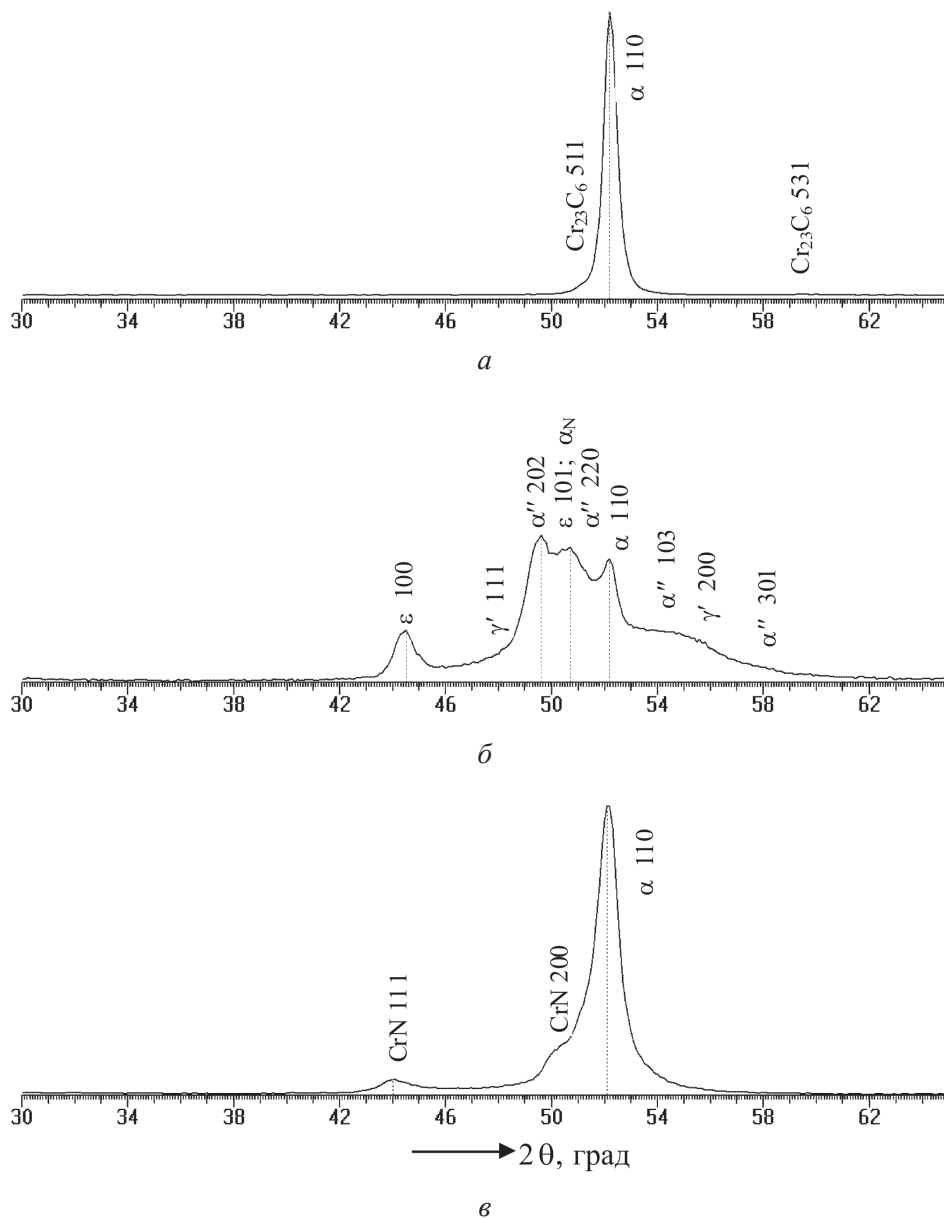
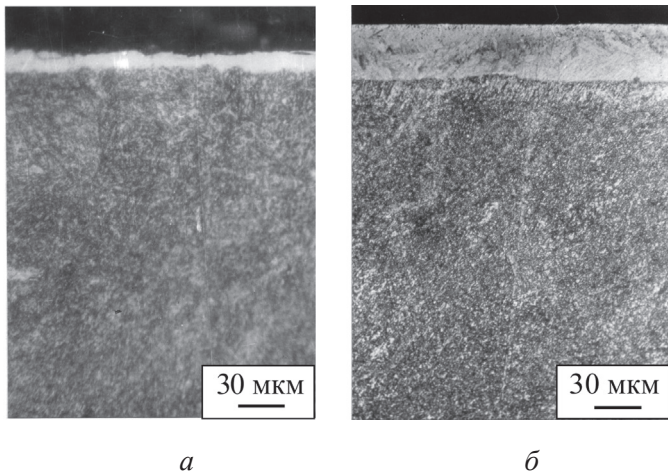


Рис. 1. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм от поверхностных слоев образцов стали 40X13:

*a* – исходное состояние (закалка); *б* – обработка ионами азота при 670 К; *в* – то же при 770 К

### Структурные параметры, фазовый состав и напряженное состояние поверхностных слоев ионно-модифицированной азотом стали 40X13

Предварительная обработка	Режим обработки	Глубина слоя, мкм	Микротвердость, HV 0,02	Фазовый состав	Напряжения в поверхностном слое, МПа
Закалка 1130 К (вода)	Закалка	–	650	$\alpha$ -Fe (мартенсит); $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ (следы)	~0
	Имплантация $\text{N}^+$ при 670 К ( $j = 2 \text{ mA/cm}^2$ , $D = 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ )	10...15	1700	$\epsilon$ ; $\gamma'$ ; $\alpha''$ ; $\alpha_{\text{N}}$ ; $\alpha$ -Fe	-780
	То же при 770 К	30...32	1200	$\alpha$ -Fe; CrN	-440



а

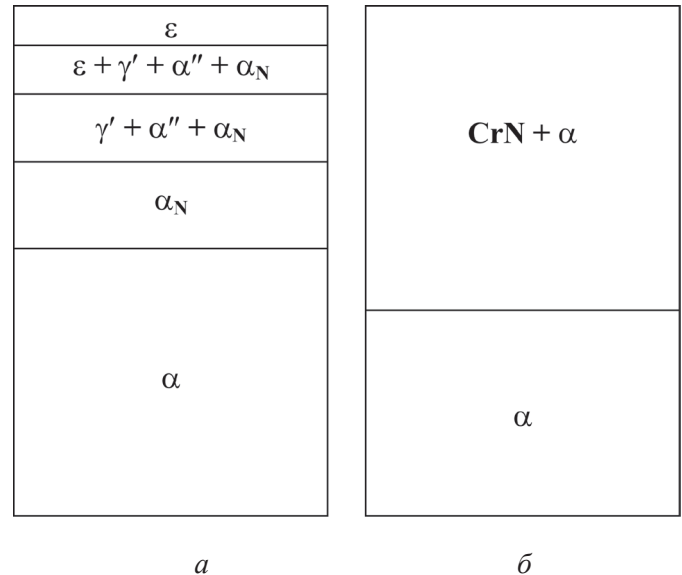
б

Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя высокохромистой стали 40X13, обработанной ионами азота при 670 К (а) и 770 К (б)

приводит к увеличению глубины азотированного слоя до 30...35 мкм. В слое регистрируется присутствие частиц нитрида хрома CrN и матричной  $\alpha$ -фазы (рис. 1, в). Дифракционные линии  $\alpha$ -фазы у обработанной при 770 К стали сильно сужаются, а слой внутреннего азотирования не регистрируется, что указывает на глубокий распад пересыщенного азотом матричного твердого раствора ( $\alpha_N$ -мартенсита). Микротвердость слоя составляет 1200 HV 0,02.

На рис. 3 приведены схемы строения диффузионных зон высокохромистой стали 40X13, прошедшей ионную имплантацию азотом при 670 и 770 К. Результаты рентгеновской тензометрии свидетельствуют о наличии сильных сжимающих напряжений в поверхностном слое модифицированных азотом сталей. Расчетные значения напряжений в поверхностном слое стали 40X13 составляли:  $\sigma_{\phi} = -780$  МПа для  $T_{\text{импл}} = 670$  К и  $\sigma_{\phi} = -440$  МПа для  $T_{\text{импл}} = 770$  К.

Высокий уровень сжимающих напряжений, действующих в модифицированном ионами азота поверхностном слое после обработки при 670 К, обусловлен большой концентрацией азота в матричной  $\alpha$ -фазе. В результате высокотемпературного азотирования при 770 К из-за распада азотистого мартенсита и выделения частиц CrN концентрация азота в матричной  $\alpha$ -фазе резко падает, и различие удельных атомных объемов матричной фазы в азотированном слое и подложке уменьшается. Последнее приводит к снижению уровня действующих в слое напряжений сжатия.



а

б

Рис. 3. Строение диффузионной зоны высокохромистой мартенситной стали типа 40X13, прошедшей ионную имплантацию азотом:

а – 670 К; б – 770 К

**Результаты циклических испытаний.** На рис. 4 в координатах  $\sigma_a - \lg N$  приведены кривые усталости для стали 40X13 в исходном неимплантированном состоянии, а также после обработки ионами азота при 670 и 770 К. Можно видеть, что ионно-лучевое азотирование закаленной стали 40X13 приводит к существенно повышению усталостной долговечности в области многоциклового усталости. Интересно отметить, что наибольшее увеличение циклической долговечности зарегистрировано для случая ионной обработки при 670 К. В частности, при напряжениях испытаний 850 МПа число циклов до разрушения обработанной ионами азота при 670 К стали 40X13 возрастает в  $\approx 10$  раз по сравнению с исходной необработанной сталью. При этом предел выносливости (база испытаний  $5 \cdot 10^6$  циклов) увеличивается от 700 МПа ( $e_a = 0,35$  %) для закаленной неимплантированной стали 40X13 до 850 МПа ( $e_a = 0,43$  %) для стали 40X13, обработанной ионами азота при 670 К. Поскольку этому же режиму ионной обработки отвечает и наибольший уровень остаточных сжимающих напряжений, действующих в поверхностных слоях, то можно полагать, что именно с действием этого фактора связано увеличение сопротивления усталостному разрушению ионно-модифицированных азотом сталей. Возрастание амплитуды циклических деформаций сопровождается сближением кривых уста-



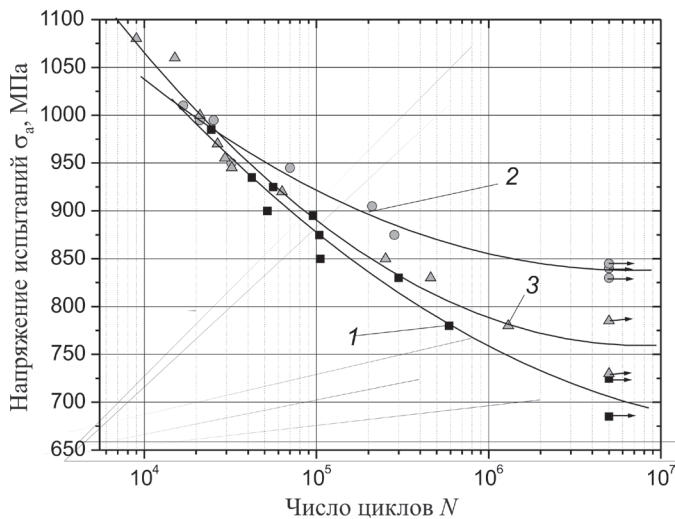


Рис. 4. Циклическая долговечность стали 40X13, обработанной интенсивными потоками ионов азота:

1 – исходное состояние (закалка); 2 – обработка ионами азота при 670 К; 3 – то же при 770 К

лости для модифицированного и немодифицированного материала. В частности, в области малоциклового усталости выносливость имплантированной азотом стали 40X13 не превышает уровня ее выносливости в исходном неимплантированном состоянии.

При анализе причин увеличения многоциклового усталости, модифицированной низкоэнергетическими ионами азота стали, необходимо принимать во внимание, что в области малых амплитуд переменных напряжений циклическая долговечность в значительной степени определяется кинетикой зарождения усталостных микротрещин. При этом образование усталостных микротрещин обычно начинается с поверхностных слоев, отличающихся низкой сдвиговой устойчивостью вследствие пониженного уровня энергии межатомных связей, а также высокой плотности вакансий и подвижности дислокаций [13]. Формирование при азотировании модифицированного поверхностного слоя, находящегося в состоянии сжатия и обладающего высокими прочностными характеристиками, блокирует процессы перемещения дислокаций и замедляет образование усталостных микротрещин на поверхности стали при относительно низких амплитудах деформации испытаний (рис. 4). По мере накопления числа циклов нагружения и увеличения длины усталостных микротрещин возрастает концентрация напряжений в их устьях. При достижении трещинами некоторого

критического размера они разрушают модифицированный слой и формируют магистральную усталостную трещину. Увеличение амплитуды циклических деформаций сопровождается нарастанием интенсивности пластических сдвигов в неупрочненных подповерхностных слоях, что способствует быстрому накоплению в них усталостных повреждений и снижению уровня сжимающих напряжений, действующих в модифицированном слое. Поскольку концентрация напряжений в устьях микротрещин также возрастает пропорционально амплитуде циклических деформаций [2, 14], то трещины быстро преодолевают упрочненный поверхностный слой и формируют магистральную трещину разрушения. При этом различие в циклической долговечности для модифицированной и немодифицированной стали нивелируется. Увеличение температуры ионной имплантации стали 40X13 до 770 К сопровождается снижением уровня напряжений сжатия, действующих в модифицированном слое, и приводит к некоторому понижению характеристик выносливости стали (рис. 4). Вместе с тем циклическая долговечность модифицированной при 770 К стали 40X13 заметно превышает долговечность необработанного ионами азота материала. Подобные результаты были получены при исследовании сопротивления усталостному разрушению модифицированной ионами азота стали X18H10T [15].

Таким образом, ионно-лучевое азотирование эффективно повышает циклическую долговечность модифицированных хромистых сталей в области многоциклового усталости за счет замедления процессов образования и распространения усталостных микротрещин. При этом на сопротивление многоциклового усталостному разрушению большое влияние оказывает уровень действующих в поверхностных слоях напряжений сжатия. Наиболее высокие уровни напряжений сжатия достигаются в результате ионной обработки хромистых сталей при 670 К, обеспечивающей высокую концентрацию растворенного в матричной фазе азота.

## Выводы

Исследовано структурно-фазовое состояние и циклическая долговечность обработанной интенсивными потоками азота при 670 и 770 К

высокохромистой мартенситной стали 40X13. Установлено, что в результате ионно-лучевой обработки при 670 К в стали формируется упругодеформированный модифицированный азотом слой, содержащий частицы нитридных фаз и азотистый мартенсит. Микротвердость слоя составляет 1700 HV 0,02. Обработка при 770 К приводит к увеличению толщины модифицированного слоя, снижению его микротвердости и макронапряжений. В обработанном ионами азота при 770 К слое регистрируется присутствие частиц CrN.

Показано, что ионно-лучевое азотирование стали 40X13 приводит к значительному увеличению ее циклической долговечности в области многоциклового усталости. Наиболее существенное возрастание числа циклов до разрушения в  $\approx 10$  раз регистрируется после ионно-лучевого азотирования стали при 670 К. Предел выносливости обработанной при 670 К стали увеличивается до 850 МПа. Сделано заключение, что на сопротивление многоциклового усталостному разрушению модифицированной ионами азота стали 40X13 большое влияние оказывает уровень действующих в поверхностных слоях напряжений сжатия, обусловленный присутствием в матричной фазе азотированного слоя атомов азота.

### Список литературы

1. *Klesnil M., Lukas P.* Fatigue of metallic materials. – 2nd rev. ed. – Amsterdam: Elsevier, 1992. – 270 p. – (Materials science monographs; Vol. 71). – ISBN-10: 0444987231. – ISBN-13: 978-0-444-98723-5.
2. *Финкель В.М.* Физические основы торможения разрушения. – М.: Металлургия, 1977. – 360 с.
3. *Davidson D.L., Lankford J.* Fatigue crack growth in metals and alloys: mechanisms and micromechanics // *International Materials Reviews*. – 1992. – Vol. 37, iss. 1. – P. 45–76. – doi: <http://dx.doi.org/10.1179/imr.1992.37.1.45>.
4. *Бельй А.В., Кукареко В.А., Патеюк А.* Инженерия поверхностей конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота. – Минск: Белорусская наука, 2007. – 244 с. – ISBN 978-985-08-0793-9.
5. *Microstructure of ultrahigh dose nitrogen – implanted iron and stainless steel / D.L. Williamson, O. Ozturk, S. Glick, R. Wei, and P.J. Wilbur // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B:*

*Beam Interactions with Materials and Atoms.* – 1991. – Vol. 59–60, pt. 2. – P. 737–741. – doi: 10.1016/0168-583X(91)95693-8.

6. *A comparative study of beam ion implantation, plasma ion implantation and nitriding of AISI 304 stainless steel / R. Wei, J.J. Vajo, J.N. Mattosian, P.J. ilbur, J.A. Davis, D.L. Williamson, G.A. Collins // Surface and Coatings Technology.* – 1996. – Vol. 83, iss. 1–3. – P. 235–242. – doi: 10.1016/0257-8972(95)02825-0.

7. *Kukareko V.A., Byeli A.V.* Dose rate and microstructure of nitrogen ion-implanted chromium steels // *Surface and Coatings Technology.* – 2000. – Vol. 127, iss. 2–3. – P. 174–178. – doi: 10.1016/S0257-8972(99)00654-4.

8. *Solid-state amorphization of a tool steel by high-current-density, low-energy nitrogen ion implantation / A.V. Byeli, V.A. Kukareko, O.V. Lobodaeva, S.K. Shykh // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* – 1995. – Vol. 103, iss. 4. – P. 533–536. – doi: 10.1016/0168-583X(95)01188-9.

9. *Конструкционные материалы: справочник / Б.Н. Арзамасов и др.; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова.* – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с. – (Основы проектирования машин).

10. *Бельй А.В.* Высокоинтенсивная низкоэнергетическая имплантация ионов азота // *Физическая мезомеханика.* – 2002. – Т. 5, № 1. – С. 95.

11. *Комяк Н.И., Мясников Ю.Г.* Рентгеновские методы и аппаратура для определения напряжений. – Л.: Машиностроение, 1972. – 88 с.

12. *Jack K.H.* The occurrence and crystal structure of  $\alpha$ -iron nitride; a new type of interstitial alloy formed during the tempering of nitrogen-martensite // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A.* – 1951. – Vol. 208, iss. 1093. – P. 216–224. – doi: 10.1098/rspa.1951.0155.

13. *Панин В.Е.* Поверхностные слои нагруженных твердых тел как мезоскопический структурный уровень деформации // *Физическая мезомеханика.* – 2001. – Т. 4, № 3. – С. 5–22.

14. *Wilkinson A.J., Roberts S.G., Hirsch P.B.* Modelling the threshold conditions for propagation of stage I fatigue cracks // *Acta Materialia.* – 1998. – Vol. 46, iss. 2. – P. 379–390. – doi: 10.1016/S1359-6454(97)00290-5.

15. *Бельй А.В., Кукареко В.А., Биленко Э.Г.* Сопротивление контактному и усталостному разрушению хромистых сталей, поверхностно легированных ионами азота // *Весці Нацыянальнай Акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук.* – 2005. – № 1. – С. 5–9.

## ОБРАБОТКА METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(68), July – September 2015, Pages 99–106

**Structural-phase state and cyclic life of high-chromium steel 40Kh13 processed by intense flows of nitrogen ions**

**Kukareko V.A.**, D.Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of Center, e-mail: v\_kukareko@mail.ru, csimt@tut.by

The State Scientific Institution “Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”, Centre of Structural Research and Tribo-Mechanical Test of Materials, 12 Akademicheskaya str., Minsk, 220072, Republic of Belarus

**Abstract**

The effect of ion-beam nitriding at temperature 670 and 770 K on the structure, phase composition and cyclic durability (fatigue resistance) of high-chromium martensitic steel 40Kh13 is considered. It is shown that the nitrided layer on the steel treated at 670 K contains particles of nitride phases such as  $\epsilon$ -(Fe,Cr)<sub>2-3</sub>N,  $\gamma'$ -(Fe,Cr)<sub>4</sub>N,  $\alpha''$ -(Fe,Cr)<sub>8</sub>N and the solid solution of nitrogen in martensite. Treatment of the 40Kh13 steel at 770 K leads to formation of the nitrided layer containing CrN nitride particles. The occurrence of compressive stresses the nitrided layers is registered. The highest compressive stresses of 780 MPa are located in the steel 40Kh13 surface layer treated with nitrogen ions at 670 K. It was found that the steel processing by intensive flows of nitrogen ions effectively increases its' micro-hardness and resistance to fatigue failure in the field of high-cycle fatigue. The most efficient increase in the number of cycles to failure is recorded after the nitrogen ion beam processing of the steel at 670 K. The fatigue resistance of the steel treated at 670 K increases up to 850 MPa. It is concluded that the cycle life is greatly influenced by the level of compressive stresses in the surface layers. The highest levels of compressive stress and cyclic durability is achieved by ion processing of the steel at 670 K, which provides both the formation of nitrides and a high concentration of dissolved nitrogen in the matrix phase.

**Keywords:**

steel 40Kh13, ion-beam nitriding, phase composition, the cyclic durability.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-99-106

**References**

1. Klesnil M., Lukas P. *Fatigue of metallic materials. Materials science monographs*. Vol. 71. 2nd rev. ed. Amsterdam, Elsevier Science Publ., 1992. 270 p. ISBN-10: 0444987231. ISBN-13: 978-0-444-98723-5
2. Finkel' V.M. *Fizicheskie osnovy tormozheniya razrusheniya* [Physical basis of braking failure]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 360 p.
3. Davidson D.L., Lankford J. Fatigue crack growth in metals and alloys: mechanisms and micromechanics. *International Materials Reviews*, 1992, vol. 37, iss. 1, pp. 45–76. doi: <http://dx.doi.org/10.1179/imr.1992.37.1.45>
4. Byeli A.V., Kukareko V.A., Pateyuk A. *Inzheneriya poverkhnosti konstruktsionnykh materialov kontsen-trirovannymi potokami ionov azota* [A surface engineering structural materials with concentrated streams of nitrogen ions]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2007. 244 p. ISBN 978-985-08-0793-9
5. Williamson D.L., Ozturk O., Glick S., Wei R., Wilbur P.J. Microstructure of ultrahigh-dose, nitrogen – implanted iron and stainless steel. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1991, vol. 59–60, pt. 2, pp. 737–741. doi: 10.1016/0168-583X(91)95693-8
6. Wei R., Vajo J.J., Mattosian J.N., Wilbur P.J., Davis J.A., Williamson D.L., Collins G.A. A comparative study of beam ion implantation, plasma ion implantation and nitriding of AISI 304 stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 1996, vol. 83, iss. 1–3, pp. 235–242. doi: 10.1016/0257-8972(95)02825-0
7. Kukareko V.A., Byeli A.V. Dose rate and microstructure of nitrogen ion-implanted chromium steels. *Surface and Coatings Technology*, 2000, vol. 127, iss. 2–3, pp. 174–178. doi: 10.1016/S0257-8972(99)00654-4

8. Byeli A.V., Lobodaeva O.V., Shykh S.K., Kukareko V.A. Solid-state amorphization of a tool steel by high-current-density, low-energy nitrogen ion implantation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1995, vol. 103, iss. 4, pp. 533–536. doi: 10.1016/0168-583X(95)01188-9
9. Arzamasov B.N. et al. *Konstruksionnye materialy. Spravochnik* [Structural materials. Reference]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 688 p. ISBN 5-217-01112-2
10. Belyi A.V. Vysokointensivnaya nizkoenergeticheskaya implantatsiya ionov azota [High-intensity low-energy ion implantation of nitrogen]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2002, vol. 5, no. 1, p. 95.
11. Komyak N.I., Myasnikov Yu.G. *Rentgenovskie metody i apparatura dlya opredeleniya napryazhenii* [X-ray methods and apparatus for determining the stress]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 88 p.
12. Jack K.H. The occurrence and crystal structure of  $\alpha'$ -iron nitride; a new type of interstitial alloy formed during the tempering of nitrogen-martensite. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 1951, vol. 208, iss. 1093, pp. 216–224. doi: 10.1098/rspa.1951.0155
13. Panin V.E. Poverkhnostnye sloi nagruzhennykh tverdykh tel kak mezoskopicheskii strukturnyi uroven' deformatsii [Surface layers of solids as a mesoscopic structural level of deformation]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2001, vol. 4, no. 3, pp. 5–22.
14. Wilkinson A.J., Roberts S.G., Hirsch P.B. Modelling the threshold conditions for propagation of stage I fatigue cracks. *Acta Materialia*, 1998, vol. 46, iss. 2, pp. 379–390. doi: 10.1016/S1359-6454(97)00290-5
15. Byeli A.V., Kukareko V.A., Bilenko E.G. Soprotivlenie kontaktnomu i ustalostnomu razrusheniyu khromistykh stalei, poverkhnostno legirovannykh ionami azota [Resistance of chromium steels, superficially alloyed by ions of nitrogen, to contact and fatigue failure]. *Vestsy Natsyonalnai Akademii Navuk Belarusi. Seryja fizika-tjechnykh navuk – Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Physical-Engineering Sciences*, 2005, no. 1, pp. 5–9.

**Article history:**

Received 15 June 2015

Revised 10 July 2015

Accepted 7 August 2015

## Рекомендации по написанию научной статьи

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

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

### 1. Общие комментарии

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

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

Избегайте:

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

Научная статья должна иметь определенную структуру, которая описана ниже.

### 2. Заглавие и сведения об авторах

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

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

### 3. Аннотация (реферат)

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

### 4. Ключевые слова

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

### 5. Введение

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

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

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

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

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

При проведении испытаний приводится следующая информация.

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

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

### **6.2. Результаты экспериментов**

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

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

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

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

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

## **7. Обсуждение**

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

## 8. Выводы

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

## 9. Список литературы

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

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

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

## ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

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

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

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

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

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

**Пример авторского резюме на русском языке**

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



### Это же авторское резюме на английском языке

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

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

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

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

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

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

### Фрагменты из рекомендаций авторам журналов издательства Emerald

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

Авторское резюме включает следующее.

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

2. Кратко излагая основные факты работы, необходимо помнить следующие моменты:

– следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;

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

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

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

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

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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

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

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

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

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

Все рукописи рецензируются.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

### Требования к оформлению рукописей

Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word 97-2003**. Формат оригиналов – **A4**. Шрифт – **Times New Roman**, размер шрифта основного текста – **14 пт**, параметры страницы – все поля **2 см**. Выравнивание по ширине. Межстрочный интервал **полуторный**. Абзацный отступ – **1,25 см**. Переносы включены. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть четкими и понятными, могут быть включены в текст статьи.

Научная публикация должна иметь следующую структуру.

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

2. **Аннотация**:

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

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

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

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

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

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

### Краткие требования к набору рукописей

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

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

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

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

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

### Пример оформления статьи

УДК 621.9.06:518.4

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

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

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

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

**Ключевые слова**

<текст статьи с четко выраженной структурой>

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

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

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

**Abstract** (не менее 250 слов)

**Key words**

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

## Пример оформления сведений для РИНЦ:

---

УДК

621.9.06

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

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

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

### **Аннотация**

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

### **Ключевые слова**

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

### **Литература**

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

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

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

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

### **Keywords**

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

## 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* описания 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 описания 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:

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 включают все больше книг в свои ресурсы, в том числе *Scopus*. Переводная версия может быть также описана, 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 непонятно 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.

#### **Описание статьи из журналов:**

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

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

#### **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.

Latyshev V.N. *Tribologiya rezaniya. Kn. 1: Friksionnye protsessy pri rezanie 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 aviatсионных материалов. 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 inzhenerenom 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., e.a. *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 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)

# МЕДИАКИТ ЖУРНАЛА

О ЖУРНАЛЕ

МЕДИАКИТ



Ежеквартальный научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» публикует:

- материалы о прогрессивном оборудовании и инструментах для металло- и деревообработки, слесарно-монтажных, строительных и малярных работах, о достижениях в области их разработки и авангардных технологиях производства, а также о проблемах экономики и организации производства, подготовки специалистов и повышения их квалификации;

- результаты научных исследований докторов и кандидатов наук, аспирантов, магистров техники и технологии по следующим научным направлениям: 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; 05.02.08 – Технология машиностроения; 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка

металлов и сплавов; 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение). Присутствуют разделы: «Технология», «Оборудование», «Инструменты», «Материаловедение», «Труды конференции», «Научно-техническая информация» и др.

**Научно-технические статьи**, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование.

Публикация статей **бесплатная**.

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

Дата основания:

1998 г. – Инструмент Сибири; с 2001 г. – Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты).

Свидетельство о регистрации средств массовой информации ПИ № ФС77-23961 от 05 апреля 2006 г. ISSN 1994-6309.

Учредители журнала:

- ОАО Новосибирский проектно-технологический и экспериментальный институт «Оргстанкинпром»;
- Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»;

- ООО Научно-производственная коммерческая фирма «Машсервисприбор».

**Издатель:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Новосибирский государственный технический университет»;

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.



**Технические характеристики журнала:**

- Периодичность – 4 раза в год (1 раз в квартал)
- Язык – русский
- Объем – до 200 страниц
- Формат – А4 (210 x 297 мм)
- Тираж – до 500 экз



## РАСПРОСТРАНЕНИЕ

### Структура распространения:

- по подписке (Индекс в каталоге агентства «Роспечать» – 70590);
- адресная почтовая рассылка авторам статей, по промышленным предприятиям, научным и учебным заведениям России;
- на выставках, конференциях.

### Регионы распространения:

- Сибирь, Алтай, Дальний Восток – 60 %;
- Урал, Европейская часть РФ – 40 %.

### Структура читательской аудитории

Преподаватели учебных заведений и научные сотрудники	64 %
Руководители (инжиниринговых предприятий, фирм-разработчиков и др. )	8 %
Ведущие специалисты предприятий (главные инженеры, технологи, конструкторы и т.д.)	11 %
Инженерно-технический состав предприятий и организаций	17 %

### Журнал представлен:

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

## МЕДИАКИТ

- электронная версия журнала доступна на платформе eLIBRARY.RU.

### График выхода журнала в течение текущего года

Номер	Выход (число, месяц)
1	15.03
2	15.06
3	15.09
4	15.12

### Адрес редакции журнала:

630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 274, зам. гл. редактора – В. Г. Атапин, В. Ю. Скиба.

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



## МЕРОПРИЯТИЯ

## МЕДИАКИТ

С 2014 научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» является организатором ежегодной (третья декада марта) Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении»/ «Actual Problems in Machine Building» совместно с «ИТЕ Сибирь» в рамках Международной выставки машиностроения и металлообработки Mashex Siberia. По результатам конференции издается сборник материалов конференции.

### Тематика работы конференции:

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

### Официальный сайт конференции:

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



## РЕКЛАМА. ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ

## МЕДИАКИТ

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

Цветная реклама на обложке (формат А4):

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

