

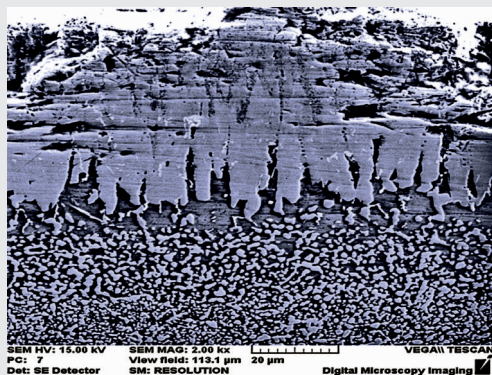
# ОБРАБОТКА

ISSN 1994-6309

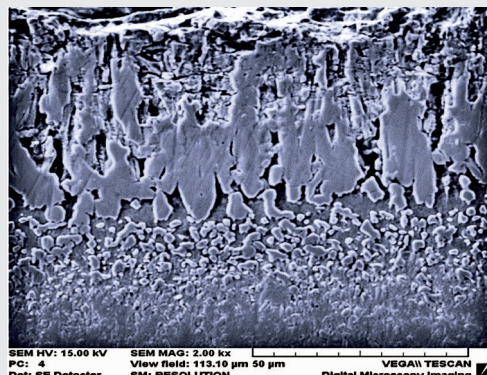
# ОМ МЕТАЛЛОВ

## ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

№ 1 (66) ЯНВАРЬ–МАРТ 2015 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



*а*



*б*

Микроструктура диффузионного боридного покрытия:

*а* – на ноже из стали 6Х6В3МФС

*б* – на оси из стали 4Х5МФС

НОВОСИБИРСК



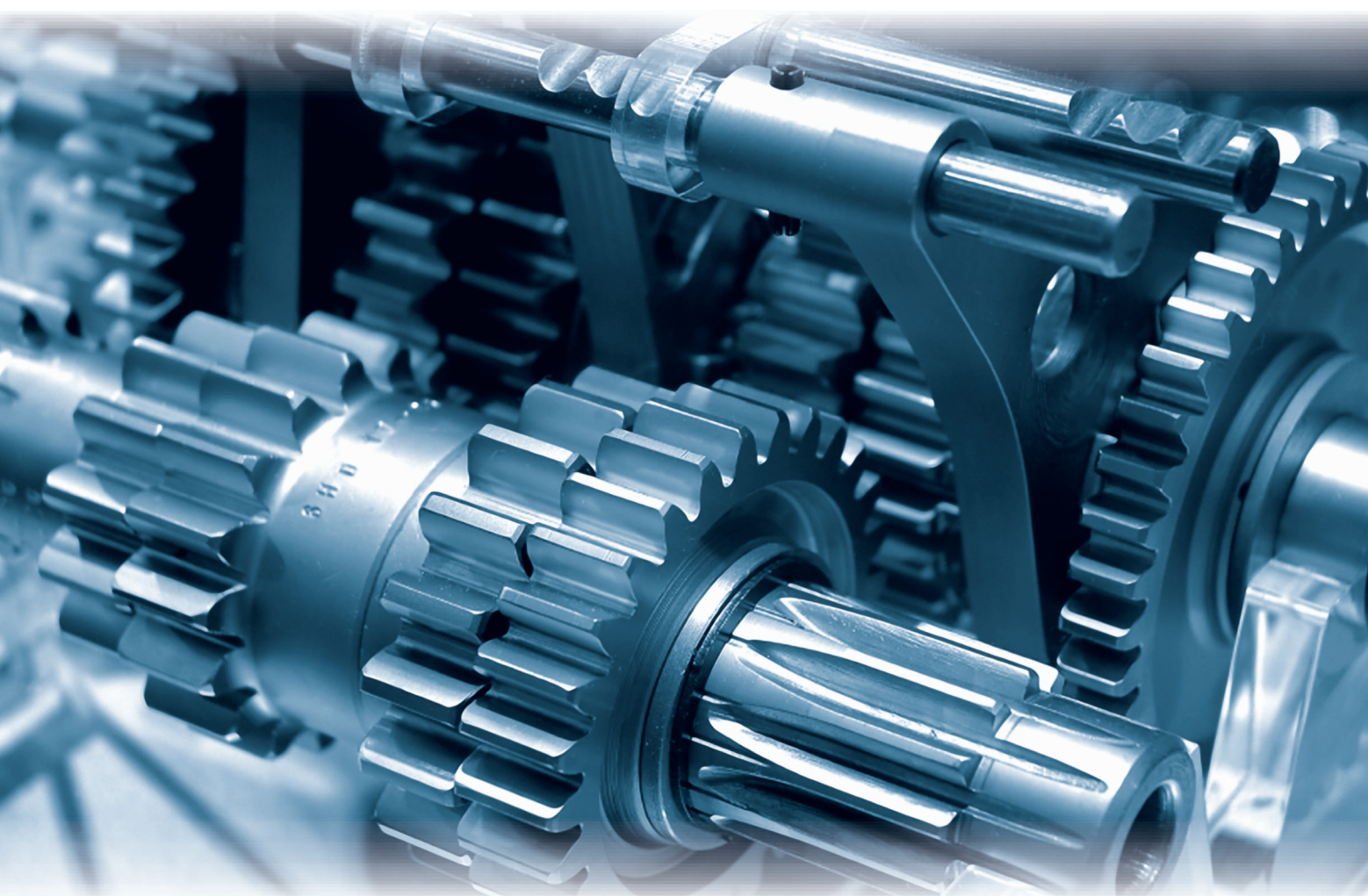


Международная выставка машиностроения  
и металлообработки

**24-27 марта 2015**

Россия, Новосибирск

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



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

Генеральный  
информационный партнер:



# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

## ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309

№ 1 (66) ЯНВАРЬ–МАРТ 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, ректор НГТУ, г. Новосибирск (Российская Федерация)

#### Члены совета

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

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

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

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

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

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

#### СОУЧРЕДИТЕЛИ

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

#### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

#### ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

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

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

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

#### ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

#### ИЗДАТЕЛЬ

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

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

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

Индекс: **70590** («РОСПЕЧАТЬ»)

#### Адрес редакции:

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

Тел. (383) 346-17-77

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

Цена свободная

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

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНОЛОГИЯ

<b>Солер Я.И., Казимиров Д.Ю., Нгуен В.Л.</b> Количественная оценка прижогов при плоском шлифовании закаленных деталей из стали 40X абразивными кругами различной пористости.....	6
<b>Скворцов В.Ф., Бознак А.О.</b> Влияние длины толстостенных цилиндров на остаточные напряжения, возникающие при одноцикловом дорновании отверстий.....	20
<b>Сапрыкина Н.А.</b> Исследование влияния режимов лазерного спекания на толщину спеченного слоя порошка DSK-F75.....	27
<b>Черномас В.В., Севастьянов Г.М., Севастьянов А.М., Бондаренко С.В.</b> Экспериментальное определение энергосиловых параметров и компонент деформации при циклическом формоизменении материала.....	33

### ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

<b>Агапин В.Г.</b> Рациональное проектирование стойки тяжелого многоцелевого станка.....	42
--	----

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<b>Пугачева Н.Б., Быкова Т.М.</b> Характер повреждений цементованных и борированных поверхностей на деталях режущей пары гидромеханического щелевого перфоратора.....	51
<b>Соколов А.Г., Бобылёв Э.Э.</b> Повышение износостойкости чугунных изделий путем нанесения диффузионных титановых покрытий.....	60
Рекомендации по написанию научной статьи .....	69
Подготовка аннотации .....	71
Правила для авторов .....	74

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 03.03.2015. Выход в свет 16.03.2015. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
 Усл. печ.л. 9,5. Уч.-изд. л. 17,67. Изд. № 21. Заказ 359. 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.1(66) January–March 2015

### EDITORIAL BOARD

#### EDITOR-IN-CHIEF:

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

#### DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

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

**Vladimir G. Burov**, D.Sc. (Engineering), Professor,  
Department of Material Science in Mechanical Engineering,  
Novosibirsk State Technical University,  
Novosibirsk, Russian Federation

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

#### Editor of the English translation:

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

The magazine is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year

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

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

Tel.: (383) 3461777

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

E-mail: metal\_working@mail.ru

## EDITORIAL COUNCIL

## CHAIRMAN:

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

## MEMBERS:

*The Federative Republic of Brazil:*

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

*The Federal Republic of Germany:*

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

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

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

*The Republic of Belarus:*

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

*The Ukraine:*

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

*The Russian Federation:*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



## CONTENTS

### TECHNOLOGY

<b>Soler Ya. I., Kazimirov D. Yu., Nguyen V. L.</b> Quantitative assessment of burns while flat grinding hardened parts made of steel 37Cr4 by abrasive wheels of different porosity.....	6
<b>Skvortsov V.F., Boznak A.O.</b> The effect of length of thick-walled cylinders on the residual stresses generated during the single-cycle mandrelling.....	20
<b>Saprykina N.A.</b> The research of the effect of laser sintering modes on the thickness of the sintered cobalt-chromium-molybdenum powder layer.....	27
<b>Chernomas V.V., Sevastyanov G.M., Sevastyanov A.M., Bondarenko S.V.</b> Experimental determination of energy-power parameters and components of deformation during cyclic forming of material.....	33

### EQUIPMENT. INSTRUMENTS

<b>Atapin V.G.</b> Rational design of the column of a heavy multipurpose machining center.....	42
--	----

### MATERIAL SCIENCE

<b>Pugacheva N.B., Bykova T.M.</b> The degree of breakdown of the cemented and borated surfaces on details of the cutting pair of the hydromechanical slot perforator.....	51
<b>Sokolov A.G., Bobylyov E.E.</b> The improvement of wear resistance of cast iron products by application of diffusion titanium coatings.....	60
Guidelines for Writing a Scientific Paper .....	69
Abstract requirements .....	71
Rules for authors .....	74

# КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПРИЖОГОВ ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ ЗАКАЛЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 40Х АБРАЗИВНЫМИ КРУГАМИ РАЗЛИЧНОЙ ПОРИСТОСТИ

*Я.И. СОЛЕР, канд. техн. наук, доцент  
Д.Ю. КАЗИМИРОВ, канд. техн. наук, доцент  
В.Л. НГУЕН, аспирант  
(ИрГТУ, г. Иркутск)*

Поступила 20 января 2015  
Рецензирование 10 февраля 2015  
Принята к печати 15 февраля 2015

**Солер Я.И.** – 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Иркутский государственный технический университет,  
e-mail: solera@istu.irk.ru

Разработана методика количественной оценки прижогов на базе цифровых технологий. Она апробирована в условиях маятникового шлифования закаленных деталей из стали 40Х абразивными инструментами различной пористости: 25AF46L10V5KФ35 ( $i = 1$ ), 25AF46M12V5ПО3 ( $i = 2$ ), ЕКЕ46К3V ( $i = 3$ ), 5A46L10VAX ( $i = 4$ ). Инструменты  $i = 1;2$  относятся к высокопористым кругам (ВПК), а круги  $i = 3;4$  из монокристаллического корунда имеют стандартную пористость (изготовитель – фирма *Dorfner Schleifmittelwerk* (Германия)).

Для подтверждения надежности предложенной методики оценки прижогов параллельно проведено исследование микротвердости деталей. Учитывая стохастическую природу шлифования, для обработки наблюдений привлечены статистические методы: параметрический и непараметрический (в частности, ранговый). Их достоинствами является возможность оценки надежности принимаемых решений, а также режущих способностей кругов не только по мерам положения, но и рассеяния. Вторая характеристика одномерного распределения частот наиболее важна при шлифовании ответственных деталей на настроенных станках с ручным управлением с целью снижения вероятности брака. Показано, что в условиях нарушений гомоскедастичности и нормальности распределений наблюдений параметрический метод «на чужом поле» привел к смещению мер положения и доверительных интервалов. Установлена корреляционная связь между мерами положения для плотности прижогов и микротвердости при шлифовании абразивными инструментами на режиме  $v_k = 35$  м/с,  $s_{пр} = 7$  м/мин,  $s_{п} = 1$  мм/дв. ход,  $t = 0,015$  мм,  $z = 0,15$  мм, который обеспечивает наибольшую микротвердость деталей 40Х при минимальных прижогах. Проведенное исследование показало, что шлифование деталей исследуемыми кругами протекает в условиях разупрочнения их поверхностей, но без вторичной закалки.

**Ключевые слова:** шлифование, прижоги, микротвердость, статистика, среднее, медиана, мера рассеяния, цифровые технологии.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-6-19

## Введение

В процессе абразивного шлифования деталей из закаленных сталей существует большая вероятность повреждения их поверхности вследствие возникновения прижогов, которые являются одним из наиболее распространенных

и сложных дефектов при работе «жесткими» абразивными инструментами. Это связано с превращением работы резания в теплоту. Их источником служат абразивные зерна, которые с учетом расположения в радиальном направлении разделяются на три группы: режущие, давящие и нережущие. Наиболее выступающие абразив-



ные зерна первоначально производят упругую деформацию металла, затем пластическую, и по достижении контактных напряжений, превышающих предел прочности металла, – снятие стружки. Тепло образуется в основном в результате трения абразивных зерен по ювенильной поверхности только что обработанного металла и энергии, расходуемой на упругую и пластическую деформацию. При этом на первых двух этапах контакта режущих зерен с металлом температура шлифуемой поверхности оказывается даже выше, чем при снятии стружки. Давящие зерна лишь скользят по ранее обработанной поверхности, вызывая дополнительно упругую и пластическую деформацию и тепловыделение. Мгновенный нагрев поверхности заготовки может составлять 700...800 °С и приводит ее к локальному оплавлению. При этом скорость нагрева достигает 5000...6000 °С/с и даже до 10 000 °С/с. Тепловое поле заготовки характеризуется высоким градиентом и сосредоточивается в поверхностном слое глубиной до 0,1...0,3 мм. Практически за доли секунды эта температура снижается, так как основная часть тепла отводится в нижележащие слои холодного металла. При интенсивном съеме металла температуры нагрева могут быть выше фазового превращения (линии  $A_{c1}$ ). Нагретый металл, взаимодействуя с охлаждающей средой, приобретает пониженную или повышенную твердость поверхностного слоя детали. При этом в сталях с мартенситной и сорбитной структурой возможна вторичная закалка [1, 2].

В работах [3–5] прижоги классифицированы на две группы: закалки и отпуска. В первом случае в результате нагрева металла выше линии  $A_{c1}$  образующийся при шлифовании аустенит при остывании деталей не достигает полного обратного мартенситного превращения. Это связано с тем, что в результате больших удельных давлений, оказываемых абразивными зёрнами на их поверхности, и скорости движения теплового источника нижняя граница мартенситного превращения смещается ниже 20 °С. В результате на поверхности детали фиксируется структура аустенита закалки, который может иметь две схемы превращений: диффузионную «мартенсит – перлит – аустенит» и бездиффузионную «мартенсит – аустенит». В первом случае протекает выход углерода из кристаллической ре-

шетки мартенсита в зоне температуры отпуска, а при дальнейшем повышении нагрева  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращение и растворение углерода в  $\gamma - Fe$ , т. е. образование аустенита. Бездиффузионная схема обратного мартенситного превращения предполагает только сдвиг кристаллической решетки при минимальном времени воздействия теплового источника ( $10^{-11}$  с). Прижоги второй группы протекают в третьем превращении отпуска, когда углерод полностью выходит из решетки мартенсита. При этом образуется феррит, а в результате реакции между ним и выделившимся углеродом – цементит (перлит).

Снижение твердости, обусловленное прижогами, оказывает неблагоприятное воздействие на усталостную прочность, износостойкость и, как следствие, долговечность деталей машин [6]. В связи с этим при шлифовании высоконагруженных и ответственных деталей контролю прижогов уделяется большое внимание. Существующие методы контроля разделяются на разрушающие и неразрушающие. Одним из самых известных разрушающих методов контроля является химическое травление, при котором химические растворы реагируют с отдельными структурными составляющими, находящимися на поверхности детали [7, 8]. Дополнительно прижоги контролируются внешним осмотром. Однако метод травления дает информацию лишь о грубых структурных изменениях в поверхностном слое деталей, характеризуется высокой трудоемкостью и экологически опасен. Поэтому ведется непрерывный поиск более современных, неразрушающих способов контроля прижогов. В работе [7] предложен метод, основанный на измерении удельного сопротивления металла, которое возрастает при возникновении прижогов вторичной закалки и уменьшается при прижогах вторичного отпуска. Позднее создан способ выявления прижогов, описанный в работе [9], по электризации и свечению их зон в ультрафиолетовом свете после нанесения специального вещества на поверхность. В работе [10] авторами предложен способ выявления зон со шлифовочными и эксплуатационными прижогами путем измерения на поверхности деталей флуктуации физического параметра, в качестве которого принята работа выхода электронов. Для цементируемых и улучшаемых легированных сталей с мартенситной структурой часто

используют рентгеновский метод [3, 11], который позволяет оценить степень прижогов по количеству остаточного аустенита в шлифованном слое деталей. В научных целях используют металлографический метод, который связан с изготовлением шлифов, их травлением и изучением структур на металлографическом микроскопе. Он обладает высокой точностью, но его отличает высокая трудоемкость и возможность только выборочного контроля в лабораторных условиях [11]. В последнее время за рубежом получил распространение метод обнаружения прижогов с использованием эффекта Баркгаузена по анализу шумов [12, 13]. При этом повышение сигнала шумов Баркгаузена свидетельствует о снижении твердости и росте остаточных напряжений растяжения в результате прижогов вторичного отпуска. В противном случае их снижение свидетельствует о прижогах, обусловленных вторичной закалкой.

Большинство из рассмотренных методов контроля обладают высокой трудоемкостью, трудно автоматизируются и не всегда дают количественную оценку прижогов. В работе [14] предложено использовать планшетный сканер и анализ фотографий по плотности оттенков серого тона, которые не позволяют выявить различную интенсивность прижогов.

Задачей данной работы является разработка методики количественной оценки прижогов на основе цифровых технологий. Это позволит повысить качество изготовления ответственных деталей, в частности, путем выбора абразивных кругов по минимальному тепловому воздействию на поверхность.

### Методика проведения эксперимента

Натурные опыты выполнены при следующих неизменных условиях: оборудование – плоскошлифовальный станок модели 3Г71; детали из стали 40Х ( $\sigma_b = 980$  МПа,  $\delta = 10$  %) перед шлифованием прошли термообработку: закалку  $860$  °С в масле, отпуск  $500$  °С, вода или масло [15]; размеры шлифуемой поверхности  $L \times B = 30 \times 40$  мм; число повторений опытов  $n = 10$  – при оценке прижогов,  $n = 30$  – при измерении микротвердости; СОЖ – 5 %-я эмульсия Аквол – 6 (ТУ 0258-024-00148845-98), подаваемая поливом на деталь с расходом  $7 \dots 10$  л/мин; правка круга –

алмазным карандашом перед шлифованием каждой детали; режим обработки – скорость резания  $v_k = 35$  м/с, продольная подача  $s_{пр} = 7$  м/мин, поперечная подача  $s_{п} = 1$  мм/дв. ход, глубина резания  $t = 0,015$  мм, операционный припуск  $z = 0,15$  мм. Шлифование ведут абразивными кругами формы 1 с размерами  $250 \times 20 \times 76$  мм. Их характеристики представлены кодом  $i = \overline{1,4}$ , который удобен при статистической обработке наблюдений: 1 – 25AF46L10V5KФ35 (абразивный завод «Ильич», г. Санкт-Петербург); 2 – 25AF46M12V5ПО3 (Лужский абразивный завод, г. Луга); 3 – ЕКЕ46К3V; 4 – 5А46L10VAX. Круги  $i = \overline{3,4}$  изготовлены фирмой *Dorfner schleifmittelwerk* (Германия) и содержат зерна монокорунда, маркировка которых зависит от метода получения и отличается от российской: ЕКЕ – для литых, 5А – для прессованных. Обозначение других элементов характеристики у круга  $i = 4$  в наибольшей мере совпадает с российской, за исключением номеров структур. Российские круги  $i = \overline{1,2}$  со структурами 10–12 относятся к высокопористым (ВПК), а у круга  $i = 4$  – к открытой, поскольку фирма *Dorfner schleifmittelwerk* к ВПК относит номера структур 13–20. В литом инструменте  $i = 3$  индекс К указывает на среднюю структуру, а цифра 3 – на его твердость «мягкая».

После шлифования поверхность изделия очищали от пыли и загрязнений. Фотографирование вели в двух взаимно ортогональных направлениях, совпадающих с векторами  $s_{п}$  и  $s_{пр}$ . Съемка велась под искусственным светом от набора студийных осветителей *Smartum* с источниками  $5500$  К через рассеиватели, что позволило устранить возможные полутени. Режим макросъемки: фокусное расстояние  $250$  мм со штатива цифровой зеркальной фотокамерой *Nikon D3100* с матрицей *CMOS*, с общим количеством пикселей  $14,2$  млн, с объективом *Nikon 18...55 мм f/3,5-5,6G AF-S VR DX Zoom-Nikkor*, с чувствительностью *ISO400* и максимальным разрешением снимка  $4608 \times 3072$ . Макросъемка позволила каждую элементарную площадку поверхности отразить пикселем соответствующего цвета. При этом участки поверхности с прижогами имеют более темные цвета. Они отличаются от цветов металла без прижогов, которые на реальной поверхности выражены недостаточно контрастно. Сказанное затрудняет конвертиро-





вание программы. В связи с изложенным исходный фотоснимок, сохраняющийся в виде фотофайла с расширением *JPEG*, преобразовывался программой *Adobe Photoshop CS6 13.1.2*, имеющей специальный инструмент «*Shadow/Highlight* – тени/света», который позволил преобразовать темные участки (прижоги) и светлые участки (без прижогов) в различные цвета. Это облегчает конвертирование растровых изображений цветов, закодированных в *HTML*- и *RGB*-кодах, которые сохраняются в виде *txt* файла с возможными оттенками цветов не более  $j = 16$  [16]. В файле прижоги представлены несколькими кодами  $j = \overline{1;3}$ : 1 – *RGB* – (128, 128, 0); 2 – (0, 128, 0); 3 – (128, 0, 0), которые соответствуют *HTML*: #808000 olive, #008000 green, #800000 maroon. Количество прижогов для одной из деталей  $v = \overline{1;10}$ , прошлифованной кругом  $i$ , рассчитывается из выражения

$$P_{iv} = \left( \frac{\sum P_{j\text{пр}}}{\sum P_j} \right)_{iv} 100 \%, \quad i = \overline{1;4}, \quad (1)$$

где  $P_{iv}$  – плотность прижогов поверхности  $v$ -й детали в процентах;  $\sum P_{ij}$ ,  $j = \overline{1;3}$  – общее количество пикселей цветов прижогов;  $\sum P_j$  – общее количество всех пикселей при переменном  $j$  при тех же условиях шлифования.

Дополнительно на приборе ПМТ-3 проведено измерение микротвердости шлифованных поверхностей деталей  $HV_i$  по методике [17], которое позволяет оценить адекватность предлагаемой методики количественного содержания прижогов.

Для анализа экспериментальных данных в работе используются статистические подходы, обусловленные стохастической природой процесса шлифования. Получаемые параметры прижогов поверхности (1) и микротвердости представляют собой случайные величины (СВ), образующие независимые множества:

$$\{y_{iv}\}, \quad i = \overline{1;4}, \quad v = \overline{1;n}. \quad (2)$$

Существует два направления статистических методов: параметрическое и непараметрическое (в частности, ранговое), используемых для изучения СВ. Характеристиками одномерного распределения частот для (2) служат [18–20]: средние  $\overline{y}_i = y_{i\bullet}$ , стандарты отклонений  $(SD)_i$ ,

размахи  $R_i = |y_{\max} - y_{\min}|_i$  – для первого направления; медианы  $\tilde{y}_i$ , квартильные широты  $KШ_i = |y_{0,75} - y_{0,25}|_i$  – для второго направления. Первая из указанных частот характеризует меру положения (опорное значение) СВ, а последующие – меры рассеяния (прецизионность). Сдвиг  $y_{i\bullet}$  и  $\tilde{y}_i$  свидетельствует об асимметрии (скошенности) кривой распределений, которая приближенно вычисляется из выражения [18]:

$$As_i = [3(y_{i\bullet} - \tilde{y}_i) / SD]_i, \quad i = \overline{1;4}.$$

Параметрический метод статистики используется в том случае, когда (2) обладают свойствами гомоскедастичности (синонимы – однородность или гомогенность дисперсий отклонений) и нормальности распределений. При нарушении этих ограничений рекомендуется, в частности, привлекать ранговый метод, который не связан с конкретным семейством распределений и его свойствами. В работе [18] изложены методика выбора статистического метода и последующий поиск ожидаемых средних  $\hat{y}_{i\bullet}$  и медиан  $m\hat{y}_i$ ,  $i = \overline{1;4}$ . На первом этапе для (2) проводится одномерный дисперсионный анализ (ОДА) на предмет установления факта значимого различия между уровнями мер положения, а на последующем – их множественный анализ, который завершается поиском ожидаемых аналогов для переменной  $i = \overline{1;4}$ . Обработка наблюдений (2) требует большого объема вычислений и проведена в программной среде *Statistica 6.1.478.0*.

Влияние непараметрического метода на меры положения оценивается медианными коэффициентами при неизменном  $i = \overline{1;4}$ :

$$K_{Mi} = (\tilde{y} / y_{i\bullet})_i, \quad (3)$$

$$\hat{K}_{Mi} = (m\hat{y} / \hat{y}_{i\bullet})_i. \quad (4)$$

Оценку работоспособности кругов  $i = \overline{2;4}$  относительно базового ВПК 25AF46L10V5KФ35 ( $i = 1$ ) ведем для обеих характеристик одномерного распределения частот (2) [21, 22]:

$$K_i = \tilde{y}_i / \tilde{y}_1, \quad (5)$$

$$\hat{K}_i = m\hat{y}_i / m\hat{y}_1, \quad (6)$$

$$K_{cti1} = SD_1 / SD_i, \quad (7)$$

$$K_{cti2} = R_1 / R_i, \quad (8)$$

$$K_{cti3} = KШ_1 / KШ_i, \quad (9)$$

где индексы  $e = \overline{1;3}$  в (7)–(9) отражают принятые меры рассеяния: 1 – по  $SD_i$ ; 2 – по  $R_i$ ; 3 – по  $KШ_i$ . Если предсказаны:  $(K_i, \widehat{K}_i) > 1$  и  $K_{ctie} < 1, e = \overline{1;3}$ , то меры положения и рассеяния выходных параметров процесса при шлифовании кругами  $i = \overline{2;4}$  превышают аналоги для базового ВПК 25AF46L10V5KФ35 ( $i = 1$ ) и уступают ему по выбранным критериям стабильности процесса; в противном случае – превосходят их.

Коэффициенты (4), (6)–(9) необходимы для комплексной оценки режущих способностей абразивных кругов и расширения информационной базы при многокритериальном управлении процессом шлифования с использованием моделей многомерного дисперсионного анализа с учетом конструктивных особенностей и служебного назначения деталей [23]. Опытный медианный коэффициент (3) позволяет оценить скошенность кривых распределений, а (5) – возможные ошибки при оценке режущих способностей кругов по опытным мерам положения.

### Результаты и обсуждение

В качестве примера на рис. 1 представлены фотофайлы шлифованной поверхности детали

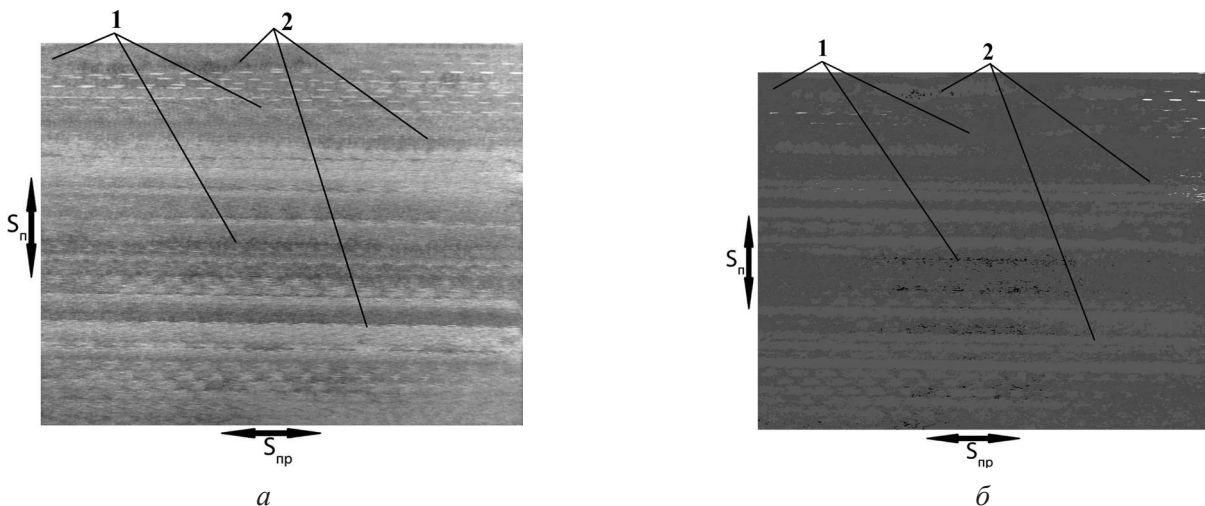


Рис. 1. Фотофайлы шлифованной поверхности детали  $v = 5$  кругом 5A46L10VAX:  $a$  – исходный фотофайл;  $b$  – фотофайл, представленный 16-битным цветным рисунком

$v = 5$  кругом 5A46L10VAX, на которых выделены участки: 1 – без прижогов, 2 – с прижогом.

Результаты обработки фотофайлов данной детали содержатся в табл. 1, в которой зарегистрировано количество пикселей для различных цветов  $j = \overline{1;13}$ . Из рис. 1,  $b$  и табл. 1 видно, что количество пикселей прижогов  $j = \overline{1;3}$  составляет: 3090960 (128, 128, 0) – olive для  $j = 1$ ; 2356538 (0, 128, 0) – green для  $j = 2$ ; 8131 (128, 0, 0) – magoon для  $j = 3$ , которые расположены в последовательности снижения плотности прижогов. Аналогичным образом был выполнен поиск прижогов по другим опытам и кругам (см. табл. 4).

В табл. 2 показаны результаты проверки однородности дисперсий с помощью трех критериев: Хартли, Кохрена, Бартлетта; Левене и Брауна-Форсайта. Первая группа из трех статистик в программе представлена общей совокупностью.

Знак «+» в последнем столбце табл. 2 означает, что нуль-гипотеза ( $H_0$ ) об однородности дисперсий наблюдений принимается по всем критериям, но с учетом возможной ошибки второго рода. Это обусловлено тем, что расчетные уровни значений превышают критические величины незначительно.

Нормальность распределений ( $H_0$ ) множеств (2) проверена с помощью критерия Шапиро–Уилка ( $W$ ). Из теоретической статистики известно, что  $H_0$  подтверждается при удовлетворении неравенств [18]:  $p_i > 0,5, i = \overline{1;4}$ . Из табл. 3 и рис. 2 видно, что только при шлифовании кругом из монокристаллического корунда ЕКЕ46К3V



Таблица 1

## Частотное распределение встречаемости пикселей каждого цвета

Цвет, $j = \overline{1;13}$	Количество пикселей	RGB-код	HTML-код
1	3090960	(128, 128, 0)	#808000 olive
2	2356538	<b>(0, 128, 0)</b>	<b>#008000 green</b>
<b>3</b>	<b>8131</b>	<b>(128, 0, 0)</b>	<b>#800000 maroon</b>
4	1929496	(0, 128, 128)	#008080 teal
5	21581	(0, 0, 0)	#000000 black
6	21425	(128, 128, 128)	#808080 fractal
7	16948	(0, 0, 128)	#000080 navy
8	6037	(255, 255, 255)	#FFFFFF white
9	3155	(192, 192, 192)	#C0C0C0 silver
10	1789	(128, 0, 128)	#800080 purple
11	786	(255, 255, 0)	#FFFF00 yellow
12	142	(0, 0, 255)	#0000FF blue
13	42	(0, 255, 0)	#00FF00 lime

Таблица 2

Проверка однородности дисперсий для прижогов при принятом уровне значимости  $\alpha = 0,05$ 

Критерий	Расчетный уровень значимости $p$	Принятие $H_0$
Хартли, Кохрена, Барглетта	0,119	+
Левене	0,177	+
Брауна–Форсайта	0,221	+

Таблица 3

Проверка нормальности распределений  $H_0$  по критерию Шапиро–Уилка

Прижоги (1) по кругам, $i = \overline{1;4}$	$W_i$	Расчетный уровень значимости $p_i$	Принятие $H_{0i}$
$\Pi_1$	0,785	0,010	–
$\Pi_2$	0,928	0,432	–
<b><math>\Pi_3</math></b>	<b>0,944</b>	<b>0,595</b>	+
$\Pi_4$	0,910	0,284	–

( $i = 3$ ) наблюдения (2) аппроксимируются кривой нормального распределения с надежностью  $p_3 = 0,595$ . Наихудшие результаты предсказаны при шлифовании кругом из белого электрокорунда 25AF46L10V5KФ35 ( $i = 1$ ) с уровнем надежности  $p_1 = 0,010$ . Однако при этом только две детали из десяти (рис. 2, а) имеют прижоги, превышающие среднюю величину  $\Pi_{1\bullet} = 27,34\%$ . Из рис. 2 также видно, что по другим инструментам количество таких деталей возросло: для круга  $i = 3$  – до пяти, для кругов  $i = 2;4$  – до четырех

по каждому. При этом при шлифовании кругом 5A46L10VAX три детали характеризуются прижогами в пределах 70...90%.

По наблюдениям микротвердости установлено, что нормальность распределений подтверждена для шлифования кругами  $i = 1;2;4$ , а более строгое требование относительно гомогенности дисперсий нарушено в полном объеме. С учетом полученных результатов интерпретацию (2) по прижогам и микротвердостям ведем с привлечением непараметрического метода. Нормальный

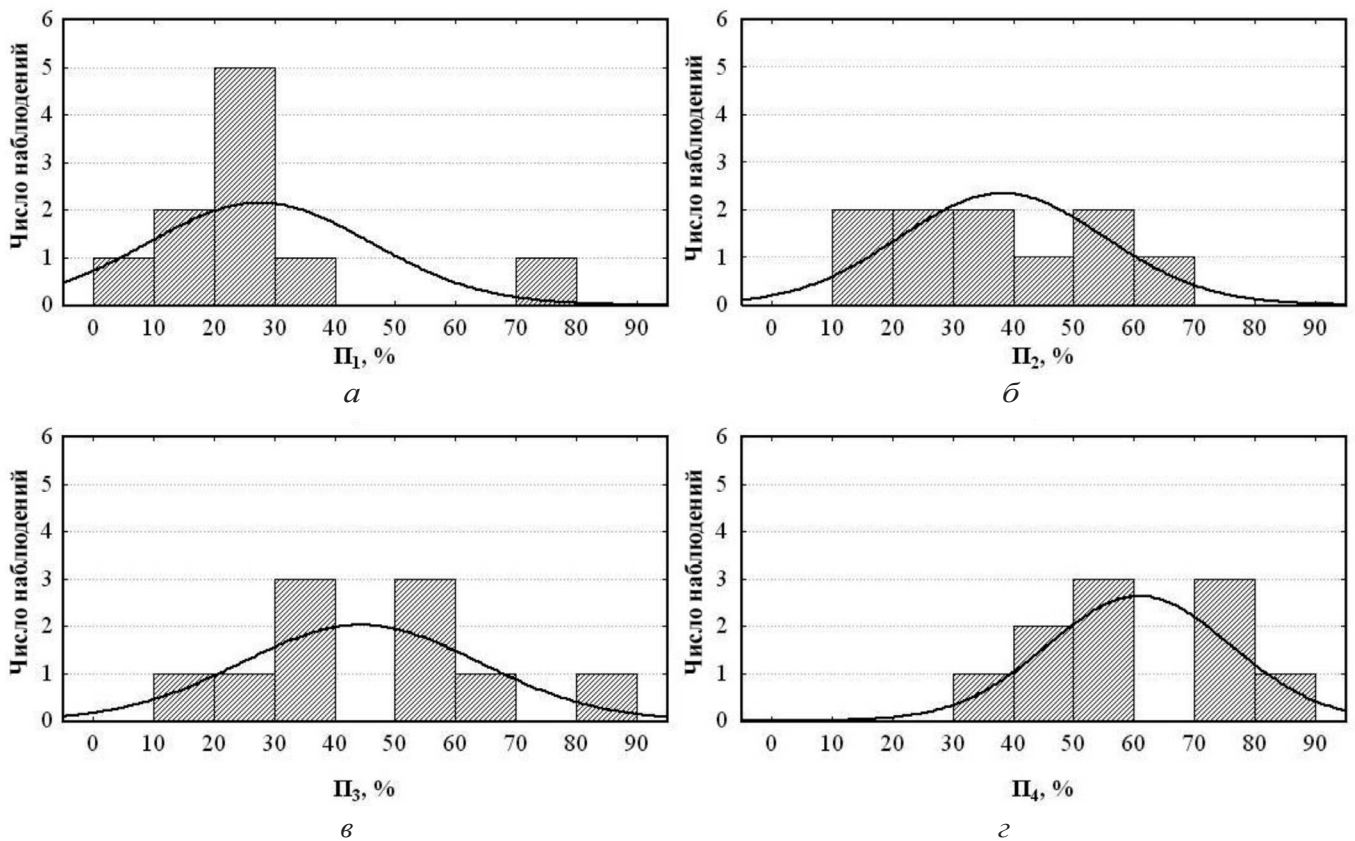


Рис. 2. Гистограммы с наложением кривых нормального распределения для параметра прижогов  $\Pi_i, i = \overline{1;4}$

аналог статистики приведен в качестве справочного с целью подтверждения его несостоятельности «на чужом поле» [19].

На рис. 3 представлены описательные статистики процентного содержания прижогов на базе параметрического (а) и непараметрического (б) методов статистики при шлифовании кругами  $i = \overline{1;4}$ . На них «квадратом» выделены меры положения: опытных средних  $\bar{\Pi}_i$  (а) и медиан  $\tilde{\Pi}_i$  (б). Остальные обозначения несут различную смысловую нагрузку. На рис. 3, а «прямоугольник» ограничивает рассеяние стандартов ошибки  $\pm SDE_i$ , «усики» – стандартов отклонений  $\pm SD_i$ ; на рис. 3, б – соответственно квартильные широты  $|y_{0,75} - y_{0,25}|_i$ , включающие 50 % наблюдений, и размахи  $R_i = |y_{\max} - y_{\min}|_i$ .

По результатам статистического анализа экспериментальных данных выявлено, что при плоском шлифовании деталей ВПК из электрокорунда белого ( $i = \overline{1;2}$ ) по критерию прижогов обладают преимуществами перед инструментами из монокорунда ( $i = \overline{3;4}$ ). При этом 75 % деталей при шлифовании ВПК 25AF46L10V5KФ35

имеют меньшие прижоги, чем 25 % деталей после шлифования кругами из монокристаллического корунда. Для ВПК  $i = 2$  сказанное выражено в меньшей мере и касается только круга 5А ( $i = 4$ ). Достоинства ВПК перед кругами из монокристаллического корунда обусловлены следующими закономерностями. Во-первых, радиусы округления зерен электрокорунда белого меньше, чем у зерен монокорунда. Они содержат большее количество острых вершин: 20 % – для 25А, 11 % – для зерен монокорунда [24]. В то же время зерна 25А имеют твердость по Моссу 9,03, а монокристаллического корунда – 9. Все это позволяет им легче внедряться в металл, снижает температуру шлифования и прижоги на поверхности деталей. Во-вторых, круги  $i = \overline{1;2}$  характеризуются высокопористой структурой, а инструменты из монокорунда – средней и открытой структурами. Сказанное при работе ВПК дополнительно приводит к снижению температуры резания и прижогов [25]. В-третьих, в каждой из групп: ВПК  $i = 1; 2$  и кругов из монокорунда  $i = 3; 4$  – инструменты  $i = 2$  и 4 имеют твердость на одну степень выше по сравнению с кругами  $i = 1$  и 3. По результатам эксперимента сниже-

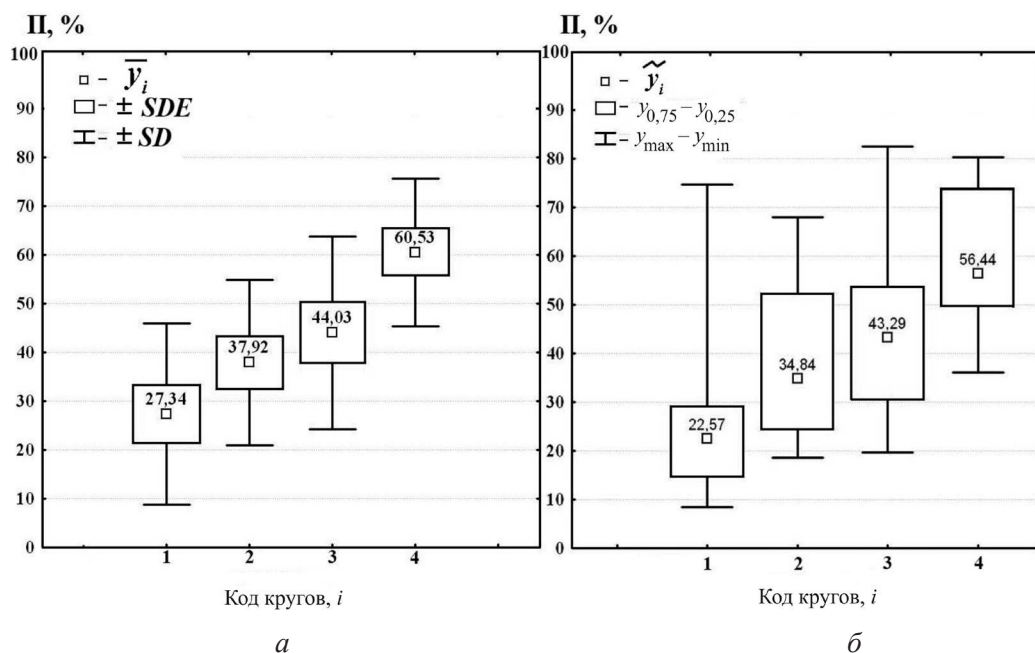


Рис. 3. Описательные параметрические (а) и непараметрические (б) для параметров  $\Pi_i, i = \overline{1; 4}$

ние твердости кругов даже в пределах каждой группы сопровождается уменьшением прижогов. Сказанное объясняется тем, что мостики связки, скрепляющие отдельные зерна, при резании упруго деформируются. У мягких кругов данный процесс протекает в большей степени, чем у твердых, содержащих повышенное количество связки. Это позволяет выступающим зернам в мягких кругах во время работы частично вдавливаясь в его «черепок». Тогда припуск снимается большим количеством равновыступающих абразивных зерен при меньшей толщине среза, в силу чего уменьшается интенсивность тепловых импульсов и температур в зоне шлифования [7]. Из рис. 3, а видно, что наименьшие стандарты ошибки имеютя при шлифовании прессованными кругами из монокорунда.

Рис. 4 иллюстрирует, что наибольшие величины опытных медиан микротвердостей соответствуют наименьшим прижогам деталей (см. рис. 3, б). Сказанное позволяет утверждать, что тепловой источник при шлифовании вызвал разупрочнение поверхностей (прижоги вторичного отпуска) закаленных деталей 40Х без вторичной закалки [3, 12, 13]. Полученные результаты позволяют констатировать, что предложенный метод количественной оценки прижогов с использованием цифровых технологий по мерам положения показал высокую адекватность и мо-

жет использоваться как в научных целях, так и в производственных условиях.

В табл. 4 представлены опытные и ожидаемые меры положения для прижогов и микротвердостей деталей, шлифованных исследуемыми кругами. По опытным коэффициентам  $K_{Mi}$  (3) выявлено, что кривые формы распределений для обоих выходных параметров процесса чаще характеризуются положительной асимметрией, так как в шести из восьми случаев они предсказаны меньше единицы. Наименьшая опытная медиана по прижогам и наибольшая по микротвердости получены при шлифовании ВПК 25AF46L10V5KФ35 ( $i = 1$ ) –  $\tilde{\Pi}_1 = 22,57\%$ ,  $\tilde{HV}_1 = 3910,70$  МПа, что позволяет рекомендовать его для шлифования закаленных деталей. Соответственно наихудшие результаты по состоянию поверхности имеютя при работе кругом 5A46L10VAX ( $i = 4$ ). В общем случае следует констатировать, что для кругов  $i = \overline{2; 4}$  опытные медианы  $\tilde{\Pi}_i$  монотонно возрастают по сравнению с базовым  $i = 1$ : в 1,54 раза для ВПК 25AF46M12V5ПО3 ( $i = 2$ ); в 1,92 раза – для круга ЕКЕ46K3V ( $i = 3$ ) и в 2,5 раза – для круга 5A46L10VAX ( $i = 4$ ). По опытным медианам микротвердостей перечисленные круги образуют соответственно убывающую последовательность от 3910,7 до 3167,48 МПа. По прогнозируемым мерам положения отмеченные тенденции выглядят менее убедительно, поскольку неко-



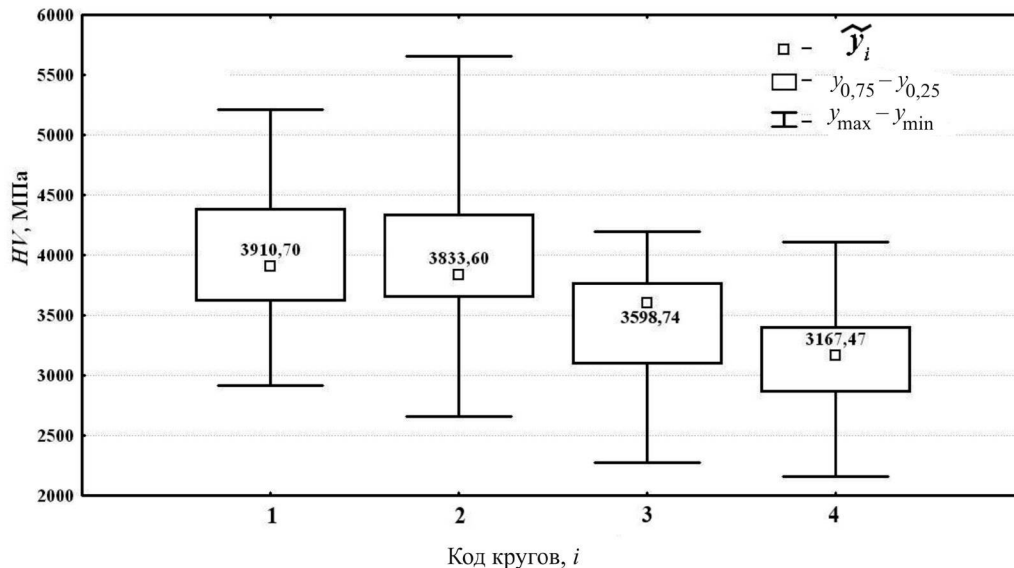


Рис. 4. Описательные непараметрические статистики для микротвердости шлифованных поверхностей

Таблица 4

Влияние кругов на меры положения и коэффициенты (3)–(6)

Параметр	Круги $i$	$y_i \bullet$	$\tilde{y}_i$	$y_i \bullet$	$m\hat{y}_i$	$K_{Mi}$ (3)	$\hat{K}_{Mi}$ (4)	$K_i$ (5)	$\hat{K}_i$ (6)
$\Pi_i$ , %	1	27,34	22,57	35,79	33,57	0,83	0,94	1,00	1,00
	2	37,92	34,84	37,43	39,29	0,92	1,05	1,54	1,17
	3	44,03	43,29	40,20	39,29	0,98	0,98	1,92	1,17
	4	60,53	56,44	55,61	44,86	0,93	0,81	2,50	1,34
$HV_i$ , МПа	1	3939,90	3910,70	3965,92	3872,15	0,99	0,98	1,00	1,00
	2	3991,93	3833,60	3965,92	3872,15	0,96	0,98	0,98	1,00
	3	3467,56	3598,74	3390,60	3383,11	1,04	1,00	0,92	0,87
	4	3159,75	3167,48	3236,70	3383,11	1,00	1,05	0,81	0,87

Примечание. Круги  $i$ : 1 – 25AF46L10V5KФ35; 2 – 25AF46M12V5ПО3; 3 – ЕКЕ46К3V; 4 – 5A46L10VAX.

торые из ожидаемых опорных значений представлены общими величинами. Равноценные режущие свойства кругов по ожидаемым мерам положения  $\Pi_i$  и  $HV_i$ ,  $i = \overline{1;4}$  оцениваются общими величинами. Как видно из табл. 4, они зависят от выходного параметра процесса. По прижогам к ним относятся круги  $i = 2;3$  ( $\Pi_i = 39,29\%$ ), а по микротвердостям – ВПК  $i = 1;2$  и круги из монокорунда  $i = 3;4$ , представленные двумя ожидаемыми медианами:  $HV_i = 3872,15$  МПа,  $i = \overline{1;2}$  и  $HV_i = 3383,11$  МПа,  $i = \overline{3;4}$ . Различие между коэффициентами (5) и (6) свидетельствует о целесообразности проведения второго этапа ОДА. Так, при шлифовании кругом  $i = 4$  получены коэффициенты по прижогам: 2,5 по (5) и 1,34 – по (6). Соответственно по микротвердостям имеем коэффициенты, равные 0,81 и 0,87.

В табл. 5 представлены результаты оценки стабильности образования прижогов и формирования микротвердости. По результатам ОДА и множественного анализа (2) предпочтение отдано квартильным широтам и полученным на их базе коэффициентам  $K_{cti3}$ ,  $i = \overline{1;4}$ . Выявлено, что наилучшая стабильность процесса по прижогам предсказана при шлифовании ВПК 25AF46L10V5KФ35 ( $i = 1$ ) –  $KШ_1 = 16,33\%$ , наихудшая – для ВПК 25AF46M12V5ПО3 ( $i = 2$ ) –  $KШ_2 = 30,70\%$ . Круги  $i = 4$  и  $i = 3$  последовательно занимают второе и третье место. Параметрический метод «на чужом поле» показал, что по стандартам отклонений и размахам наибольшая прецизионность процесса обеспечена при шлифовании кругом 5A46L10VAX ( $i = 4$ ) с коэффициентами стабильности  $K_{ct41} = 1,23$  и

## Оценка режущих способностей кругов по мерам рассеяния и коэффициентам стабильности (7)–(9)

Параметр	Круги $i$	$SD_i$	$R_i$	КШ $_i$	$K_{ctie}$		
					$e = 1$ (7)	$e = 2$ (8)	$e = 3$ (9)
$\Pi_p$ , %	1	18,58	66,36	16,33	1,00	1,00	1,00
	2	17,02	49,29	30,70	1,09	1,35	0,53
	3	19,73	62,91	27,73	0,94	1,06	0,59
	4	15,14	44,20	25,46	1,23	1,50	0,64
$HV_p$ , МПа	1	527,36	2301,45	766,28	1,00	1,00	1,00
	2	678,02	2997,95	741,87	0,78	0,77	1,03
	3	443,95	1921,50	670,70	1,19	1,20	1,14
	4	459,96	1951,75	553,59	1,15	1,18	1,38

Примечание. Круги  $i$ : 1 – 25AF46L10V5KF35; 2 – 25AF46M12V5ПО3; 3 – ЕКЕ46К3V; 4 – 5А46L10VAX.

$K_{ct42} = 1,5$ . По другим инструментам оценки по (7) и (8) разнятся: по стандартам отклонений – наименьшую прецизионность процесса имеет круг  $i = 3$ , а по размахам – ВПК  $i = 1$ . Сказанное относительно стабильности процесса по прижогам наглядно иллюстрирует рис. 3. По мерам рассеяния микротвердости оценки (7)–(9) в области наибольшей воспроизводимости процесса различаются между собой в меньшей мере, чем по прижогам: первую позицию по КШ $_i$  занимает круг  $i = 4$  с  $K_{ct43} = 1,38$ , а по  $SD_i$  и  $R_i$  – круг  $i = 3$ :  $K_{ct31} = 1,19$ ,  $K_{ct32} = 1,2$ . По КШ $_i$  вторая позиция отдана инструменту ЕКЕ46К3V, а по параметрическим мерам рассеяния – кругу 5А46L10VAX. При этом коэффициенты стабильности процесса по (7) и (8) для кругов  $i = 3; 4$  разнятся незначительно: для первого места  $K_{ct3e} = 1,19–1,2$ , а для второго  $K_{ct4e} = 1,15–1,18$ ,  $e = 1; 2$ , поэтому круги из монокорунда по стабильности микротвердости могут быть признаны равноценными. Третья позиция по (9) отдана ВПК  $i = 2$ , а четвертая – базовому кругу, хотя стабильность их работы практически совпадает. Параметрический метод статистики третье место предсказал для ВПК  $i = 1$ , за ним с большим отрывом находится ВПК  $i = 2$ . Следовательно, «на чужом поле» результаты стабильности процесса для параметрического метода оказались неточными и менее надежными, чем по КШ $_i$ . Сказанное по КШ $_i$  и  $R_i$  отражено на рис. 4.

Считаем, что точность измерений микротвердости выше по сравнению с прижогам. При этом дополнительно увеличен объем выборки с 10 до 30 опытов. В связи с изложенным окончательные выводы по стабильности работы кругов

целесообразно вести по КШ $_p$ , полученным для микротвердости. По результатам данного эксперимента метод поиска процентного содержания прижогов следует использовать для оценки мер положения и выявления физических явлений шлифования, протекающих в зоне резания.

### Выводы

1. Разработанная методика количественного контроля прижогов с использованием цифровых технологий включает в себя три этапа: макросъемку исходной поверхности в отраженных лучах света; ее оцифровку в программе *Adobe Photoshop CS6 13.1.2* и конвертирование в виде растровых изображений цветов с возможными оттенками не более 16. Ее положительными качествами являются: низкая трудоемкость, экологическая безопасность, возможность широкого использования в любых производственных условиях и, в конечном итоге, возможность количественной оценки интенсивности прижогов. Она апробирована при плоском шлифовании закаленных деталей из стали 40X и показала хорошую сходимость с результатами по микротвердости поверхности.

2. Возрастание прижогов, сопровождаемое снижением микротвердости поверхности, свидетельствует о том, что при шлифовании деталей доминирует тепловое разупрочнение поверхности без вторичной закалки.

3. Подтверждено, что для улучшения условий бесприжогового шлифования закаленных деталей целесообразно снижать степень твердости кругов.

4. Окончательные рекомендации по выбору кругов должны учитывать конструктивные особенности деталей и условия шлифования, поскольку оптимальные характеристики кругов по мерам положения и рассеяния различаются: по опорным величинам следует вести шлифование ВПК 25AF46L10V5KФ35, а по прецизионности процесса – кругами 5A46L10VAX и ЕКЕ46K3V.

5. Коэффициенты (4), (6)–(9) целесообразно использовать для уточнения моделей множественного дисперсионного анализа, применяемых при многокритериальном управлении процессом шлифования.

### Список литературы

1. Рудометов Ю.И. Применение абразивных инструментов, пропитанных суспензиями импрегнаторов // СТИН. – 2012. – № 11. – С. 34–37.
2. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
3. Лебедев В.Г., Клименко Н.Н., Аль-Аджейлат С.А. Механизм образования прижогов при шлифовании деталей из закаленных сталей // Наукові нотатки: міжвузівський збірник. – Луцьк, 2013. – Вып. 40. – С. 141–143.
4. Аль-Аджейлат С.А., Лебедев В.Г. Формирование прижогов отпуска при шлифовании направляющих тяжелых прессов кругами из КНБ // Проблемы техники. – 2007. – № 4. – С. 128–150.
5. Аль-Аджейлат С.А., Лебедев В.Г. Энергетические условия образования прижогов закалки при шлифовании направляющих тяжелых прессов кругами КНБ // Проблемы техники. – 2008. – № 1. – С. 130–152.
6. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов, С.Г. Бишутин, И.В. Говоров, А.О. Горленко, Д.И. Петрешин, В.И. Сакало, С.Ю. Съянов, В.П. Тихомиров, О.Н. Федонин, В.П. Федоров, Д.Н. Финатов, А.Н. Щербачков; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 318 с.
7. Эльянов В.Д., Куликов В.Н. Прижоги при шлифовании. – М.: НИИмаш, 1974. – 64 с.
8. ANSI/AGMA 2007-B92. Surface temper etch inspection after grinding. – [S. 1.]: [S. n.], 1992. – 14 p.
9. Способ выявления прижогов на металлах, например на титане и его сплавах, и вещество для его осуществления: патент 2044302 Российская Федерация: МПК<sup>8</sup> G 01 N 021/64 / М.Н. Медведев, Е.Н. Мельникова; патентообладатель Московский вечерний металлургический институт. – № 92015489/25; заявл. 30.12.1992; опубл. 20.09.1995.
10. Неразрушающий способ экспрессного выявления зон на поверхности металлических деталей со шлифовочными или эксплуатационными прижогами: патент 2407996 Российская Федерация: МПК G 01 L1/100 / Э.А. Кочаров, В.С. Олешко; заявитель и патентообладатель Э.А. Кочаров. – № 2008129897/28; заявл. 22.07.2010; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 36. – 9 с.
11. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – 5-е изд. – М.: Металлургия, 1983. – 527 с.
12. Суоминен Л. Обнаружение дефектов шлифования деталей из ферромагнитных материалов с использованием эффекта Баркгаузена // В мире неразрушающего контроля. – 2011. – № 2 (52). – С. 74–78.
13. Grinding process control using the magnetic Barkhausen noise method / В.А. Shaw, J.T. Evans, A.S. Wojtas, L. Suominen // Electromagnetic nondestructive evaluation (II): proceedings of the 3rd International Workshop on E'NDE, Reggio Calabria, Italy, September 1997. – Amsterdam: IOS Press, 1998. – P. 82–91.
14. Пальцева Ю.А., Бабошкин А.Ф. Методика получения трехмерной модели шероховатой поверхности // Инструмент и технологии. – 2006. – Вып. 1, № 23. – С. 135–140.
15. Справочник по конструкционным материалам / Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов и др. – М.: Изд-во МГТУ, 2006. – 640 с.
16. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю. Подходы к оценке опорной части поверхности шлифованных плоскостей титановых деталей абразивными кругами Norton // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 5 (307). – С. 142–150.
17. Солер Я.И., Лгалов В.В. Изучение микротвердости формообразующих деталей штамповой оснастки при абразивном шлифовании // Вестник ИрГТУ. – 2012. – № 7 (66). – С. 48–54.
18. Закс Л. Статистическое оценивание / пер. с нем. В. Н. Варыгина; науч. ред. и предисл. Ю.П. Адлера, В.Г. Горского. – М.: Статистика, 1976. – 598 с.
19. Холлендер М., Вулф Д. Непараметрические методы статистики / пер. с англ. Д.С. Шмерлинга; науч. ред. Ю.П. Адлера, Ю.Н. Тюрина. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 518 с.
20. ГОСТ Р ИСО 5725–2–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 2. Основной метод определения повторяемости воспроизводимости стандартного метода измерений. – Введен 2002–01–11. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 58 с.
21. Солер Я.И., Нгуен В.Л., Гуцол И.А. Прогнозирование микрогеометрии при маятниковом шлифовании плоских деталей из стали 13X15H4AM3 высокопористыми инструментами // Обработка металлов



(технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 2 (63). – С. 21–30.

22. Солер Я.И., Нгуен В.Л., Гуцол И.А. Статистические подходы к микрорельефу плоских деталей из закаленной стали 08X15H5Д2Т при маятниковом шлифовании высокопористыми кругами из кубического нитрида бора и синтеркорунда // Вестник ИрГТУ. – 2014. – № 4 (87). – С. 33–40.

23. Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu., Prokop'eva A.V. Optimizing the grinding of high-speed steel by wheels of

cubic boron nitride // Russian Engineering Research. – 2007. – Vol. 27, iss. 12. – P. 916–919. – doi: 10.3103/S1068798X07120180.

24. Носенко В.А., Носенко С.В. Технология шлифования металлов: монография. – Старый Оскол: ГИТ, 2013. – 616 с. – (Тонкие наукоемкие технологии).

25. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.

## OBRAOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1(66), January – March 2015, Pages 6–19

### Quantitative assessment of burns while flat grinding hardened parts made of steel 37Cr4 by abrasive wheels of different porosity

Soler Ya. I., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: solera@istu.irk.ru

Kazimirov D. Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kazimirov@fromru.com

Nguyen V. L., Ph.D. student, e-mail: nhatl007@gmail.com

National Research Irkutsk State Technical University, 83, Lermontov st., Irkutsk, 664074, Russian Federation

#### Abstract

A method for quantitative assessment of grinding burns is developed on the basis of digital technology. It is tested in conditions of pendulum grinding of hardened parts made of steel 37Khr4 by abrasive wheels of different porosity: 25AF46L10V5KF35 ( $i = 1$ ), 25AF46M12V5PO3 ( $i = 2$ ), EKE46K3V ( $i = 3$ ), 5A46L10VAX ( $i = 4$ ). Abrasive wheels with  $i = 1; 2$  relate to high-porous wheels, while the abrasive wheels with  $i = 3; 4$  are made of monocrystal carborundum and have standard porosity (producer – company *Dorfner schleifmittelwerk* (Germany)). To confirm the reliability of the proposed methodology for assessing burn marks a study of details microhardness is undertaken. In consideration of grinding stochastic character, statistical methods (particularly – rank): parametric and nonparametric are used to reduce the observations. They give opportunity to evaluate the reliability of decisions as well as the cuttability of wheels not only by the measures of position but by measures of dispersion. The second characteristic of the marginal frequency distribution is more important while grinding of critical parts on adapted machines with manual control for eliminating rejected probability. The statistical results have shown that in the infringements of homoscedasticity and normality of observations' allocation, the parametric method reduced to dislodgement of measures of position and confidence intervals. A correlation between measures of position for percent burn content and microhardness is established. Tool 25AF46L10V5KF35 grinding with regime:  $v_c = 35 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $s_1 = 7 \text{ m.min}^{-1}$ ,  $s_c = 1 \text{ mm.(d.s.)}^{-1}$ ,  $t = 0,015 \text{ mm}$ ,  $z = 0,15 \text{ mm}$  secures the greatest microhardness of parts made of steel 37Khr4 in the minimum burns. This investigation has shown that grinding parts by wheels <<Eqn068.wmf>> runs in the softening of their surfaces, but no re-hardening burn. The wheel  $i = 2$  with pore-forming П03 is probably used for decrease of rejected parts.

#### Keywords:

grinding, burns, assessment, microhardness, statistic, mean, median, measure of position, digital technology

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-6-19

#### References

1. Rudometov Yu.I. Primenenie abrazivnykh instrumentov, propitannykh suspenziyami impregntorov [Abrasive tools steeped in special suspensions]. *STIN – Russian Engineering Research*, 2012, no. 11, pp. 34–37. (In Russian)
2. Maslov E.N. *Teoriya shlifovaniya materialov* [Theory of materials grinding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 320 p.

3. Lebedev V.G., Klimenko N.N., Al'-Adzheilat S.A. [The mechanism of formation of burns in the grinding of hardened steel parts]. *Mizhvuzivs'kyj zbirnyk "Naukovi notatky"* [Interuniversity collection "Scientific Notes"], 2013, iss. 40, pp. 141–143.
4. Al'-Adzheilat S.A., Lebedev V.G. Formirovanie prizhgov otpuska pri shlifovanii napravlyayushchikh tyazhelykh pressov krugami iz KNB [Formation burn marks when grinding rails heavy presses by abrasive wheels CBN]. *Problemy tekhniki – Scientific and Industrial Journal*, 2007, no. 4, pp. 128–150.
5. Al'-Adzheilat S.A., Lebedev V.G. Energeticheskie usloviya obrazovaniya prizhgov zakalki pri shlifovanii napravlyayushchikh tyazhelykh pressov krugami KNB [Energy conditions for the formation of burn marks hardening when grinding rails heavy presses by abrasive wheels CBN]. *Problemy tekhniki – Problems Technology*, 2008, no. 1, pp. 130–152.
6. Suslov A.G., Bez'yazychnyi V.F., Panfilov Yu.V., Bishutin S.G., Govorov I.V., Gorlenko A.O., Petreshin D.I., Sakalo V.I., S'yanov S.Yu., Tikhomirov V.P., Fedonin O.N., Fedorov V.P., Finatov D.N., Shcherbakov A.N. *Inzheneriya poverkhnosti detalei* [Surface engineering details]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 318 p.
7. El'yanov V.D., Kulikov V.N. *Prizhogi pri shlifovanii* [Grinding burn marks]. Moscow, NIImash Publ., 1974. 64 p.
8. ANSI/AGMA 2007-B92. Surface temper etch inspection after grinding, 1992. 14 p.
9. Medvedev M.N., Mel'nikova E.N. *Sposob vyyavleniya prizhgov na metallakh, naprimer na titane i ego splavakh, i veshchestvo dlya ego osushchestvleniya* [A method of detecting burn marks on metals, such as titanium and its alloys, and a substance for its realization]. Patent RF, no. 2044302, 1995.
10. Kocharov E.A., Oleshko V.S. *Nerazrushayushchii sposob ekspresnogo vyyavleniya zon na poverkhnosti metallicheskih detalei so shlifovochnymi ili ekspluatatsionnymi prizhogami* [Non-destructive method of express identify areas on the surface of metal parts with grinding or operating burn marks]. Patent RF, no. 2407996, 2010.
11. Geller Yu.A. *Instrumental'nye stali* [Tool steels]. 5th ed. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 527 p.
12. Suominen L. Obnaruzhenie defektov shlifovaniya detalei iz ferro-magnitnykh materialov s ispol'zovaniem effekta Barkgauzena [Detecting grinding damage in gears with the barkhausen noise]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya – In the world of non-destructive testing*, 2011, no. 2 (52), pp. 74–78.
13. Shaw B.A., Evans J.T., Wojtas A.S., Suominen L. Grinding process control using the magnetic Barkhausen noise method. *Electromagnetic nondestructive evaluation (II)*. Proceedings of the 3rd International Workshop on E'NDE, Reggio Calabria, Italy, September 1997, Amsterdam, IOS Press, 1998, pp. 82–91.
14. Pal'tseva Yu.A., Baboshkin A.F. Metodika polucheniya trekhmernoj modeli sherokhovatoi poverkhnosti [Technique to obtain 3D model of a rough surface]. *Instrument i tekhnologii – Tools and Technology*, 2006, no. 23, iss. 1, pp. 135–140.
15. Arzamasov B.N., Solov'eva T.V., Gerasimov S.A. et al. *Spravochnik po konstruktsionnym materialam* [Handbook of structural materials]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 640 p.
16. Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu. Podkhody k otsenke opornoj chasti poverkhnosti shlifovannykh ploskostei titanovykh detalei abrazivnymi krugami Norton [Principles for the estimation of a bearing area of polished planes of titanium parts by abrasive wheels Norton]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii – Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2014, no. 5 (307), pp. 142–150.
17. Soler Ya.I., Lgalov V.V. Izuchenie mikrotverdosti formoobrazuyushchikh detalei shtampovoi osnastki pri abrazivnom shlifovanii [Study of shaping die tooling parts microhardness under abrasive grinding]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2012, no. 7 (66), pp. 48–54.
18. Sachs L. *Statistische Auswertungsmethoden*. Berlin, New York, Springer-Verlag, Heidelberg, 1972. 548 p. (Russ. ed.: Zaks L. *Statisticheskoe otsenivanie*. Trans. eng. Varygina V.N. Edited by Adler Yu.P., Gorskii V.G. Moscow, Statistika Publ., 1976. 598 p.).
19. Hollander M., Wolfe D.A. *Nonparametric Statistical Methods*. New York, John Wiley & Sons, 1973. 528 p. (Russ. ed.: Khollender M., Vulf D. *Neparametricheskie metody statistiki*. Trans. eng. Shmerling D.S. Edited by Adler Yu.P., Tiurin Yu.N. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1983. 518 p.).
20. GOST R ISO 5725–2–2002. *Tochnost' (pravil'nost' i pretsizionnost') metodov i rezul'tatov izmerenii. Ch. 2. Osnovnoi metod opredeleniya povtoryaemosti vosproizvodimosti standartnogo metoda izmerenii* [Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Pt. 2. Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method]. Moscow, Standartinform Publ., 2002. 58 p.
21. Soler Ya.I., Nguyen V.L., Gutsol I.A. Prognozirovaniye mikrogeometrii pri mayatnikovom shlifovanii ploskikh detalei iz stali 13Kh15N4AM3 vysokoporistymi instrumentami [Prediction of microgeometry in pendulous

grinding of plane parts made of steel 13X15H4AM3 by high porous wheels]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* – *Metal Working and Material Science*, 2014, no. 2 (63), pp. 21–30.

22. Soler Ya.I., Nguyen V.L., Gutsol I.A. Statisticheskie podkhody k mikrorel'efu ploskikh detalei iz zakalenoj stali 08Kh15N5D2T pri mayatnikovom shlifovanii vysokoporistymi krugami iz kubicheskogo nitrida bora i sinterkorunda [Statistical approaches to microrelief of flat parts made of hardened steel 08X15H4AM3 under pendulous grinding by high porous wheels made from cubic boron nitride and synthesis corundum]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2014, no. 4 (87), pp. 33–40.

23. Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu., Prokop'eva A.V. Optimizing the grinding of high-speed steel by wheels of cubic boron nitride. *Russian Engineering Research*, 2007, vol. 27, iss. 12, pp. 916–919. doi: 10.3103/S1068798X07120180

24. Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiya shlifovaniya metallov: monografiya* [Metal grinding technology]. Stary Oskol, TNT Publ., 2013. 616 p.

25. Starkov V.K. *Shlifovanie vysokoporistymi krugami* [Highly porous grinding wheels]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 688 p.

Received 20 January 2015

Revised 10 February 2015

Accepted 15 February 2015



# ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРОВ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ОДНОЦИКЛОВОМ ДОРНОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ

*В.Ф. СКВОРЦОВ, канд. техн. наук, доцент  
А.О. БОЗНАК, аспирант  
(ТПУ, Томск)*

Поступила 29 января 2015  
Рецензирование 10 февраля 2015  
Принята к печати 15 февраля 2015

**Скворцов В.Ф.** – 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
e-mail: TMRI@tpu.ru

Изложена методика и результаты экспериментального исследования методом Закса влияния длины обрабатываемых дорнованием толстостенных цилиндров из стали 50 с диаметром отверстий 5 мм, наружным диаметром 15 и 25 мм на формирующиеся в них остаточные напряжения. На основе анализа литературы отмечено, что это влияние может быть обусловлено как неравномерностью процесса дорнования по длине цилиндра, так и равенством нулю осевых остаточных напряжений на его торцах. Экспериментально установлено, что наиболее сильное влияние длина цилиндров оказывает на осевые остаточные напряжения. При натягах дорнования от 0,9 до 7,1 % с ее уменьшением с 40 до 10 мм наибольшие по абсолютной величине значения этих напряжений снижаются с 210 до 50 МПа. Показано, что при наружном диаметре цилиндров 15 мм их длина существенно сказывается и на окружных и радиальных остаточных напряжениях. При указанном выше уменьшении длины цилиндров окружные и радиальные остаточные напряжения в прилегающей к отверстию области в зависимости от натяга дорнования по абсолютной величине как возрастают (соответственно с –135 до –205 МПа и с –45 до 55 МПа при натяге 7,1 %), снижаются (соответственно с –315 до –235 МПа и с –135 до –95 МПа при натяге 0,9 %), так и сохраняются практически неизменными (при натяге 3,4 %). При наружном диаметре цилиндров 25 мм влияние их длины на окружные и радиальные остаточные напряжения оказывается слабым.

**Ключевые слова:** дорнование отверстий, длина толстостенных цилиндров, остаточные напряжения.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-20-26

## Введение

Дорнование является эффективным методом обработки отверстий в деталях типа полых цилиндров [1–3]. Его используют при диаметре отверстий  $d = 1 \dots 150$  мм и их относительной глубине  $L/d \leq 100$  [4, 5].

Дорнование отверстий сопровождается формированием в полых цилиндрах значительных остаточных напряжений [1, 3, 6]. (Под этими напряжениями далее, как обычно, будем понимать их средние по длине цилиндра значения.)

Остаточные напряжения, как показали исследования [6, 8–10], главным образом определяются натягом и числом циклов дорнования, механическими свойствами материала цилиндров и степенью их толстостенности, характеризуемой отношением  $D/d$  ( $D$  – наружный диаметр цилиндра). При степени толстостенности цилиндров  $D/d \leq 3$  у поверхности отверстия могут формироваться как сжимающие, так и растягивающие окружные остаточные напряжения [6, 8, 11]. Влияние схемы дорнования отверстий в полых цилиндрах (растяжения, сжатия) на остаточные

напряжения является сравнительно слабым [12]. По абсолютной величине остаточные напряжения в обработанных дорнованием полых цилиндрах могут быть близки к пределу текучести  $\sigma_{0,2}$  их материала [6, 7]. Установлено [6, 8], что для получения у поверхности отверстия цилиндров благоприятных сжимающих окружных остаточных напряжений, способствующих повышению эксплуатационных свойств цилиндров, последний цикл дорнования необходимо выполнять с малым натягом (около  $0,01d$ ).

Существенное влияние на остаточные напряжения в обработанных дорнованием толстостенных цилиндрах может оказывать их длина. С уменьшением длины цилиндров процесс дорнования становится все менее равномерным, так как все большую долю от этой длины составляет протяженность участков входа и выхода дорна из отверстия, на которых преобладает течение металла в осевом направлении [1, 4]. В связи с этим следует ожидать зависимости всех компонентов остаточных напряжений в обработанных дорнованием цилиндрах от их длины. Кроме того, поскольку на торцах цилиндров осевые остаточные напряжения всегда обращаются в ноль, то с уменьшением длины цилиндров эти напряжения по абсолютной величине снижаются [13, 14]. При этом несколько изменяются и окружные остаточные напряжения [13]. Вместе с тем, как показал анализ указанной выше литературы, экспериментально влияние длины полых цилиндров на формирующиеся в них при дорновании отверстий остаточные напряжения не изучено. Это в известной мере ограничивает применение дорнования при изготовлении полых цилиндров различной длины.

Цель работы – экспериментально исследовать влияние длины толстостенных цилиндров на остаточные напряжения, формирующиеся в них при одноцикловом дорновании отверстий.

### Методика исследования

Эксперименты проводили на образцах из стали 50 (НВ 2170...2290 МПа,  $\sigma_{0,2} \approx 470$  МПа) с диаметром отверстий  $d = 5$  мм. Наружный диаметр образцов  $D$  составлял 15 мм ( $D/d = 3$ ) и 25 мм ( $D/d = 5$ ). Длина образцов  $L$  была принята равной 10 и 40 мм. Отверстия в них получали сверлением спиральными сверлами на то-

карном станке, затем их развертывали ручными развертками. Дорнование отверстий выполняли на испытательной машине УМЭ-10ТМ с помощью специального приспособления [5] по схеме сжатия. При этом использовали однозубые дорны из твердого сплава ВК8 с углами рабочего и обратного конусов  $6^\circ$  и шириной соединяющей их цилиндрической ленточки 3 мм. Относительные натяги дорнования  $a/d$  составляли 0,9; 3,4 и 7,1 %. В качестве смазочного материала при дорновании применяли жидкость МР-7. Скорость дорнования отверстий была равной 0,008 м/с. После дорнования отверстий для обеспечения необходимой точности наружную поверхность образцов и их торцы подвергали тонкому шлифованию. В каждом эксперименте использовали по три образца.

Остаточные напряжения определяли методом Закса [14, 15] с использованием формул И.А. Биргера [14]. В соответствии с этим методом с внутренней поверхности образцов на электроэрозионном проволочно-вырезном станке с ЧПУ модели ДК 7725 (КНР) последовательно удаляли слои металла толщиной не менее 0,7 мм и измеряли возникающие при этом изменения их наружного диаметра и длины. Измерение диаметров наружной поверхности образцов выполняли на ультраоптиметре фирмы «Carl Zeiss Jena» (ФРГ) с ценой деления 0,0002 мм. Длину образцов измеряли с помощью микрокатера с ценой деления 0,0005 мм, закрепленного в стойке. Диаметры наружной поверхности образцов длиной 40 мм определяли в трех поперечных сечениях – в среднем по длине и расположенных на расстояниях 2 мм от торцов образцов. У образцов длиной 10 мм диаметры наружной поверхности измеряли только в двух сечениях, отстоящих от их торцов на 2 мм. Диаметр наружной поверхности образца принимали равным среднему из его измеренных значений. Длину образца считали равной средней из ее двух предельных значений, найденных при измерении.

На рис. 1 в качестве примера приведены зависимости изменений наружного диаметра  $\Delta D$  и длины  $\Delta L$  образцов ( $D=15$  мм) от радиуса их внутренней поверхности (около средних значений указаны 95-процентные доверительные интервалы). Эти и другие аналогичные зависимости (для образцов с  $D = 25$  мм) аппроксимировали с помощью программы *Statistica 8* прямыми и по-

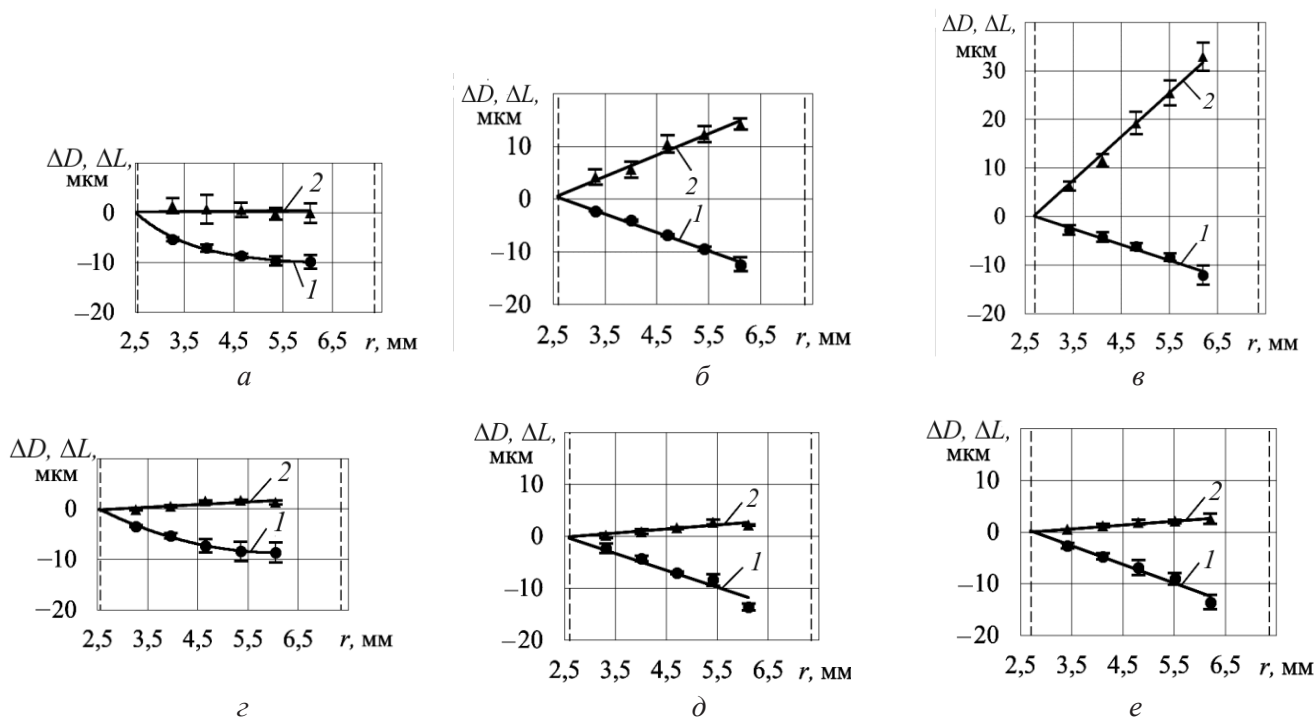


Рис. 1. Зависимости изменения наружного диаметра (1) и длины (2) обработанных дорнованием образцов с  $D = 15$  мм от радиуса их внутренней поверхности:

$a - a/d = 0,9 \%$ ,  $L = 40$  мм;  $b - a/d = 3,4 \%$ ,  $L = 40$  мм;  $в - a/d = 7,1 \%$ ,  $L = 40$  мм;  $г - a/d = 0,9 \%$ ,  $L = 0$  мм;  $д - a/d = 3,4 \%$ ,  $L = 10$  мм;  $e - a/d = ,1 \%$ ,  $L = 10$  мм. Пунктирными линиями показаны поверхности отверстия и наружные поверхности образцов

линомами 2-й степени, уравнения которых затем использовали для расчетов остаточных напряжений. При их проведении принимали модуль упругости  $E = 2 \times 10^5$  МПа, коэффициент Пуансона  $\mu = 0,3$ . Расчеты выполняли с использованием *Microsoft Excel 2013*.

## Результаты и обсуждение

Распределение окружных  $\sigma_\theta$ , радиальных  $\sigma_r$  и осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений вдоль радиуса  $r$  обработанных дорнованием образцов (эпюры напряжений), показано на рис. 2 ( $D = 15$  мм) и рис. 3 ( $D = 25$  мм). Видно, что во всех исследованных случаях окружные остаточные напряжения у отверстия являются сжимающими, а у наружной поверхности образцов – растягивающими. Радиальные остаточные напряжения равны нулю на поверхности отверстия и наружной поверхности образцов и являются сжимающими в остальной их области. Распределение осевых остаточных напряжений вдоль радиуса образцов является более сложным. В образцах с  $D = 15$  мм длиной  $L = 40$  мм в области, прилегающей к отверстию, осевые остаточные напряжения при натяге 0,9 % оказываются сжимающими (рис.

2, а), а при натягах 3,4 и 7,1 % – растягивающими (рис. 2, б и в). В образцах с  $D = 25$  мм в этой области при всех использованных натягах имеют место сжимающие осевые остаточные напряжения (рис. 3). Как видно из рис. 2 и 3, осевые остаточные напряжения у отверстия образцов уравниваются одноименными напряжениями противоположного знака у их наружной поверхности. Наибольшими по абсолютной величине являются окружные остаточные напряжения, которые в образцах с  $D = 25$  мм (см. рис. 3) близки к пределу текучести  $\sigma_{0,2}$  их материала.

Длина образцов, как показали исследования, наибольшее влияние оказывает на осевые остаточные напряжения. С уменьшением длины образцов обеих степеней толстостенности с 40 до 10 мм осевые остаточные напряжения снижаются по абсолютной величине до значений, не превышающих 50 МПа (рис. 2 и 3). Так, в образцах с  $D = 15$  мм, обработанных с натягом 0,9 %, эти напряжения у отверстия изменяются от –135 МПа (рис. 2, а) до –40 МПа (рис. 2, г), а обработанных с натягом 7,1 % – с 210 МПа (рис. 2, в) до значений, практически равных нулю (рис. 2, е). В образцах с  $D = 25$  мм, подвергнутых дорнованию с



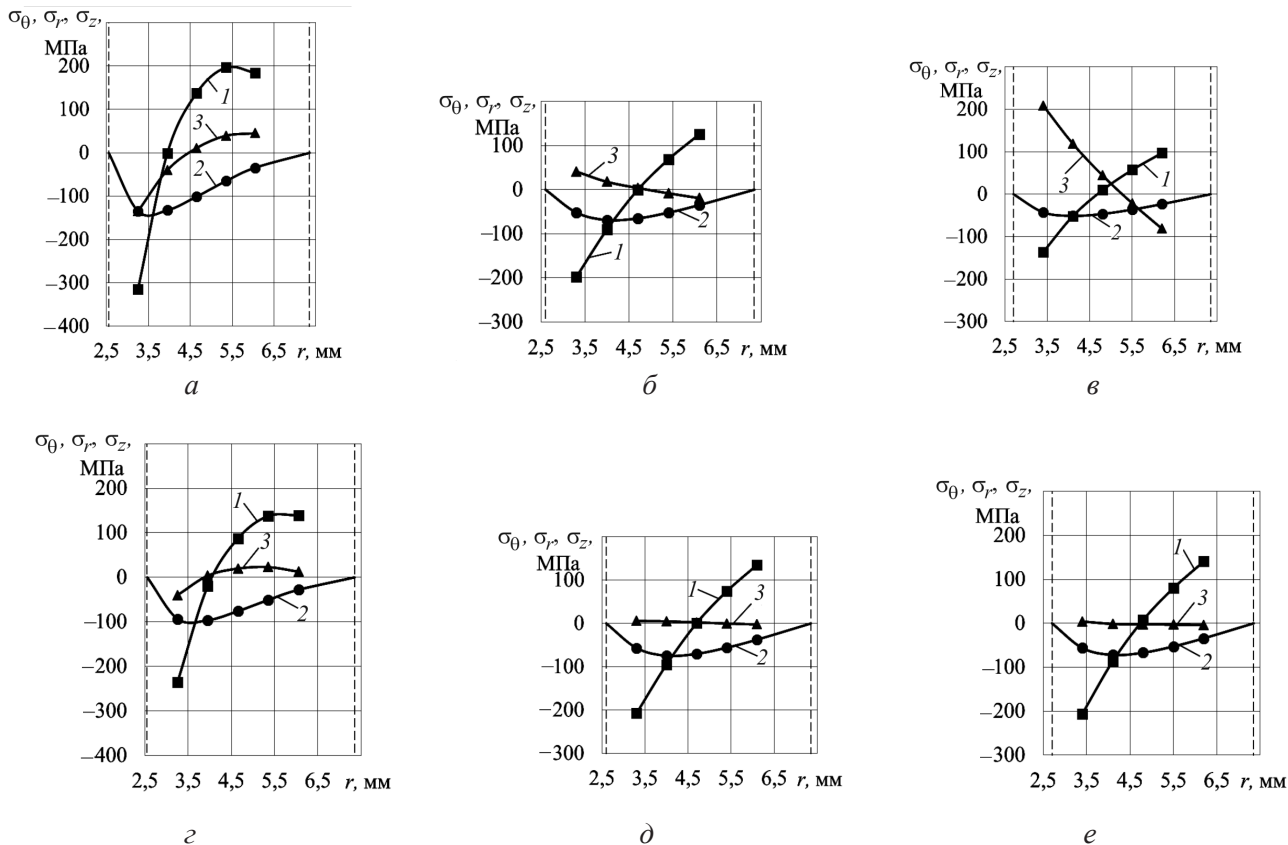


Рис. 2. Эпюры окружных (1), радиальных (2) и осевых (3) остаточных напряжений в обработанных дорнованием образцах с  $D = 15$  мм:

$a - a/d = 0,9 \%$ ,  $L = 40$  мм;  $b - a/d = 3,4 \%$ ,  $L = 40$  мм;  $в - a/d = 7,1 \%$ ,  $L = 40$  мм;  $г - a/d = 0,9 \%$ ,  $L = 0$  мм;  $д - a/d = 3,4 \%$ ,  $L = 10$  мм;  $е - a/d = 7,1 \%$ ,  $L = 10$  мм. Пунктирными линиями показаны поверхности отверстия и наружные поверхности образцов

натягами 3,4 и 7,1 %, осевые остаточные напряжения у отверстия изменяются соответственно с  $-190$  МПа (рис. 3, *a*) до  $-50$  МПа (рис. 3, *в*) и с  $-75$  МПа (рис. 3, *б*) до  $-10$  МПа (рис. 3, *г*).

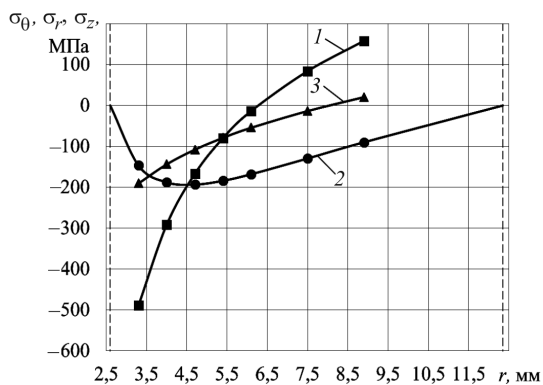
При наружном диаметре образцов  $D = 15$  мм их длина заметное влияние оказывает и на окружные и радиальные остаточные напряжения (см. рис. 2). В зависимости от натяга дорнования при уменьшении длины этих образцов с 40 до 10 мм окружные и радиальные остаточные напряжения могут снижаться, возрастать или оставаться практически неизменными. Действительно, при натяге дорнования 0,9 % окружные и радиальные остаточные напряжения у отверстия снижаются по абсолютной величине соответственно с  $-315$  МПа до  $-235$  МПа и с  $-135$  МПа до  $-95$  МПа (рис. 2, *a* и *г*), при натяге дорнования 3,4 % эти напряжения практически не изменяются (рис. 2, *б* и *д*), при натяге дорнования 7,1 % они возрастают по абсолютной величине соответственно с  $-135$  МПа до  $-205$  МПа и с  $-45$  МПа до  $-55$  МПа (рис. 2, *в* и *е*).

Влияние длины образцов с наружным диаметром  $D = 25$  мм на окружные и радиальные остаточные напряжения оказывается слабым (см. рис. 3).

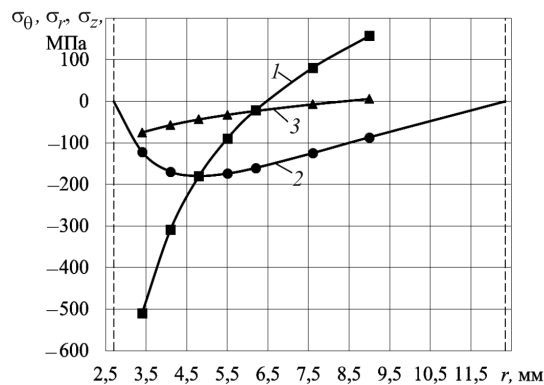
### Выводы

1. Наиболее сильное влияние длина обрабатываемых дорнованием полых цилиндров оказывает на осевые остаточные напряжения. При уменьшении длины цилиндров из стали 50 (диаметр отверстия 5 мм, наружный диаметр 15 и 25 мм, натяги дорнования от 0,9 до 7,1 %) с 40 до 10 мм наибольшие по абсолютной величине значения осевых остаточных напряжений снижаются с 210 до 50 МПа.

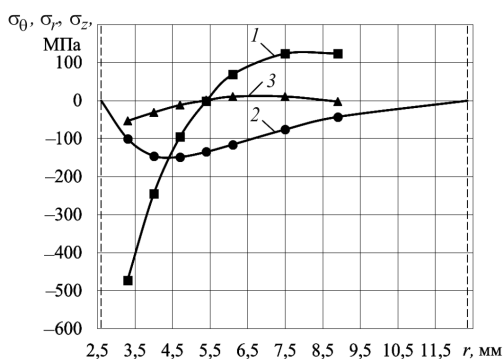
2. При наружном диаметре цилиндров 15 мм их длина существенно сказывается и на окружных и радиальных остаточных напряжениях. При указанном выше уменьшении длины цилиндров окружные и радиальные остаточные напряжения у отверстия в зависимости от натяга дорнования по абсолютной величине как воз-



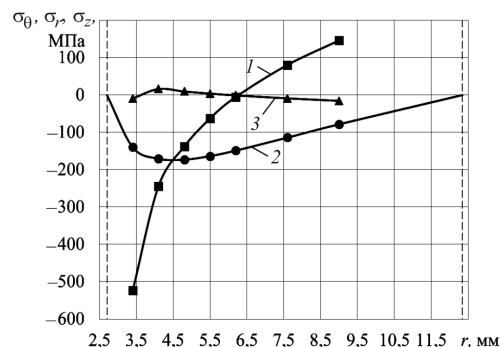
а



б



в



г

Рис. 3. Эпюры окружных (1), радиальных (2) и осевых (3) остаточных напряжений в обработанных дорнованием образцах с  $D = 25$  мм:

а –  $a/d = 3,4$  %,  $L = 40$  мм; б –  $a/d = 7,1$  %,  $L = 40$  мм; в –  $a/d = 3,4$  %,  $L = 10$  мм; г –  $a/d = 7,1$  %,  $L = 10$  мм  
 Пунктирными линиями показаны поверхности отверстия и наружные поверхности образцов

растают (соответственно с  $-135$  до  $-205$  МПа и с  $-45$  до  $55$  МПа при натяге  $7,1$  %), снижаются (соответственно с  $-315$  до  $-235$  МПа и с  $-135$  до  $-95$  МПа при натяге  $0,9$  %), так и сохраняются практически неизменными (при натяге  $3,4$  %). Влияние длины образцов с наружным диаметром  $25$  мм на эти напряжения является слабым.

### Список литературы

1. Проскуряков Ю.Г. Дорнование отверстий. – Свердловск: Машгиз, 1961. – 192 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т.: т. 2 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 943 с.
3. Монченко В.П. Эффективная технология производства полых цилиндров. – М.: Машиностроение, 1980. – 248 с.
4. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.

5. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. – 2012. – № 2. – С. 1–24.
6. Качество поверхности, обработанной деформирующим протягиванием / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, Э.И. Гриценко, Э.К. Посвятенко. – Киев: Наукова думка, 1977. – 187 с.
7. Проскуряков Ю.Г., Романов В.Н., Исаев А.Н. Объемное дорнование отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
8. Остаточные напряжения и точность деталей, обработанных дорнованием / Ю.Г. Проскуряков, А.Н. Исаев, Л.В. Попов, Ф.Ф. Валяев // Вестник машиностроения. – 1973. – № 7. – С. 57–60.
9. Эффективные технологии дорнования, протягивания и деформирующе-режущей обработки / С.К. Амбросимов, А.Н. Афонин, А.Р. Ингеманссон, А.Н. Исаев, А.В. Киричек, Д.В. Крайнев, А.Р. Лебедев, В.Ф. Макаров, А.В. Морозова, П.А. Норченко, Ю.Н. Полянчиков, Д.Л. Соловьев; под ред. А.В. Киричека. – М.: Спектр, 2011. – 327 с.
10. Скворцов В.Ф., Охотин И.С., Арляпов А.Ю. Остаточные напряжения при дорновании отверстий

малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах с большими натягами // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, № 2. – С. 24–27.

11. Экспериментальная оценка остаточных напряжений, формирующихся в толстостенных заготовках при одноцикловом дорновании с большими натягами / В.Ф. Скворцов, М.Г. Гольдшмидт, М.М. Шульгин, В.С. Федотов // Современные проблемы машиностроения: сборник научных трудов VII Международной научно-технической конференции, г. Томск, 11–13 ноября 2013 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 357–361.

12. Остаточные напряжения при дорновании отверстий в толстостенных цилиндрах по схемам сжа-

тия и растяжения / В.Ф. Скворцов, Р.С. Цыганков, А.О. Бознак, В.С. Федотов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 3 (64). – С. 45–50.

13. Кобрин М.М., Дехтярь Л.И. Определение внутренних напряжений в цилиндрических деталях. – М.: Машиностроение, 1965. – 175 с.

14. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.

15. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1989. – 254 с.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1(66), January – March 2015, Pages 20–26

### The effect of length of thick-walled cylinders on the residual stresses generated during the single-cycle mandrelling

Skvortsov V.F., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: TMRI@tpu.ru

Boznak A.O., Ph.D. student, e-mail: boznakao@gmail.com

National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

#### Abstract

The methodology and results of experimental study by Sachs method of the effect of length of mandrelled thick-walled steel (0.5 % C) cylinders with inner diameter of 5 mm, outer diameter of 15 and 25 mm on residual stresses are studied. It is shown that such effect can take place both due to the uneven process of mandrelling along the cylinder length, and due to zero axial residual stresses on its ends. It is found that the length of cylinders has the strongest influence on axial residual stresses. With allowances between 1.9 and 13,7 % and length reduction from 40 to 10 mm, the largest absolute value of axial residual stresses decreases from 210 to 50 MPa. It is noted that when the outer diameter of cylinders is 15 mm its length significantly influence on both hoop and radial residual stresses. With the above-mentioned reduction in cylinders length, absolute values of hoop and radial residual stress in the region adjacent to the hole, depending on the mandrelling allowance, can increase (from -135 to -205 MPa and from -45 to 55 MPa respectively with 7,1 % allowance), decrease (from -315 to -235 MPa and from -135 to -95 MPa respectively with 0.9 % allowance) and remain almost unchanged (with 3,4 % allowance). The effect of length on these stresses is weak when the outer diameter of cylinders is 25 mm.

#### Keywords:

mandrelling, length of thick-walled cylinders, residual stresses.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-20-26

#### References

1. Proskuryakov Yu.G. *Dornovanie otverstii* [Mandrelling holes]. Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1961. 192 p.
2. Dal'skii A.M., Suslov A.G., Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya*. V 2 t. T. 2. [The handbook of technologist-machine engineer. In 2 vol. Vol. 2]. 5<sup>th</sup> ed., corrected. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2003. 943 p.
3. Monchenko V.P. *Effektivnaya tekhnologiya proizvodstva polykh tsilindrov* [Effective technology for the production of hollow cylinders]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 248 p.



4. Rozenberg A.M., Rozenberg O.A. *Mekhanika plasticheskogo deformirovaniya v protsessakh rezaniya i deformiruyushchego protyagivaniya* [Mechanics of plastic deformation in the process of cutting and pulling the deforming]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990. 320 p.
5. Skvortsov V.F., Arlyapov A.Yu., Okhotin I.S. Dornovanie glubokikh otverstii malogo diametra [Small diameter deep hole mandrelling]. *SPRAVOCHNIK. Inzhenernyi zhurnal – HANDBOOK. An Engineering Journal*, 2012, no. 2, supplement, pp. 1–24.
6. Rozenberg A.M., Rozenberg O.A., Gritsenko E.I., Posvyatenko E.K. *Kachestvo poverkhnosti, obrabotannoi deformiruyushchim protyagivaniem* [Quality of treated surface deforming pulling]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1977. 187 p.
7. Proskuryakov Yu.G., Romanov V.N., Isaev A.N. *Ob "emnoe dornovanie otverstii* [Volume mandrelling holes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 224 p.
8. Proskuryakov Yu.G., Isaev A.N., Popov L.V., Valyaev F.F. Ostatochnye napryazheniya i tochnost' detalei, obrabotannykh dornovaniem [Residual stresses and accuracy parts treated mandrelling]. *Vestnik Mashinostroeniya – Russian Engineering Research*, 1973, no. 7, pp. 57–60. (In Russian)
9. Ambrosimov S.K., Afonin A.N., Ingemansson A.R., Isaev A.N., Kirichek A.V., Krainev D.V., Lebedev A.R., Makarov V.F., Morozova A.V., Norchenko P.A., Polyanchikov Yu.N., Solov'ev D.L. *Effektivnye tekhnologii dornovaniya, protyagivaniya i deformiruyushche-rezhushchei obrabotki* [Effective technologies of burnishing, stretching and deforming-cutting machining]. Moscow, Spektr Publ., 2011. 327 p.
10. Skvortsov V.F., Okhotin I.S., Arlyapov A.Yu. Ostatochnye napryazheniya pri dornovanii otverstii malogo diametra s bol'shimi natyagami [Residual stresses at pin hole mandrelling in hollow thick-walled cylinder with at great tensions]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, Vol. 316, no. 2, pp. 24–27. (In Russian)
11. Skvortsov V.F., Gol'dshmidt M.G., Shul'gin M.M., Fedotov V.S. [Experimental evaluation of residual stresses in thick-walled workpieces formed with single-cycle burnishing with big tightness]. *Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Sovremennye problemy mashinostroeniya"* [Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference "Modern Problems of Engineering"]. Tomsk, TPU Publ., 2013, pp. 357–361.
12. Skvortsov V.F., Tsygankov R.S., Boznak A.O., Fedotov V.S. Ostatochnye napryazheniya pri dornovanii otverstii v tolstostennykh tsilindrakh po skhemam szhatiya i rastyazheniya [Residual stresses in compression and tension mandrelling of thick-walled cylinders]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 3 (64), pp. 45–50.
13. Kobrin M.M., Dekhtyar' L.I. *Opredelenie vnutrennikh napryazhenii v tsilindricheskikh detalyakh* [Determination of internal stress in cylindrical parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965. 175 p.
14. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual Stresses]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963. 232 p.
15. Vishnyakov Ya.D., Piskarev V.D. *Upravlenie ostatochnymi napryazheniyami v metallakh i splavakh* [Control residual stresses in metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989. 254 p.

Received 29 January 2015

Revised 10 February 2015

Accepted 15 February 2015

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ НА ТОЛЩИНУ СПЕЧЕННОГО СЛОЯ ПОРОШКА DSK-F75

*Н.А. САПРЫКИНА, канд. техн. наук, доцент  
(ЮТИ НИТПУ, г. Юрга)*

Поступила 26 января 2015

Рецензирование 10 февраля 2015

Принята к печати 15 февраля 2015

**Сапрыкина Н.А.** – 652055, г. Юрга, Кемеровская обл., ул. Ленинградская, 26,  
Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского Томского  
политехнического университета,  
e-mail: nat\_anat\_sapr@mail.ru

В современной экономике для сокращения сроков выпуска нового изделия на этапах проектирования и изготовления применяют технологии послойного лазерного спекания. Развитие технологии идет по пути внедрения новых порошковых материалов и определения рациональных технологических режимов формирования поверхностного слоя заданного качества. Создание функционального изделия возможно только в определенном диапазоне лазерного воздействия, который подбирается экспериментально для порошкового материала, на точность изделия большое влияние оказывает толщина слоя. В работе представлены результаты экспериментальных исследований воздействия технологических режимов спекания порошкового материала (мощности лазерного излучения, скорости перемещения луча лазера, шага сканирования, предварительной температуры подогрева) на толщину спеченного слоя из кобальтхроммолибденового порошка DSK-F75. Исследования проводились на технологическом лазерном комплексе формирования поверхностей деталей сложной пространственной формы. Толщина спеченного слоя определялась по специально разработанной методике с применением инструментального цифрового микроскопа. Получена математическая зависимость толщины спеченного поверхностного слоя от режимов спекания кобальтхроммолибденового порошка на основе теории планирования эксперимента и статической обработки результатов, позволяющая выявить значимые параметры. По математической зависимости построены графики с наложением экспериментальных значений толщины спеченного слоя в зависимости от режимов спекания. Анализ графических зависимостей позволяет выявить значимые параметры режима - мощность лазерного излучения, скорость перемещения луча лазера, шаг сканирования, влияющие на толщину спеченного слоя, а также пределы ее изменения с 0,65 до 1 мм за счет увеличения мощности лазера с 10 до 20 Вт; с 0,65 до 0,88 мм за счет уменьшения скорости перемещения луча лазера с 300 до 100 мм/мин; с 0,9 до 1,27 мм за счет уменьшения шага сканирования с 0,15 до 0,1 мм; с 0,88 до 0,91 мм за счет увеличения температуры подогрева порошкового материала с 26 до 200 °С.

**Ключевые слова:** послойное лазерное спекание, режимы спекания, толщина спеченного слоя, порошковый материал.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-27-32

## Введение

В современном производстве самым перспективным и быстрорастущим сектором является сектор аддитивных технологий, ежегодный прирост рынка превышает 25 %. По данным аналитиков, к 2020 году он вырастет до 12 млрд долларов США [1, 2]. Одной из интенсивно развива-

ющихся технологий аддитивного производства изделий является технология послойного лазерного спекания металлических порошков [3]. Применение данной технологии позволяет сократить сроки выпуска нового изделия на этапах проектирования и изготовления. Для создания изделий применяется порошковый материал, послойно спеченный лучом лазера на основе 3D

CAD-модели [4, 5]. Наряду с преимуществами данной технологии выявлено, что получаемое качество изделий на установках быстрого прототипирования в ряде случаев не соответствует целям изготовления даже с рекомендуемым порошком и на заданных режимах спекания для конкретной установки.

Развитие технологии идет по пути внедрения новых порошковых материалов и определения рациональных технологических режимов формирования поверхностного слоя заданного качества, улучшения физико-механических свойств изделий, повышения качества и точности формируемых изделий [6, 7]. Создание функционального изделия возможно только в определенном диапазоне лазерного воздействия, который подбирается экспериментально для нового порошкового материала, а на точность прототипа значительное влияние оказывает толщина слоя [8, 9, 10].

Определение значений толщины единичного спеченного слоя является сложной задачей. Если спеченный слой имеет недостаточную толщину, то возникают сложности с нанесением следующего слоя порошка из-за возможности разрушения предыдущего. Увеличение толщины слоя наносимого порошка приводит к расслоению изделия после спекания [11]. Толщина слоя оказывает влияние и на качество боковой поверхности, имеющей ступенчатый вид. Высота каждой ступеньки примерно равна толщине спеченного слоя. Режимы спекания необходимо назначать таким образом, чтобы изделие получилось требуемых размеров в пределах допуска заданного качества. Необходимо знать толщину спеченного единичного слоя и при рассечении CAD-модели на слои. В патенте на изобретение 2262741 РФ [12] предложен метод высокой точности разбиения виртуальной объемной модели будущего изделия на слои, толщиной меньше поля допуска на номинальный профиль поверхности модели, при этом номинальный профиль поверхности модели проходит через среднюю линию поперечных слоев, и получают фактический профиль. Толщина слоя назначается в диапазоне

$$Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max}, \quad (1)$$

где  $Z_{\min}$  и  $Z_{\max}$  – минимальная и максимальная толщина слоя соответственно, которую можно получить на технологическом оборудовании.

Целью данной работы является установление пределов, в которых можно изменять толщину  $Z$  спеченного поверхностного слоя из кобальт-хроммолибденового порошка за счет изменения технологических режимов лазерной обработки.

### Методика экспериментального исследования

Эксперименты проводились по лазерному спеканию кобальтхроммолибденового порошка DSK-F75. Химический состав порошка: кобальт – 66,4 %, хром – 28 %, молибден – 3 %, кремний, марганец, никель, углерод – менее 1 %. Этот класс сплавов характеризуется хорошими механическими свойствами (прочностью, твердостью и пр.), коррозионной и температурной стойкостью. Рассматриваемый материал применяется для создания изделий, функционирующих при высоких температурах.

Экспериментальная установка состоит из итербиевого волоконного лазера ЛК-100-В (длина волны 1,07 мкм), трехкоординатного стола, персонального компьютера, системы ЧПУ и оригинального программного обеспечения [13].

### Результаты и обсуждения

Поисковые эксперименты показали, что основными параметрами режима, оказывающими наибольшее влияние на толщину спеченного слоя, являются мощность лазерного излучения, скорость перемещения луча лазера, шаг сканирования, предварительная температура подогрева порошкового материала.

Создание математической модели толщины спеченного поверхностного слоя от режимов спекания позволяет управлять процессом с целью получения качественного изделия. Для создания математической модели зависимости толщины спекаемого слоя от режимов спекания проведен четырехфакторный эксперимент [14]. Уровни и интервалы варьирования выбирались по результатам предварительных поисковых экспериментов таким образом, чтобы спеченный образец обладал некоторой прочностью и не рассыпался от прикосновения. Для этого мощность  $P$  изменялась от 10 до 20 Вт, скорость перемещения лазера  $V$  от 100 мм/мин до 300 мм/мин, температура порошкового материала  $t$  от 26 до 200 °С, шаг сканирования  $s$  от 0,1 до 0,15 мм (рис. 1).

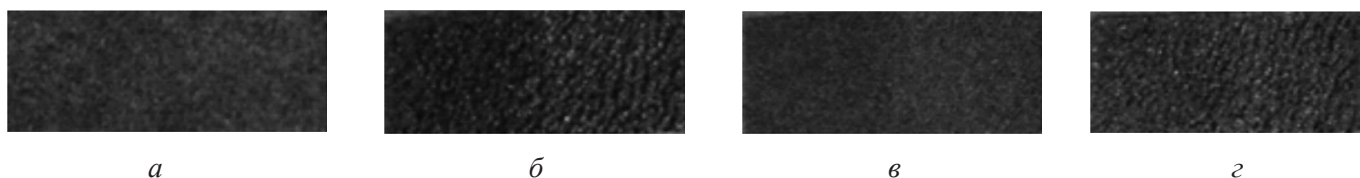


Рис. 1. Фотографии спеченных образцов из кобальтхроммолибденового порошкового материала, полученные на разных режимах ( $\times 2$ ):

*a* –  $P = 10$  Вт,  $V = 100$  мм/мин,  $t = 200$  °С,  $h = 0,1$  мм; *б* –  $P = 20$  Вт,  $V = 100$  мм/мин,  $t = 200$  °С,  $h = 0,1$  мм; *в* –  $P = 10$  Вт,  $V = 100$  мм/мин,  $t = 200$  °С,  $h = 0,15$  мм; *г* –  $P = 20$  Вт,  $V = 100$  мм/мин,  $t = 200$  °С,  $h = 0,15$  мм

Диаметр пятна лазера при спекании составлял 0,5 мм. Эксперимент поставлен по программе центрального планирования второго порядка. Реализованы шестнадцать опытов полного факторного эксперимента  $2^4$  и семь опытов в центре плана, дополненные восьмью опытами в «звездных» точках. Толщина слоя измерялась на цифровом микроскопе ИМЦ 100 $\times$ 50 по специально разработанной методике с точностью 0,01 мм [15].

После статистической обработки получена эмпирическая зависимость толщины спеченного слоя кобальтхроммолибденового порошка от технологических режимов спекания:

$$z = 1,9 + 0,04P - 0,027V + 0,0000057V^2 + 0,000001t^2 + 0,0029t - 120S^2 - S - 0,000294Pt + 0,25VS. \quad (2)$$

На основании этой зависимости построены графики с наложением экспериментальных значений толщины спеченного слоя в зависимости от режимов спекания. Анализ графических зависимостей выявил значимые параметры режима – мощность лазерного излучения, скорость перемещения луча лазера, шаг сканирования, влияющие на толщину спеченного слоя, а также пределы ее изменения от 0,65 до 1,27 мм за счет комбинации технологических режимов лазерной обработки.

На рис. 2–4 показаны графики, построенные по зависимости (2). Изменение мощности в диапазоне от 10 до 20 Вт приводит к увеличению толщины спеченного слоя  $z$  с 0,65 до 1,0 мм, таким образом, мощность оказывает значительное влияние на толщину спеченного слоя (рис. 2). Варьирование скорости от 100 до 300 мм/мин приводит к уменьшению толщины слоя с 0,88 до 0,65 мм. Температура подогрева порошкового материала и шаг перемещения луча лазера

оказывают незначительное влияние на толщину спеченного слоя.

Изменение шага сканирования также оказывает влияние на толщину спеченного слоя (рис. 3). Изменяя величину шага от 0,1 до 0,15 мм толщина слоя уменьшается с 1,27 до 0,9 мм при  $P = 20$  Вт,  $V = 100$  мм/мин,  $t = 26$  °С. Увеличение шага сканирования приводит к уменьшению толщины спеченного слоя.

На рис. 4 показано влияние мощности и температуры подогрева порошкового материала на толщину спеченного слоя. При увеличении мощности от 10 до 20 Вт и  $t = 26$  °С,  $V = 100$  мм/мин,  $S = 0,1$  мм толщина спеченного слоя увеличивается с 0,88 до 1,27 мм. Увеличение подогрева порошкового материала  $t$  с 26 до 200 °С при  $P = 10$  Вт,  $V = 100$  мм/мин,  $S = 0,1$  мм незначительно увеличивает толщину спеченного слоя с 0,88 до 0,91 мм при  $P = 20$  Вт с 1,27 до 1,3 мм.

Анализ графических зависимостей, представленных на рис. 2–4, показывает значительное влияние мощности лазерного излучения

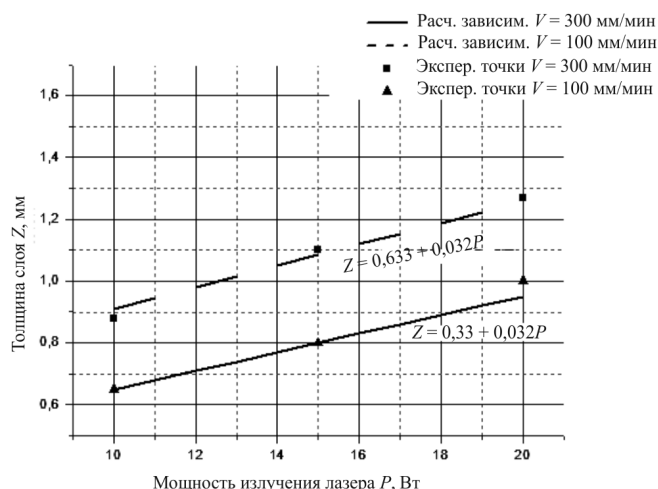


Рис. 2. Расчетные зависимости и экспериментальные точки толщины  $Z$  спеченного слоя кобальтхроммолибденового порошка от мощности  $P$  и скорости  $V$  при  $S = 0,1$  мм,  $t = 26$  °С



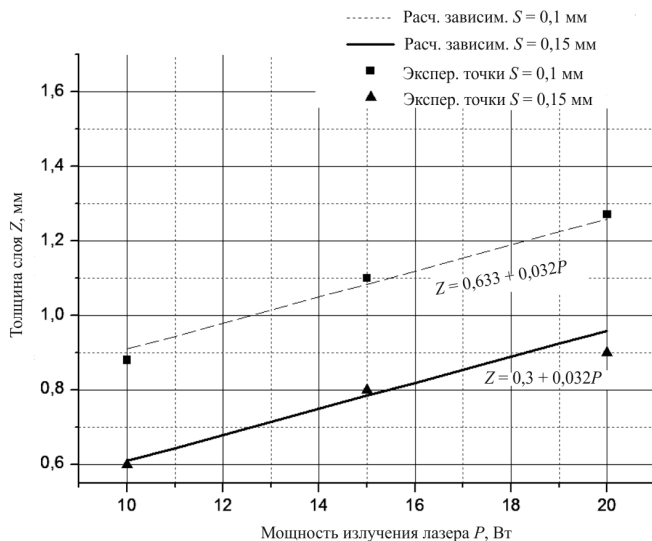


Рис. 3. Расчетные зависимости и экспериментальные точки толщины  $Z$  спеченного слоя кобальтхроммолибденового порошка от мощности  $P$  и шага сканирования  $S$  при  $V = 100$  мм/мин,  $t = 26$  °C

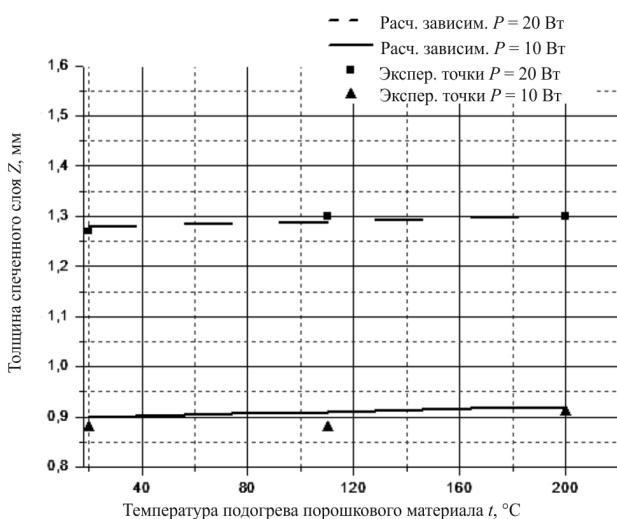


Рис. 4. Расчетные зависимости и экспериментальные точки толщины спеченного слоя  $Z$  кобальтхроммолибденового порошка от температуры подогрева порошкового материала и мощности лазера,  $V = 100$  мм/мин,  $S = 0,1$  мм

на толщину спеченного слоя. Следующими по значимости влияния являются скорость перемещения луча лазера и шаг сканирования. Незначительно на толщину спеченного слоя влияет температура подогрева порошкового материала. Таким образом, мощность излучения и скорость перемещения луча лазера являются основными параметрами, влияющими на толщину спеченного слоя порошка, но шаг и температура подогрева порошкового материала должны обязательно включаться в модель управления.

## Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. На основе теории планирования эксперимента и статической обработки результатов получена математическая зависимость толщины спеченного поверхностного слоя от режимов спекания кобальтхроммолибденового порошка, позволяющая выявить наиболее значимые параметры, влияющие на толщину спеченного слоя.

2. Экспериментально доказано, что толщину спеченного поверхностного слоя можно изменять в значительных пределах за счет изменения технологических режимов лазерной обработки. При спекании кобальтхроммолибденового порошка толщину спеченного слоя можно изменить с 0,65 до 1 мм за счет увеличения мощности лазера с 10 до 20 Вт, с 0,65 до 0,88 мм за счет уменьшения скорости перемещения луча лазера с 300 до 100 мм/мин, с 0,9 до 1,27 мм за счет уменьшения шага сканирования с 0,15 до 0,1 мм, с 0,88 до 0,91 мм за счет увеличения температуры подогрева порошкового материала с 26 до 200 °C.

## Список литературы

1. Wohlers report 2013: additive manufacturing and 3D printing state of the industry: annual worldwide progress report, May 23, 2013. – Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates, 2013. – P. 4–8. – (Executive summary). – ISBN 0-9754429-9-6.
2. Additive fabrication terminology unraveled. – URL: <http://www.additive3d.com> (accessed: 26.01.2015).
3. Григорянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с. – ISBN 5-217-00432-0.
4. Кузнецов В.Е. Системы быстрого изготовления прототипов и их расширения // CAD/CAM/CAE Observer. – 2003. – № 4 (13). – С. 2–7.
5. 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.
6. Balling processes during selective laser treatment of powders / N.K. Tolochko, S.E. Mozzharov, I.A. Yadroitsev, T. Laoui, L. Froyen, V.I. Titov, M.B. Ignatiev // Rapid Prototyping Journal. – 2004. – Vol. 10, iss. 2. – P. 78–87. – doi: <http://dx.doi.org/10.1108/13552540410526953>.
7. Maeda K., Childs T.H.C. Laser sintering (SLS) of hard metal powders for abrasion resistant coatings //

Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 149, iss. 1–3. – P. 609–615. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.02.024.

8. 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.

9. Olevsky E.A., German R.M. Effect of gravity on dimensional change during sintering–I. Shrinkage anisotropy // Acta Materialia. – 2000. – Vol. 48, iss. 5. – P. 1153–1166. – doi: 10.1016/S1359-6454(99)00368-7.

10. An experimental design approach to selective laser sintering of low carbon steel / A.N. Chatterjee, S. Kumar, P. Saha, P.K. Misha, A.R. Choudhury // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 36, iss. 1–3. – P. 151–157. – doi: 10.1016/S0924-0136(03)00132-8.

11. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок: монография / В.Я. Панченко, В.С. Голубев, В.В. Васильцов,

М.Г. Галушкин, А.Н. Грезев. – М.: Физматлит, 2009. 664 с. – ISBN 978-5-9221-1023-5.

12. Патент на изобретение 2268493 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 06 T 17/20, G 06 T 17/40. Способ лазерно-компьютерного макетирования / А.А. Сапрыкин, С.И. Петрушин, Н.А. Сапрыкина; патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2004119122/09; заявл. 24.06.2004; опубл. 20.01.2006, Бюл. № 02. – 5 с.

13. Saprykina N.A., Saprykin A.A. Engineering support for improving quality of layer-by-layer laser sintering // The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST2012, September 18–21, 2012. – Tomsk: TPU Press, 2012. – P. 129–132.

14. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

15. Saprykina N.A., Saprykin A.A. Improvement of surface layer formation technology for articles produced by layer-by-layer laser sintering // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 56–59. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.56.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1(66), January – March 2015, Pages 27–32

### The research of the effect of laser sintering modes on the thickness of the sintered cobalt-chromium-molybdenum powder layer

Saprykina N.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: nat\_anat\_sapr@mail.ru

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

#### Abstract

In the modern economic paradigm to reduce the term of the new product launch the technology of layer-by-layer laser sintering is used. Technological development is moving towards the introduction of new powder materials and definition of rational technological modes of formation of the surface layer of a given quality. The creation of applicative product is possible only within a certain range of laser exposure, which is chosen experimentally for particulate material. The accuracy of the product is greatly influenced by the layer thickness. The results of experimental studies of the effect of technological modes of powder materials sintering (the laser power, the velocity of the laser beam scanning step, pre-heating temperature of the powder material) on the thickness of the sintered cobalt-chromium-molybdenum powder layer. The studies are conducted using the technological laser complex for formation of the surfaces of the parts with a complex spatial form. The thickness of the sintered layer is determined by a specially developed technique using a digital engineer microscope. The mathematical dependence of the thickness of the sintered surface layer on cobalt-chromium-molybdenum powder sintering conditions based on the theory of experimental design and statistical treatment of results is obtained. Graphs with superposition of experimental values of the sintered layer thickness depending on the sintering conditions are plotted using mathematical relationship. Characteristic curves analysis identifies the relevant modes parameters: lasing power, laser beam traversing speed, laser beam scanning step. All these parameters affect the thickness of the sintered layer and also limits its change from 0,65 to 1 mm by increasing the laser power from 10 to 20 watts; from 0,65 to 0,88 mm by reducing the moving

speed of the laser beam from 300 to 100 mm/min; from 0,9 to 1,27 mm by reducing the laser beam scanning step from 0,15 to 0,1 mm; from 0,88 to 0,91 mm by increasing the heating temperature of the powder material from 26 to 200°C.

### Keywords:

layer-by-layer laser sintering, sintering conditions, quality of the sintered surface layer, powder material.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-27-32

### References

1. Wohlers Report 2013: *Additive manufacturing and 3D printing state of the industry*. Fort Collins, Colorado, Wohlers Associates, 2013. ISBN 0-9754429-9-6
2. Additive fabrication terminology unraveled. Available at: <http://www.additive3d.com> (accessed 26.01.2015)
3. Grigoryants A.G. *Osnovy lazernoï obrabotki materialov* [Fundamentals of laser materials processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 304 p. ISBN 5-217-00432-0
4. 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.
5. 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
6. Tolochko N.K., Mozzharov S.E., Yadroitsev I.A., Laoui T., Froyen L., Titov V. I., Ignatiev M.B. Balling processes during selective laser treatment of powders. *Rapid Prototyping Journal*, 2004, vol. 10, iss. 2, pp. 78–87. doi: <http://dx.doi.org/10.1108/13552540410526953>
7. Maeda K., Childs T.H.C. Laser sintering (SLS) of hard metal powders for abrasion resistant coatings. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 149, iss. 1–3, pp. 609–615. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.02.024
8. 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
9. Olevsky E.A., German R.M. Effect of gravity on dimensional change during sintering–I. Shrinkage anisotropy. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, iss. 5, pp. 1153–1166. doi: 10.1016/S1359-6454(99)00368-7
10. Chatterjee A.N., Kumar S., Saha P., Misha P.K. Choudhury A.R. An experimental design approach to selective laser sintering of low carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 136, iss. 1–3, pp. 151–157. doi: 10.1016/S0924-0136(03)00132-8
11. Panchenko V.Ya., Golubev V.S., Vasil'tsov V.V., Galushkin M.G., Grezev A.N. *Lazernye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamental'nykh issledovaniï i prikladnykh razrabotok* [Laser materials processing technologies: modern problems of fundamental research and applications]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 664 p. ISBN 978-5-9221-1023-5
12. Saprykin A.A., Petrushin S.I., Saprykina N.A. *Sposob lazerno-komp'yuternogo maketirovaniya* [A method of laser-computer prototyping]. Patent RF, no. 2268493, 2006.
13. 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, TPU Press, 2012, pp. 129–132.
14. Spiridonov A.A. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Design of experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p.
15. Saprykina N.A., Saprykin A.A. Improvement of surface layer formation technology for articles produced by layer-by-layer laser sintering. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 379, pp. 56–59. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.56

Received 26 January 2015

Revised 10 February 2015

Accepted 15 February 2015

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И КОМПОНЕНТ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ФОРМОИЗМЕНЕНИИ МАТЕРИАЛА

*В.В. ЧЕРНОМАС*<sup>1</sup>, доктор техн. наук, профессор  
*Г.М. СЕВАСТЬЯНОВ*<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук  
*А.М. СЕВАСТЬЯНОВ*<sup>3</sup>, канд. техн. наук  
*С.В. БОНДАРЕНКО*<sup>2</sup>, аспирант  
<sup>1</sup>КнАГТУ, г. Комсомольск-на-Амуре,  
<sup>2</sup>ИМиМ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре,  
<sup>3</sup>АмГПГУ, г. Комсомольск-на-Амуре)

Поступила 19 января 2015

Рецензирование 10 февраля 2015

Принята к печати 15 февраля 2015

**Черномас В.В.** – 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,  
Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет,  
e-mail: userman10@mail.ru

Получение специальных видов проката из цветных сплавов с помощью совмещенных технологий литья и деформации является относительно новым ресурсосберегающим направлением в металлургии. В отечественной практике такие технологии реализованы в устройстве непрерывного литья и деформации металла. Ключевыми особенностями указанного устройства являются цикличность процесса и наличие больших необратимых деформаций заготовки (полосы прямоугольного сечения в замкнутом с четырех сторон подвижном кристаллизаторе). Эти особенности приводят к проблеме получения экспериментальных данных об энергосиловых параметрах деформирования, а также о распределении и интенсивности деформированного состояния заготовки. В данной работе предложена методика определения мгновенной мощности необратимого формоизменения с помощью косвенных измерений. Методика основана на регистрации и анализе изменения электрических характеристик двигателя привода в двух режимах работы установки: циклическом деформировании образца и движении узлов установки без деформирования образца. Предложен способ прямого измерения компонентов пластической деформации заготовки на базе метода накатанных делительных сеток с последующими расчетами по методике Зибеля. Результаты экспериментов свидетельствуют о наличии выраженного трехосного деформированного состояния заготовки в результате совместного действия удлинения и сдвигов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. На основе полученных экспериментальных данных проведена верификация программного пакета LS-DYNA при решении задачи стесненного сдвига, сопряженного с большими пластическими деформациями.

**Ключевые слова:** циклическое формоизменение, компоненты пластической деформации, интенсивность деформации, мощность необратимого формоизменения, инструмент деформации.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-33-41

## Введение

При разработке технологических процессов получения металлоизделий совмещенными методами литья и обработки материалов давлением решающее значение имеет определение

рациональных параметров процесса, обеспечивающих гарантированное качество получаемых металлоизделий [1–4].

Известно, что при изготовлении металлоизделий с применением установки непрерывного



литья и деформации металла (УНЛДМ) деформирование металла в требуемый профиль поперечного сечения осуществляется с помощью подвижного составного кристаллизатора, который кроме функции теплоотвода, необходимого для кристаллизации металла, выполняет функцию инструмента его деформации [5–7]. На рис. 1 представлена конструктивная схема УНЛДМ (часть сечений элементов конструкции не показана). Установка имеет две плоскости симметрии – поперечную П1 и продольную П2 – и включает в себя охлаждаемый кристаллизатор, состоящий из двух подвижных боковых стенок 1 и двух подающих плит 2. Рабочие поверхности боковых стенок кристаллизатора имеют вертикальные калибрующие участки и наклонные участки обжатия материала металлоизделия в твердотелом состоянии, расположенные под углом к прямолинейным участкам. Каждая из боковых стенок закреплена на приводных эксцентриковых валах (пары 3 и 4), закрепленных в станине 5 с помощью подшипников качения, и приводится ими во вращательное движение. При этом каждая точка боковой стенки движется по круговой траектории относительно своего центра вращения в плоскости П2. Подающие плиты закреплены на станине с помощью плоских подшипников, приводятся в движение за счет эксцентриков, размещенных на нижней паре валов 4, и совершают вертикальное возвратно-поступательное движение. Такое взаимное

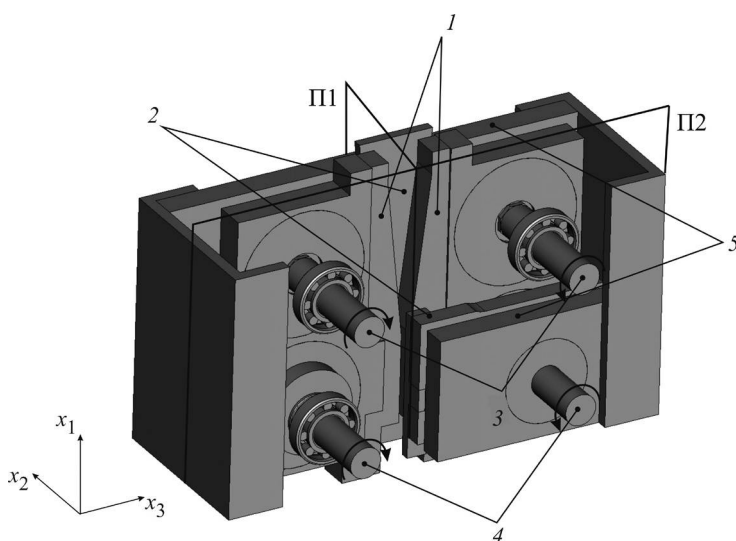


Рис. 1. Конструктивная схема УНЛДМ:

1 – боковые стенки (бойки); 2 – подающие плиты; 3, 4 – приводные эксцентриковые валы (верхняя и нижняя пара соответственно); 5 – станина

движение стенок кристаллизатора приводит к циклической деформации заготовки и ее подаче в зону калибрования. За счет противонаправленного вращения пар валов деформация материала заготовки происходит в результате механического давления боковых стенок кристаллизатора и в меньшей степени в результате сдвига подающими плитами.

Для реализации устойчивого процесса получения металлоизделий на УНЛДМ наряду с соблюдением температурных режимов кристаллизатора требуется разработка оптимальных условий процесса его пластического деформирования [8]. Определение этих параметров возможно только на основе анализа напряженно-деформированного состояния (НДС), формирующегося в металлической заготовке. Такой анализ в процессах, сопряженных с большими пластическими деформациями, связан с существенными трудностями как из-за отсутствия методик экспериментального определения НДС по толщине заготовки, так и из-за сложности получения его расчетных значений.

В этой связи определение деформированного состояния в формирующемся металлоизделии и энергосиловых параметров процесса на базе натурного моделирования является актуальным направлением исследования. Цель данной работы состоит в создании методик экспериментального определения средней мощности пластического деформирования и компонентов деформаций

в полосе прямоугольного сечения, подверженной необратимому циклическому формоизменению в замкнутом с четырех сторон подвижном кристаллизаторе УНЛДМ, а также в получении экспериментальных данных об указанных характеристиках и верификации на их основе программного комплекса LS-DYNA. Необходимость такой верификации обусловлена известной дискуссионностью вопроса выбора кинематических соотношений теории пластичности при больших деформациях [9].

Для получения данных о деформированном состоянии заготовки необходимо выбрать базовый экспериментальный метод, соответствующий условиям протекания исследуемого процесса (большие деформации, необходимость их измерения по толщине заготовки, а не только на ее поверхности,

труднодоступность металлоизделия в процессе деформирования). Наиболее известны следующие экспериментальные методы определения деформированного состояния: метод хрупких тензочувствительных покрытий [10], метод оптически чувствительных покрытий [10], методы голографии [11], метод делительных сеток [12]. Ввиду особенностей совмещенного процесса, протекающего на УНЛДМ, в частности из-за больших деформаций материала, не могут быть применены методы, основанные на нанесении на материал тонких покрытий (метод хрупких тензочувствительных покрытий, метод оптически чувствительных покрытий). Область применения группы голографических методов также ограничивается измерениями малых деформаций материала. Метод муаровых полос, несмотря на его определенные преимущества (использование в широком диапазоне температур и скоростей нагружения, наглядность, возможность измерения в зонах концентрации на малых базах), имеет достаточно высокую погрешность и трудоемок в применении. В контексте данного исследования наиболее подходит метод накатанных делительных сеток, который, однако, в базовом варианте пригоден только для измерения деформаций вблизи поверхности образца.

Для определения энергосиловых характеристик процессов обработки металлов давлением существует практика применения различных датчиков нагрузки. Однако, во-первых, цикличность рассматриваемого процесса и достаточно высокая величина угловых скоростей кругового движения инструмента деформации приводят к требованию малой инерционности измерительного оборудования. Во-вторых, технические особенности кристаллизатора УНЛДМ делают невозможной непосредственную установку датчиков в зону контакта инструмента с металлоизделием. Приемлемой альтернативой представляется идентификация механической мощности процесса формоизменения с помощью косвенных измерений (по электрическим характеристикам привода).

### Методика исследования

Для экспериментального определения больших пластических деформаций в качестве базового метода исследования выбран метод

делительных сеток. Для оценки деформированного состояния во внутренних слоях материала предложено использовать трехслойные составные образцы. Материал – свинцово-сурьмяный сплав марки ССу [13], толщина каждого слоя 4 мм. На сопрягающиеся поверхности слоев наносится координатная сетка в виде квадратных ячеек размером 10×10 мм (глубина рисок 1 мм). Сборка слоев в составной образец осуществляется с помощью свинцовых заклепок диаметром 5 мм, расположенных по его периметру. Начальные условия при проведении экспериментов: температура заготовки 20 °С, температура инструмента 20 °С, смазка рабочих поверхностей инструмента, контактирующих с заготовкой, отсутствует. Максимальная степень обжатия образца в калибрующей зоне кристаллизатора составляет 50 %.

После проведения эксперимента составной образец разделяется на слои, и с помощью фотосъемки фиксируются искажения координатной сетки, нанесенной на поверхность каждого из слоев. Измерение искажения элементов координатной сетки проведено с помощью программы обработки цифровых изображений «Image Pro Plus 6.0». Расчет компонентов деформации, характеризующих истинное (логарифмическое) удлинение и сдвиг ячеек координатной сетки, проводится на основе методики Зибеля [14, 15].

Для идентификации энергосиловых параметров деформирования материала составными частями кристаллизатора УНЛДМ разработана методика, основанная на регистрации и анализе кривых нагрузки электродвигателя привода. На рис. 2 представлены внешний вид и принципиальная схема экспериментального стенда для проведения натурного моделирования.

В его состав входит электродвигатель постоянного тока Д812 У2 мощностью 75 кВт с обратной связью для регулирования частоты вращения вала двигателя, редуктор с четырьмя выходными валами и рабочая клетка кристаллизатора с приводными валами. В электрическую цепь двигателя установлен шунт калиброванный марки 75ШСМЗ-100А, электрический сигнал с которого (напряжение в электрической цепи) поступает на вход аналого-цифрового преобразователя, фиксируется и обрабатывается на ПЭВМ с помощью программы PowerGraph 2.1. Частота

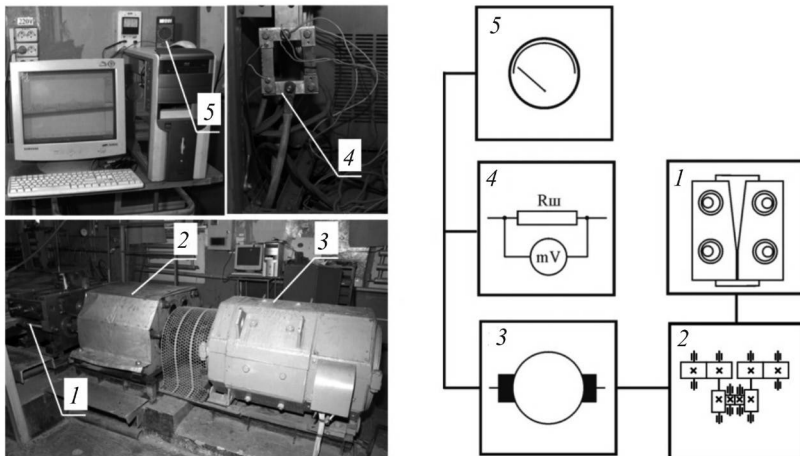


Рис. 2. Внешний вид (а) и принципиальная схема (б) экспериментального стенда для натурного моделирования процесса:

1 – клеть УНЛДМ; 2 – редуктор; 3 – двигатель; 4 – шунт; 5 – тахометр

вращения вала электродвигателя регистрируется с помощью электрического тахометра марки ТЭ-45, вращение равномерное с угловой скоростью, не зависящей от нагрузки.

Полный оборот приводных валов УНЛДМ состоит из двух этапов: этапа обжатия (рабочего хода) и этапа холостого хода. Этап обжатия начинается с момента захвата заготовки рабочими поверхностями боковых стенок и заканчивается в момент их максимального сближения. Этап холостого хода характеризуется отсутствием контакта рабочих поверхностей боковых стенок с заготовкой. На рис. 3 представлена кинематика подвижных частей кристаллизатора, за точку отсчета угла  $\varphi$  (нулевую отметку) принято полностью разведенное положение боковых стенок.

График  $x_1(\varphi)$  – изменение вертикальной координаты центра масс подающих плит (нуле-

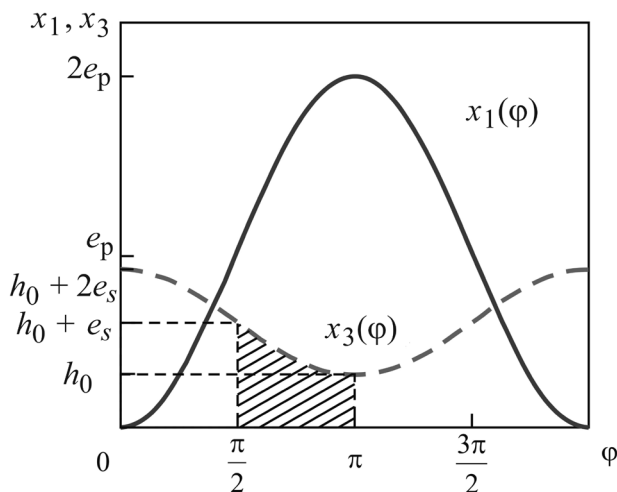


Рис. 3. Кинематика подвижных частей кристаллизатора

вому уровню соответствует нижнее положение плит). Полный ход плит –  $2e_p$ , где  $e_p$  – эксцентриситет участка вала, приводящего в движение подающие плиты. График  $x_3(\varphi)$  – изменение горизонтальной координаты вертикального участка боковых стенок кристаллизатора (точка отсчета координаты – в плоскости симметрии П1). Здесь  $e_s$  – эксцентриситет участка вала, приводящего в движение боковые стенки;  $h_0$  – половина расстояния между вертикальными участками боковых стенок при их полном сведении (т. е.  $2h_0$  – толщина заготовки на выходе из кристаллизатора). Штриховкой на рис. 3 отмечен этап обжатия.

Уравнения движения  $x_1(\varphi) = e_p(1 - \cos \varphi)$ ,  $x_3(\varphi) = h_0 + e_s(1 + \cos \varphi)$ . В рассматриваемых натуральных экспериментах конструктивные параметры имеют следующие числовые значения:  $e_p = 10$  мм,  $e_s = 3$  мм,  $h_0 = 3$  мм.

Экспериментальные исследования проводятся следующим образом. Составной образец помещается в кристаллизатор УНЛДМ, боковые стенки которого предварительно устанавливаются в среднее положение ( $\varphi = \pi/2$ ), соответствующее началу их рабочего хода. Затем включается привод составных частей кристаллизатора, при этом образец захватывается движущимися навстречу друг другу рабочими поверхностями боковых стенок, деформируется ими и продвигается в зону калибровки торцевыми стенками.

## Результаты и обсуждение

В процессе деформации квадратные ячейки сетки трансформируются в криволинейные параллелограммы (рис. 4, а). Дальнейшие измерения проведены по полуосям  $r_1$  и  $r_2$  эллипсов, вписанных в деформированные ячейки сетки, точки касания эллипсов – середины сторон ячейки (рис. 4, б).

Осредненные результаты измерений искажений координатной сетки и расчетные компоненты деформации (главные линейные деформации) представлены в таблице. Для определения компонента  $\varepsilon_3$  использовано соотношение пластической несжимаемости  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$ . В качестве

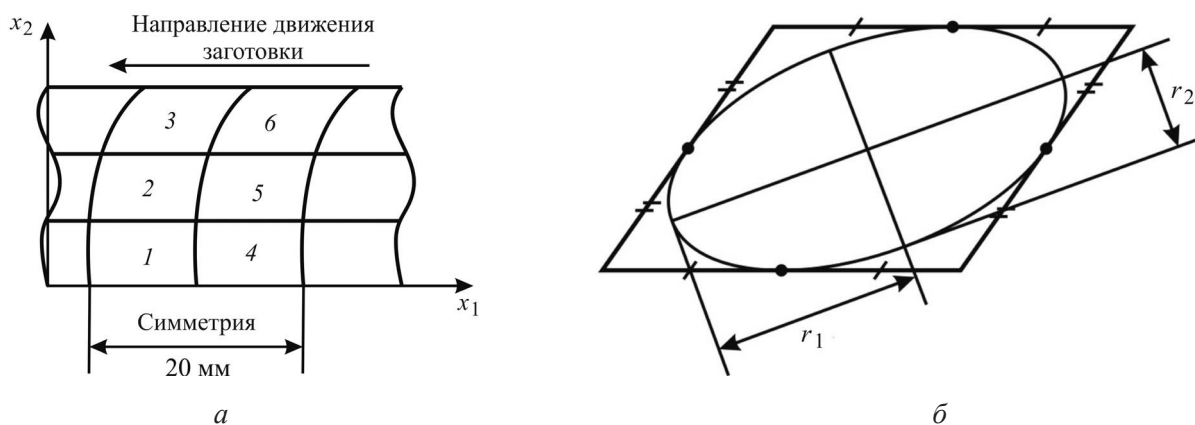


Рис. 4. К расчету компонентов деформации:

*a* – расположение ячеек координатной сетки; *б* – схема проведения измерений их искажения

характеристики деформированного состояния выбрана величина интенсивности пластической деформации  $\Sigma = \sqrt{2/3} (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2)^{1/2}$ , также приведенная в таблице.

Расстояния между продольными линиями сетки остались практически неизменными, что свидетельствует о незначительной величине истинных удлинений (укорочений)  $\epsilon_2$ . Поперечные линии сетки претерпели существенное изменение и приобрели вид парабол с вершинами, находящимися в плоскости симметрии П1 заготовки. При этом рассчитанная величина  $\epsilon_3$  по модулю существенно превышает значение  $\ln 0,5$  (теоретическую величину однородной деформации  $\epsilon_3$  в отсутствие трения на контактных поверхностях и, как следствие, искривления сеточных линий). Этот факт говорит о сильной неоднородности деформированного состояния

по толщине заготовки и значительных сдвиговых деформациях материала в плоскостях, параллельных П1.

Если пренебречь малой величиной деформации  $\epsilon_2$ , то схему деформирования образца в калибрующей части можно представить как результат совместного удлинения в направлении оси  $x_1$  (со сжатием по оси  $x_3$ ) и сдвигов в плоскостях, параллельных П1 и П2.

Экспериментальные данные электрического напряжения, зарегистрированного на калибрующем шунте в процессе циклической деформации образца, в виде дискретного сигнала приведены на рис. 5, *a*. Периодичность сигнала соответствует показаниям тахометра (180 оборотов вала в минуту).

На рис. 5, *б* представлен график, соответствующий сглаженному средствами Power-Graph 2.1 сигналу. Приведенные данные с учетом

**Результаты измерений искажений координатной сетки и расчетов компонентов деформаций**

Номер ячейки	Большая полуось эллипса $r_1$ , мм	Малая полуось эллипса $r_2$ , мм	Компоненты логарифмической деформации			$\Sigma$
			$\epsilon_1 = \ln \left( \frac{r_1}{r_0} \right)$	$\epsilon_2 = \ln \left( \frac{r_2}{r_0} \right)$	$\epsilon_3 = -(\epsilon_1 + \epsilon_2)$	
1	13,0	$\Sigma 5,1$	0,96	0,02 $\Sigma$	$\Sigma -0,98$	1,12
2	12,2	4,8	0,89	-0,04	-0,85	1,01
3	12,5	4,6	0,92	-0,08	-0,84	1,02
4	12,6	5,1	0,92	0,02	-0,94	1,07
5	12,6	4,8	0,92	-0,04	-0,88	1,04
6	14,2	4,9	1,04	-0,02	-1,02	1,19



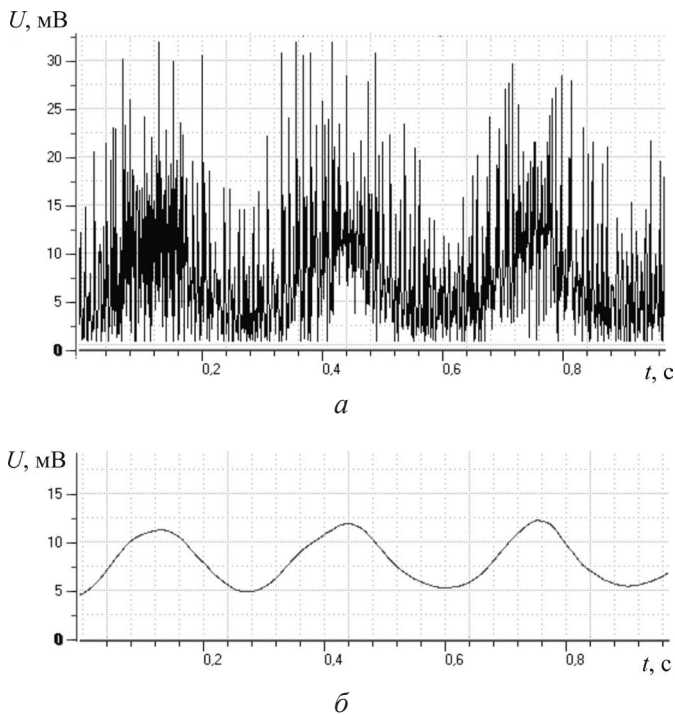


Рис. 5. Электрическое напряжение на калибрующем шунте, регистрируемое в процессе циклической деформации свинцовой полосы:

*a* – необработанный входящий сигнал; *б* – обработанный сигнал

известного КПД двигателя привода ( $\eta = 0,886$ ) позволяют рассчитать среднее значение полной затрачиваемой механической мощности:

$$P_{\text{ср}}^{\text{мех}} = \eta P_{\text{ср}}^{\text{эл}} = \eta E I_{\text{ср}}^{\text{я}} = \\ = \eta E I_{\text{ср}}^{\text{ш}} = \eta E U_{\text{ср}}^{\text{ш}} / R^{\text{ш}},$$

где  $P^{\text{мех}}$ ,  $P^{\text{эл}}$  – соответственно механическая и электрическая мощность;  $E = 198 \text{ В}$  – зарегистрированная ЭДС двигателя;  $I^{\text{я}} = I^{\text{ш}}$  – ток якоря (шунта);  $R^{\text{ш}} = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$  – сопротивление калибрующего шунта; среднее значение напряжения на калибрующем шунте в эксперименте зарегистрировано на уровне  $U_{\text{ср}}^{\text{ш}} = 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ В}$ .

Указанная мощность содержит затраты на пластическое деформирование заготовки, величина которых служит важным источником информации о процессе пластического формирования образца в условиях сложного нагружения, а также различные динамические и тепловые потери. Для выделения составляющей полной механической мощности, расходуемой непосредственно на необратимое циклическое

деформирование металлоизделия, принято следующее предположение: мощность диссипации энергии за счет трения в узлах установки не зависит от величины активной нагрузки (давления на поверхности контакта боковых стенок и подающих плит с заготовкой). В этом случае экспериментально зафиксировать мощность деформирования можно на основе простого опыта – замера напряжения на шунте при работе установки без деформирования образца (при тех же частотах вращения вала). Анализ электрического сигнала показывает, что в этом случае напряжение на калибрующем шунте слабо меняется в ходе процесса, средняя величина зарегистрирована на уровне  $U_{\text{ср}}^{\text{ш}} = 2,0 \text{ мВ}$ .

Таким образом, средняя мощность пластического деформирования  $P_{\text{ср}}^{\text{д}}$  может быть найдена в следующем виде:

$$P_{\text{ср}}^{\text{д}} = \eta E (U_{\text{ср}}^{\text{ш}} - U_{0\text{ср}}^{\text{ш}}) / R^{\text{ш}},$$

$$P_{\text{ср}}^{\text{д}} = \frac{0,886 \cdot 198(8,7 - 2,0)10^{-3}}{(0,75 \cdot 10^{-3})} = 1567 \text{ Вт.}$$

Полученные значения средней мощности деформирования и интенсивности необратимых деформаций использованы для верификации расчетного конечно-элементного комплекса LS-DYNA при решении задачи стесненного силового сдвига. Ключевыми особенностями модели процесса в LS-DYNA являются:

- использование трехмерного конечного элемента (тип Solid164) в ALE-формулировке, рекомендованной разработчиками пакета для процессов с существенным изменением формы тел; необходимость рассмотрения трехмерной модели обусловлена наличием сил трения на всех контактных поверхностях;

- выбор в качестве физических соотношений для материала заготовки модели изотропно упрочняющегося тела (на основе экспериментальных данных по одноосному сжатию использован степенной закон упрочнения);

- задание контакта на границах тел законом сухого трения Кулона-Амонтона с переходом в трение Прандтля при достижении предельного значения касательных напряжений;

- задание нагрузки посредством кинематических граничных условий, определенных на базе 3D-моделирования установки в программе T-Flex CAD.

Полученные расчетные результаты хорошо согласуются с величинами, экспериментально определенными по разработанным методикам. Средняя мощность пластического формоизменения, полученная в LS-DYNA, составляет около 1450 Вт, что всего на 7,5 % отличается от зарегистрированного в эксперименте значения. Расчетная величина интенсивности деформации в поверхностном слое образца (соответствующем месту нанесения сетки в эксперименте) циклично меняется по длине деформированной заготовки в пределах от 0,95 до 1,1. Сравнение этих показателей с экспериментальными данными, приведенными в таблице, также показывает приемлемое количественное соответствие.

### Выводы

1. Разработана методика определения энергосиловых параметров процесса и компонентов деформации во внутренних слоях металлической полосы, подвергаемой интенсивному циклическому формоизменению, сопряженному с большими пластическими деформациями.

2. Определен характер необратимого деформирования полосы в рассматриваемых процессах. В частности, установлено, что схему деформирования образца в калибрующей части можно представить как результат совместного удлинения в направлении оси  $x_1$  (со сжатием по оси  $x_3$ ) и сдвигов в плоскостях, параллельных П1 и П2 (см. рис. 1). При этом влияние сдвиговых деформаций оказывается существенным в обеих плоскостях, что свидетельствует о существенной погрешности предлагавшихся ранее для данного процесса расчетных моделей, основанных на гипотезе плоской деформации.

3. Проведена верификация модели, построенной в программном комплексе LS-DYNA, на полученных экспериментальных данных. Установлен приемлемый уровень соответствия расчетных и экспериментальных значений характеристик.

### Список литературы

1. Сидельников С.Б. Классификация и области применения совмещенных и комбинированных процессов обработки цветных металлов и сплавов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2005. – № 3. – С. 45–49.

2. Совершенствование конструкций установок совмещенной обработки алюминия и его сплавов / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, С.В. Солдатов, И.Н. Довженко, Р.И. Галиев, А.С. Сидельников, А.Л. Киселев, В.М. Беспалов, А.П. Самчук // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2013. – № 2. – С. 7–12.

3. Gorokhov Yu.V., Zagirov N.N., Gubanov I.Yu. Calculation of deformation-zone parameters during continuous extrusion by the conform method // Russian Metallurgy (Metally). – 2004. – N 4. – P. 396–399.

4. Langerweger J.F., Maddock B. Recent development in CONFORM and CASTEX continuous extrusion technology // Proceedings of Fourth International Aluminum Extrusion Technology Seminar, April 11–14, 1988. – Chicago, Illinois, 1988. – Vol. 2. – P. 533–538.

5. Одинокоев В.И., Черномас В.В., Ловизин Н.С. Двухручьевого литейно-ковочный модуль горизонтального типа для производства непрерывнолитых деформированных заготовок из цветных сплавов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2008. – № 1. – С. 12–14.

6. Technology for preparing metal objects in a horizontal casting and metal deformation unit / V.I. Odinokov, V.V. Chernomas, N.S. Lovizin, V.V. Stulov, S.Yu. Sklyar // Metallurgist. – 2009. – Vol. 53, iss. 7–8. – P. 412–415. – doi: 10.1007/s11015-009-9198-0.

7. Producing continuous-cast deformed steel billet / V.V. Stulov, V.I. Odinokov, G.V. Ogloblin, V.V. Chernomas, A.A. Derbetkin // Steel in Translation. – 2009. – Vol. 39, iss. 8. – P. 639–644. – doi: 10.3103/S0967091209080075.

8. Chernomas V.V., Lovizin N.S., Sosnin A.A. Stability criteria for manufacturing metal products on a horizontal metal casting and deformation plant // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2012. – Vol. 41, iss. 2. – P. 158–162. – doi: 10.3103/S1052618812020045.

9. Буренин А.А., Ковтанюк Л.В. Большие необратимые деформации и упругое последствие. – Владивосток: Дальнаука, 2013. – 311 с. – ISBN 978-5-8044-1423-9.

10. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с. – (Основы проектирования машин).

11. Островский Ю.И., Шетинов В.П., Яковлев В.В. Голографические интерференционные методы измерения деформации. – М.: Наука, 1988. – 248 с.

12. Фридман Я.Б., Зилова Т.К., Демина Н.И. Изучение пластической деформации и разрушения методом накатанных сеток. – М.: Оборонгиз, 1962. – 188 с.

13. ГОСТ 1292–81. Сплавы свинцово-сурьмянистые. Технические условия. – Изд. (март 2000 г.) с Изм. 1, 2, 3, 4 (ИУС. 1986. № 8; 1989. № 6; 1991. № 4;

1999. № 4). – Взамен ГОСТ 1292–74; введ. 1982–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 10 с.

14. Смирнов-Аляев Г.А., Чикидовский В.П. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. – Л.: Машиностроение, 1972. – 360 с. – ISBN 200000915733.

15. Шестаков Н.А., Власов А.В. Расчеты процессов обработки металлов давлением в MathCAD. Решение задач энергетическим методом: учебное пособие. – М.: Изд-во МГИУ, 2008. – 344 с. – ISBN 5-276-00076-X.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1(66), January – March 2015, Pages 33–41

### Experimental determination of energy-power parameters and components of deformation during cyclic forming of material

**Chernomas V.V.**<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: userman10@mail.ru

**Sevastyanov G.M.**<sup>2</sup>, Ph.D. (Physics and Mathematics), e-mail: akela.86@mail.ru

**Sevastyanov A.M.**<sup>3</sup>, Ph.D. (Engineering), Senior Lecturer, e-mail: mamia20@mail.ru

**Bondarenko S.V.**<sup>2</sup>, Ph.D. student, e-mail: kriza\_13@mail.ru

<sup>1</sup>Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 27 Lenin Avenue, Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Machinery and Metallurgy, Russian Academy of Sciences (Far Eastern Branch), 1 Metallurgov st., Komsomolsk-on-Amur, 681005, Russian Federation

<sup>3</sup>Amur State University of Humanities and Pedagogy, 17/2 Kirova st., Komsomolsk-on-Amur, Khabarovskiy kray, 681000, Russian Federation

#### Abstract

Production of special types of rolled nonferrous alloys using the combined technology of casting and deformation is a relatively new trend in resource-saving metallurgy. In domestic practice such techniques are implemented in the device for continuous casting and metal deformation. The key features of this device are cyclicity of process and the presence of large irreversible deformations of the workpiece (a strip of rectangular cross section in movable crystallizer, closed on four sides). These features lead to the problem of experimental data obtaining on the energy-power parameters of deformation, as well as the distribution and intensity of the strain state of the workpiece. In this paper, we propose a method for determining the instantaneous power of irreversible form changing by means of indirect measurements. The technique based on the detection and analysis of changes in the electrical characteristics of the motor drive in two modes of operation of the plant: cyclic deformation of the specimen and the motion of plant components without specimen deformation. We propose a method for directly measuring the components of the plastic deformation of the workpiece based on the method of knurled dividing grid with subsequent calculations by the Zibel's method. The experimental results indicate the expressed triaxial strain state of the workpiece because of the combined action of elongation and shifts in two mutually perpendicular planes. Verification of software package LS-DYNA carried out based on obtained experimental data by solving the problem of constrained shear, which coupled with the large plastic deformations.

#### Keywords:

cyclic forming, components of plastic deformation, strain intensity, power of irreversible form changing, deformation tool.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-33-41

#### References

1. Sidelnikov S.B. Klassifikatsiya i oblasti primeneniya sovmeshchennykh i kombinirovannykh protsessov obrabotki tsvetnykh metallov i splavov [Classification and fields of application of integrated and combined methods to process non-ferrous metals and alloys]. *Izvestiya vusshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya – Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2005, no. 3, pp. 45–49. (In Russian)

2. Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Soldatov S.V., Dovzhenko I.N., Galiev R.I., Sidel'nikov A.S., Kiselev A.L., Bespalov V.M., Samchuk A.P. Sovershenstvovanie konstruktсии ustanovok sovmeshchennoi obrabotki alyuminiya i ego splavov [Improving plant designs combined treatment of aluminum and its alloys]. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov – Mechanical machinery of metallurgical enterprises*, 2013, no. 2, pp. 7–12.
3. Gorokhov Yu.V., Zagirov N.N., Gubanov I.Yu. Calculation of deformation-zone parameters during continuous extrusion by the conform method. *Russian metallurgy (Metally)*, 2004, no. 4, pp. 396–399.
4. Langerweger J.F., Maddock B. Recent development in CONFORM and CASTEX continuous extrusion technology. Proceedings of Fourth International Aluminum Extrusion Technology Seminar, Chicago, Illinois, April 11–14, 1988, vol. 2, pp. 533–538.
5. Odinokov V.I., Chernomas V.V., Lovizin N.S. Dvukhruch'evoi liteino-kovochnyi modul' gorizontalnogo tipa dlya proizvodstva nepreryvnolitykh deformirovannykh zagotovok iz tsvetnykh splavov [Two-strand casting-forging module horizontal type for the production of continuously deformed pieces of non-ferrous alloys]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2008, no. 1, pp. 12–14.
6. Odinokov V.I., Chernomas V.V., Lovizin N.S., Stulov V.V., Sklyar S.Yu. Technology for preparing metal objects in a horizontal casting and metal deformation unit. *Metallurgist*, 2009, vol. 53, iss. 7–8, pp. 412–415. doi: 10.1007/s11015-009-9198-0
7. Stulov V.V., Odinokov V.I., Ogloblin G.V., Chernomas V.V., Derbetkin A.A. Producing continuous-cast deformed steel billet. *Steel in Translation*, 2009, vol. 39, iss. 8, pp. 639–644. doi: 10.3103/S0967091209080075
8. Chernomas V.V., Lovizin N.S., Sosnin A.A. Stability criteria for manufacturing metal products on a horizontal metal casting and deformation plant. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2012, vol. 41, iss. 2, pp. 158–162. doi: 10.3103/S1052618812020045
9. Burenin A.A., Kovtanyuk L.V. *Bol'shie neobratimye deformatsii i uprugoe posledeistvie* [Large irreversible deformation and elastic aftereffect]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2013. 311 p. ISBN 978-5-8044-1423-9
10. Prigorovskii N.I. *Metody i sredstva opredeleniya polei deformatsii i napryazhenii: Spravochnik* [Methods and means of determining the strain and stress fields. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 248 p.
11. Ostrovskii Yu.I., Shepinov V.P., Yakovlev V.V. *Golograficheskie interferentsionnye metody izmereniya deformatsii* [Holographic interference method for measuring deformation]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 248 p.
12. Fridman Ya.B., Zilova T.K., Demina N.I. *Izuchenie plasticheskoi deformatsii i razrusheniya metodom nakatannykh setok* [The study of plastic deformation and fracture by formed grids method]. Moscow, Oborongiz Publ., 1962. 188 p.
13. *GOST 1292–81. Splavy svintsovo-sur'myanistyje. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 1292–81. Lead-antimony alloys. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2000. 10 p.
14. Smirnov-Alyayev G.A., Chikidovskii V.P. *Eksperimental'nye issledovaniya v obrabotke metallov davleniem* [Experimental studies in metal forming]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 360 p.
15. Shestakov N.A., Vlasov A.V. *Raschety protsessov obrabotki metallov davleniem v MathCAD. Reshenie zadach energeticheskim metodom* [Calculations of metal forming processes in MathCAD. Problem solving by energy method]. Moscow, MGIU Publ., 2008. 344 p. ISBN 5-276-00076-X

Received 19 January 2015

Revised 10 February 2015

Accepted 15 February 2015



# РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТОЙКИ ТЯЖЕЛОГО МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА

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

Поступила 13 января 2015 года

Рецензирование 27 февраля 2015 года

Принята к печати 2 марта 2015 года

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

Основной целью при проектировании несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков является снижение массы при заданной точности и производительности механической обработки. Для достижения этой цели нами предложена технология расчетного проектирования несущих конструкций на основе принципа декомпозиции и интегрированной работе метода конечных элементов с методами оптимизации. На примере проектирования стойки тяжелого многоцелевого станка показаны основные этапы рационального проектирования отдельной несущей конструкции. На этапе проектирования несущей системы, состоящей из упрощенных по геометрии несущих конструкций, определены оптимальные габаритные размеры стойки. Для принятой системы предпочтений следует признать лучшим вариант несущей системы со стойкой с размерами поперечного сечения 1,8 м (по оси  $x$ ) и 2,6 м (по оси  $y$ ). Анализ работы стойки на кручение с использованием методов механики показывает, что наилучшей является стойка с квадратным поперечным сечением 2,46 × 2,46 м, у которой жесткость на кручение на 26 % выше по сравнению с серийным вариантом. Результаты расчета показывают, что серийная конструкция стойки с продольными и поперечными ребрами жесткости тяжелее на 24 % стойки с ребрами, расположенными по диагонали при равной жесткости. Однако серийная стойка менее жесткая, чем стойка с наклонными ребрами.

**Ключевые слова:** тяжелый многоцелевой станок, проектирование, несущие конструкции, стойка, метод конечных элементов, методы оптимизации.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-42-50

## Введение

За последние десятилетия в станкостроении при проектировании несущих конструкций широко применяется метод конечных элементов (МКЭ). В станкостроении МКЭ активно используется для статического и динамического анализа конструкций заданной геометрии [1–6]. Картины деформированного состояния, полученные расчетом МКЭ и экспериментом, качественно совпадают, количественные расхождения не превышают 16 % [3]. Однако в своей настоящей форме данный анализ используется лишь для идентификации технической задачи, но мало помогает конструктору в достижении действитель-

но оптимальной конструкции, а также в определении способов модификации проекта с целью совершенствования рассматриваемых характеристик [6]. Лучшая конструкция выбирается на основе просчета МКЭ нескольких возможных вариантов. Однако в этом случае количество рассматриваемых вариантов ограничивается возможностью конструктора и значительно меньше общего числа вариантов, отвечающих всем сочетаниям варьируемых параметров. Поэтому вариант, признанный лучшим, является таковым не в абсолютном смысле, а лишь по сравнению с небольшим числом других рассмотренных вариантов.

Перспективные шаги в направлении рационального проектирования несущих конструкций станков связаны с использованием МКЭ в сочетании с методами оптимизации [7–14].

Основные габаритные размеры металлообрабатывающего станка задаются на этапе технического задания. Далее конструктор на основе расчетов на прочность и жесткость определяет размеры несущих конструкций, которые должны обеспечить выполнение требований по точности и производительности механической обработки. В расчетах компоновочных решений для отдельных несущих конструкций эффективно использовать и общие методы механики деформируемого твердого тела, в частности, одного из его разделов – сопротивления материалов [15].

В работе [16] изложена технология проектирования несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков (рис. 1), обеспечивающая создание станков без избыточных возможностей, прогнозирование их работоспособности в условиях интенсивных механических воздействий и научное обоснование выбора проектных решений. Технология включает в себя четыре основных этапа:

1) определяются внешние нагрузки на основе детерминированных или вероятностных моделей;

2) на этапе моделирования компоновки станка определяются граничные условия (силовые и кинематические) для отдельных несущих конструкций (стойка, шпиндельная бабка, ста-

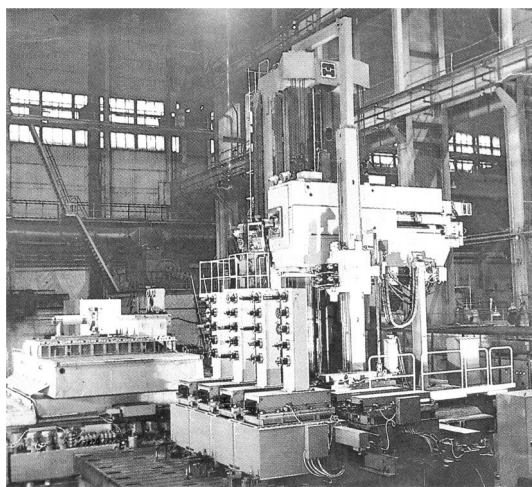


Рис. 1. Тяжелый многоцелевой станок сверлильно-фрезерно-расточной группы с поворотно-подвижным столом для обработки корпусных деталей массой до 200 т

нина и др.); несущие конструкции здесь имеют упрощенную геометрию поперечного сечения. В результате решения задачи устанавливается полный набор граничных условий (силовых, кинематических) для отдельной несущей конструкции, что позволяет далее рассматривать эти конструкции независимо друг от друга;

3) на этапе моделирования отдельной несущей конструкции получаем оптимальную конструкцию с реальной геометрией поперечного сечения и минимально возможной массой при удовлетворении граничных условий, полученных на втором этапе;

4) проводится динамический анализ или имитационное моделирование для типовых условий эксплуатации несущей системы с оптимальными несущими конструкциями.

Целью настоящей работы является расчет и анализ компоновочных решений для наиболее нагруженной несущей конструкции тяжелого многоцелевого станка (МС) сверлильно-фрезерно-расточной группы – стойки (рис. 2). Для достижения поставленной цели используются метод конечных элементов, методы оптимизации и методы сопротивления материалов.

МС представляет собой комплекс, состоящий из двух изделий, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций – спе-

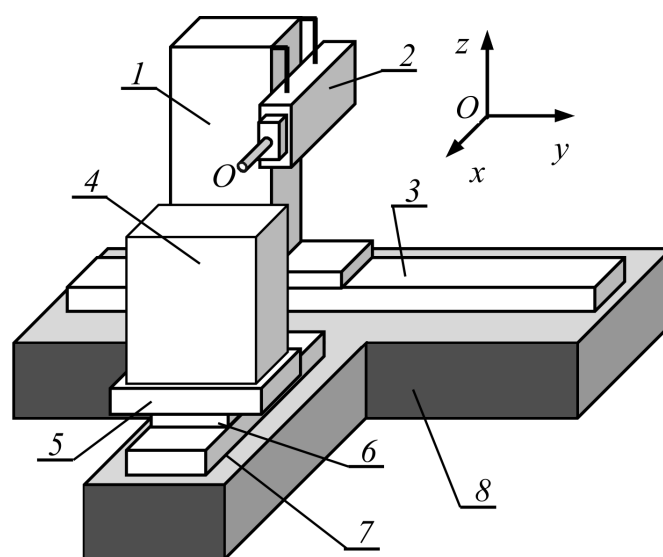


Рис. 2. Компоновка многоцелевого станка:

1 – стойка; 2 – шпиндельная бабка; 3 – станина; 4 – обрабатываемая деталь; 5 – паллета; 6 – сани стола; 7 – станина стола; 8 – фундамент

циального фрезерно-расточного станка (рис. 2, поз. 1–3) и поворотного-подвижного стола (рис. 2, поз. 5–7). Данное обстоятельство позволяет проводить расчеты отдельно для стола и фрезерно-расточного станка.

### Результаты и обсуждение

**1. Анализ реакций несущих конструкций в составе несущей системы фрезерно-расточного станка.** Несущие конструкции станка имеют сложную компоновку. Это – пространственные тонкостенные конструкции, имеющие различно ориентированные ребра жесткости, многосвязный замкнутый контур, разную толщину стенок, что затрудняет непосредственный анализ их реакций на внешние воздействия в составе несущей системы. Для сравнительной оценки эффективности выбора внешних габаритных размеров конструкций представим их упрощенной геометрией поперечного сечения. Так, в частности, в отличие от реальной (серийной) конструкции (рис. 3) стойка будет иметь прямоугольное коробчатое поперечное сечение без ребер жесткости – односвязный замкнутый профиль.

Расчетные условия для несущих систем станков выбираются на основе анализа опыта эксплуатации станков, близких по компоновке. При этом выявляются операции, в которых точность и производительность близки к предельным значениям. Для сверлильно-фрезерно-расточных станков такой операцией является торцовое фрезерование.

Ряд значений для расчета выбирается в качестве исходных в соответствии с техническим заданием на проектирование станка. В частности, станок должен обеспечить наибольшее усилие подачи 40 кН, для чистового фрезерования – 3 кН.

Расчетные условия для несущей системы станка следующие:

- шпиндельная бабка находится в крайнем верхнем положении при среднем положении стойки на станине, при этом вылеты шпинделя

(≤ 0,4 м) и ползуна (≤ 0,6 м) соответствуют предельным значениям;

- внешней нагрузкой для станка являются силы резания, приложенные в точке *O* оси шпинделя (см. рис. 2). Для составляющих сил резания принимается соотношение  $P_x : P_y : P_z = 0,5 : 1,0 : 0,7$ ;

- станина опирается на упругие опоры (64 опоры), жесткость которых принимается из расчета, что опора воспринимает нагрузку 40 кН при вертикальной деформации  $2 \times 10^{-5}$  м;

- учитывается податливость подвижных стыков: стойка – шпиндельная бабка, шпиндельная бабка – ползун, стойка – станина. Расчет перемещений т. *O* (рис. 2) в направлении осей *x*, *y*, *z* проводится для условий чистовой обработки на основе стержневой модели шероховатой поверхности [17]. В результате перемещения т. *O* шпинделя только от контактных деформаций в стыках по осям *x*, *y*, *z* составляют соответственно  $\delta_x = 13,89$  мкм;  $\delta_y = 8,11$  мкм;  $\delta_z = 5,45$  мкм.

Математическая модель несущей системы фрезерно-расточного станка формулируется как задача математического программирования:

минимизировать

$$f(X) = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i \quad (1)$$

при ограничениях:  
на напряжения

$$g_1 = 1 - \sigma_{\text{экв}} / [\sigma] \geq 0,$$

на перемещения т. *O* по оси

$$x \quad g_2 = 1 - \Delta_x / [\Delta_x] \geq 0,$$

$$y \quad g_3 = 1 - \Delta_y / [\Delta_y] \geq 0,$$

$$z \quad g_4 = 1 - \Delta_z / [\Delta_z] \geq 0,$$

на переменные проектирования  $g_5 = V_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n,$

где *n* – число пластинчатых конечных элементов;  $\rho$  – плотность материала; *V* – объем материала конструкции;  $\sigma_{\text{экв}}, [\sigma]$  – эквивалентное и допускаемое напряжения;  $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, [\Delta_x], [\Delta_y], [\Delta_z]$  – расчетные и допускаемые (в скобках) перемещения т. *O* по осям *x*, *y*, *z* соответственно.

За целевую функцию (1) принята масса конструкции. Переменной проектирования является толщина стенки профиля несущей конструкции.

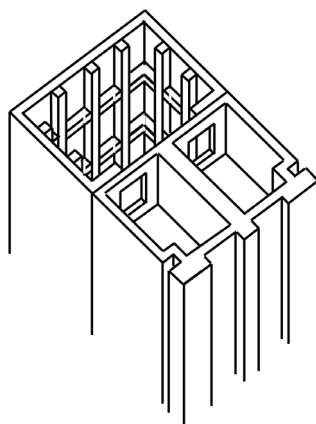


Рис. 3. Компоновка серийной стойки

При назначении допусковых перемещений  $[\Delta_x]$ ,  $[\Delta_y]$ ,  $[\Delta_z]$  для несущей системы в зоне обработки рассматриваются отклонения от плоскостности и прямолинейности на обработанной поверхности. Согласно ГОСТ 24643–81 для шестого качества при фрезеровании допуски плоскостности и прямолинейности составляют [18]:

- при вертикальном перемещении шпиндельной бабки (5 м) – 60 мкм;
- для поперечного хода стойки (до середины станины 4,5 м) – 60 мкм.

По заводским данным погрешность обработки в зоне резания распределяется между фрезерно-расточным станком и столом как 70 и 30 %. Из-за невозможности учета в расчете всех факторов, влияющих на точность обработки, принимаем коэффициент запаса по жесткости равным 1,5. Окончательно допуски плоскостности и прямолинейности для фрезерно-расточного станка составляют 28 мкм.

Перемещения т. О в зоне резания определяются суммой перемещений в результате собственных деформаций несущей системы и контактных деформаций в стыках. При расчете несущей системы из полученного допуска на перемещения т. О (28 мкм) вычитаются перемещения т. О, полученные в результате контактных деформаций. Окончательно получаем:

$$[\Delta_x] = 14,11 \text{ мкм}, [\Delta_y] = 19,89 \text{ мкм},$$

$$[\Delta_z] = 22,55 \text{ мкм}.$$

В процессе оптимизации несущей системы станка считаем, что перемещения в зоне об-

работки по координатным осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  должны быть меньше или равны соответствующим допускаемым перемещениям. Для принятой системы предпочтений эффективным считается вариант с наименьшей массой и перемещениями, равными или близкими допускаемым значениям.

Задача условной оптимизации (1) решается методом штрафных функций в форме ( $r$  – штрафной параметр)

$$\varphi(X, r) = f(X) + r \sum_{j=1}^J [1 / g_j(X)],$$

с использованием метода Давидона–Флетчера–Пауэлла для решения задачи безусловной оптимизации [13, 14].

На рис. 4 представлено деформированное состояние несущей системы фрезерно-расточного станка. Видно, что стойка испытывает совместное действие изгиба и кручения и является наиболее нагруженным элементом несущей системы станка. В таблице приведены результаты исследования несущей системы с различным исполнением базовых деталей для разных условий эксплуатации в сравнении с серийным исполнением.

*Типовые условия эксплуатации:* чистовая обработка, фреза торцовая диаметром 250 мм, число зубьев 20, глубина резания 0,5 мм, подача на зуб 0,05 мм, частота вращения шпинделя 170 мин<sup>-1</sup>.

Результаты расчетов показывают, что имеются возможности по улучшению компоновки базовых деталей по сравнению с их серийным

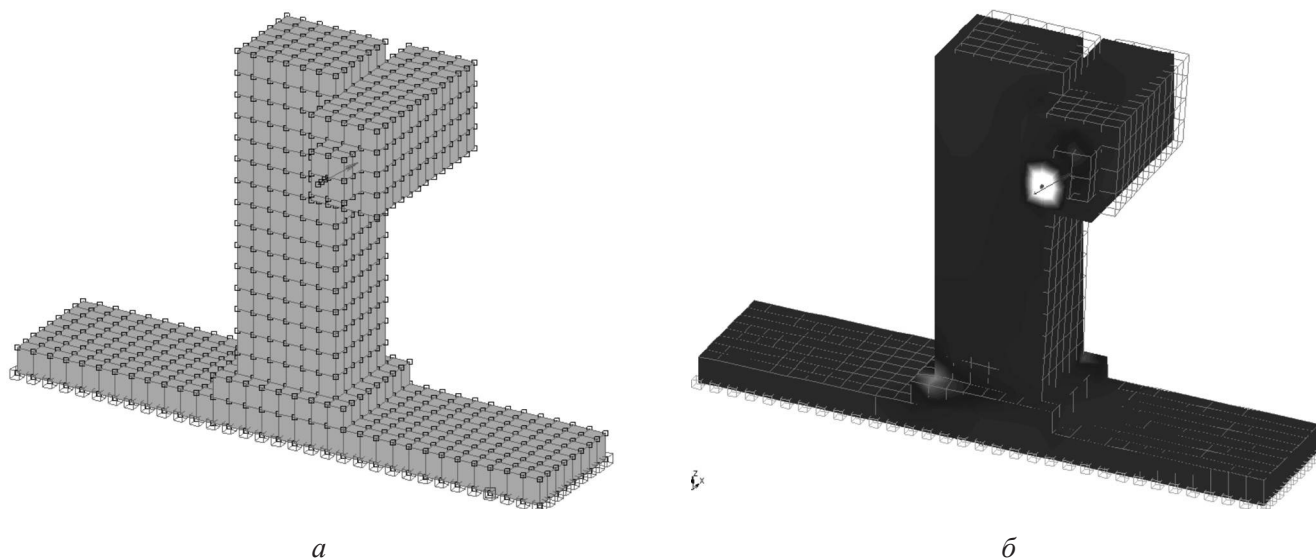


Рис. 4. Исходное (а) и деформированное (б) состояния станка



**Результаты расчета несущей системы**

Параметр	Условия эксплуатации					Типовые серийный
	Вариант	Предельные			расчетный	
серийный		расчетный				
Размеры поперечного сечения (в осях), м:						
– стойка ( $x-y$ )	2,0 · 2,46	2,3 · 2,3	2,46 · 2,46	1,8 · 2,6	1,6 · 2,8	2,0 · 2,46
– шпиндельная бабка ( $y-z$ )	1,3 · 2,20	1,8 · 1,9	1,30 · 2,20	1,7 · 2,0	1,7 · 2,0	1,3 · 2,20
– ползун ( $y-z$ )	0,6 · 0,80	0,7 · 0,7	0,80 · 0,80	0,8 · 0,8	0,8 · 0,8	0,6 · 0,80
Перемещения т. $O$ , мкм:						
– ось $x$ (норма 14,11)	7,34	6,75	6,43	9,51	9,58	6,28
– ось $y$ (норма 19,89)	19,89	19,89	19,89	19,89	19,89	19,89
– ось $z$ (норма 22,55)	11,58	11,74	11,56	12,10	12,69	11,20
Толщина стенки, мм:						
– плоскость $yz, xz$	98	94	96	99	98	71
– плоскость $xy$	146	162	147	107	106,7	99
Масса, т	169,9	179,7	181,0	158,2	157,2	119,3

исполнением. Для принятой системы предпочтений следует признать лучшим вариант несущей системы со стойкой с размерами поперечного сечения 1,8 м (по оси  $x$ ) и 2,6 м (по оси  $y$ ). Вариант несущей системы со стойкой 1,6×2,8 (м) отклонен по причине большой протяженности сечения стойки по оси  $y$ , так как это приводит к дальнейшему уменьшению рабочего хода (рабочего пространства) стойки по этой оси. Отметим, что в процессе оптимизации активным ограничением является перемещение т.  $O$  по оси  $y$ . Если при проектировании станка ориентироваться на типовые условия эксплуатации, то на примере расчета серийного варианта видно, что выигрыш по массе составляет около 30 % при сохранении норм точности на обработку.

## 2. Анализ компоновочных решений стойки

В конструкциях тяжелых МС колонкового типа стойка является одним из наиболее ответственных элементов несущей системы, находится в условиях сложного нагружения с большими крутящими и изгибающими моментами и работает как консоль без поддержки по длине со стороны фундамента. Серийная стойка (см. рис. 3) представляет собой пространственную

тонкостенную конструкцию, состоящую из двух частей, соединяющихся между собой посредством болтового соединения. Передняя часть стойки, имеющая направляющие для шпиндельной бабки, состоит из двух замкнутых контуров. Внутренняя полость задней части стойки содержит пересекающиеся продольные и поперечные ребра по всей высоте и служит для размещения противовеса (разгружает привод вертикального перемещения шпиндельной бабки от ее веса).

1. Для исследования многосвязного контура серийной стойки на крутильную жесткость изобразим упрощенное ее представление (рис. 5) и воспользуемся аналогией Прандтля [19]. В слу-

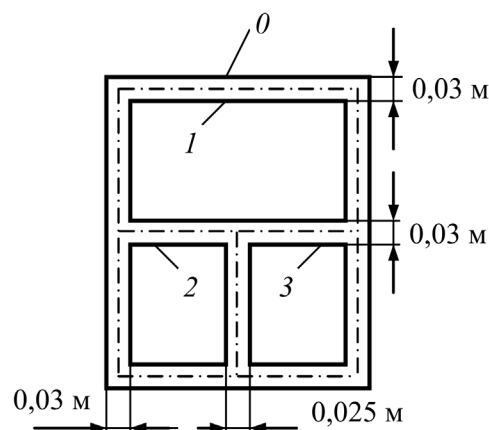


Рис. 5. Поперечное сечение стойки

чае  $n$ -связного поперечного сечения крутящий момент определяется по формуле

$$M = 2 \left( \iint \varphi dx dy + \sum_{i=1}^{n-1} \varphi_i F_i - \varphi_0 F_0 \right), \quad (2)$$

где  $\varphi$  – функция Прандтля;  $F_i, F_0$  – площади, ограниченные внутренними и наружными контурами. В рассматриваемом случае формула (2) принимает следующий вид:

$$M = 2 \sum_{i=1}^{n-1} f_i w_i = 2 \sum_{i=1}^{n-1} f_i \varphi_i,$$

где  $f_i$  – площадь, ограниченная контуром, всюду делящим толщину сечения в поперечном сечении пополам;  $w_i$  – функция поверхности провисания мембраны ( $w_i$  тождественна  $\varphi_i$ ). Относительный угол закручивания вычисляется по формуле

$$\theta = M / (GI_k),$$

где  $GI_k$  – жесткость поперечного сечения на кручение. На рис. 6 приведены результаты расчета по отношению к серийному варианту (рис. 6, а), жесткость на кручение которого принята за 100 %.

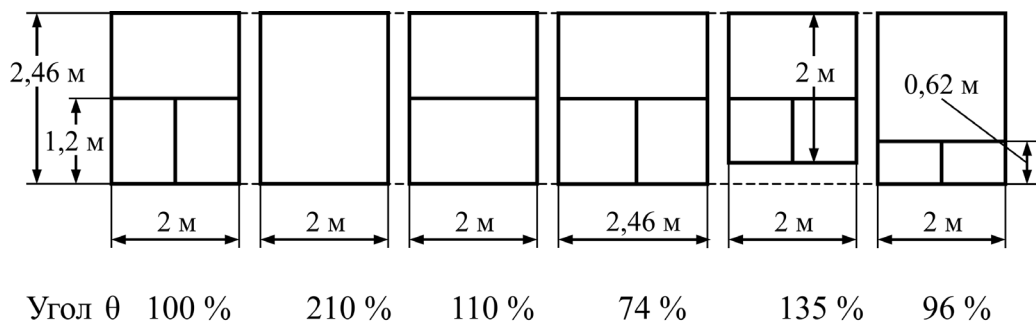


Рис. 6. Компоновки поперечного сечения стойки

Анализ результатов показывает, что в данных условиях наилучшей является стойка с квадратным поперечным сечением (рис. 6, з), у которой жесткость на кручение на 26 % выше по сравнению с серийным вариантом. Некоторое улучшение по жесткости имеет место и в случае, изображенном на рис. 6, е. На практике стойка выполняется также и с квадратным поперечным сечением 2×2 м (рис. 6, д). Однако жесткость сечения в этом случае на 35 % меньше жесткости на кручение серийного варианта.

2. Стойка может иметь различные варианты расположения ребер, которые в значительной степени определяют ее жесткость, а следовательно, и жесткость станка в целом. Для исследования влияния компоновки ребер на жесткость стойки рассмотрим ее упрощенную конструкцию. На рис. 7 показаны варианты расположения ребер (на передней стенке ребра отсутствуют). Расположение ребер в серийной конструкции изображено на рис. 7, а. Расчетная схема стойки моделирует все виды деформации серийной конструкции. Влияние стенок на перемещения узлов стойки для всех вариантов расположения ребер одинаково, так как конечно-

элементная схема позволяет иметь постоянную сетку для пластинчатых конечных элементов, моделирующих стенки стойки. Исходные данные для расчета: толщина стенки 0,04 м, толщина ребра 0,06 м, жесткое защемление стойки по нижнему контуру.

Если обозначить, например, угол поворота передней стенки, по которой скользит шпиндельная бабка, как  $\theta = |y_1 - y_2| / L_{12}$ , где  $y_1, y_2$  – линейное перемещение т. 1 и т. 2 соответственно по оси  $y$ ,  $L_{12}$  – расстояние между точками 1 и 2 (рис. 7),  $M$  – масса стойки, то получим следующие результаты:

компоновка ребер	$\theta, \%$	$\theta/M, \%$
рис. 7, а	100	100
рис. 7, б	70	70
рис. 7, в	100,3	124

Результаты расчета показывают, что серийная конструкция стойки с пересекающимися продольными и поперечными ребрами по всей высоте (рис. 7, а) тяжелее на 24 % стойки с диагонально пересекающимися ребрами (рис. 7, в) при равной жесткости и менее жесткая, чем стойка с диагонально пересекающимися продольными и

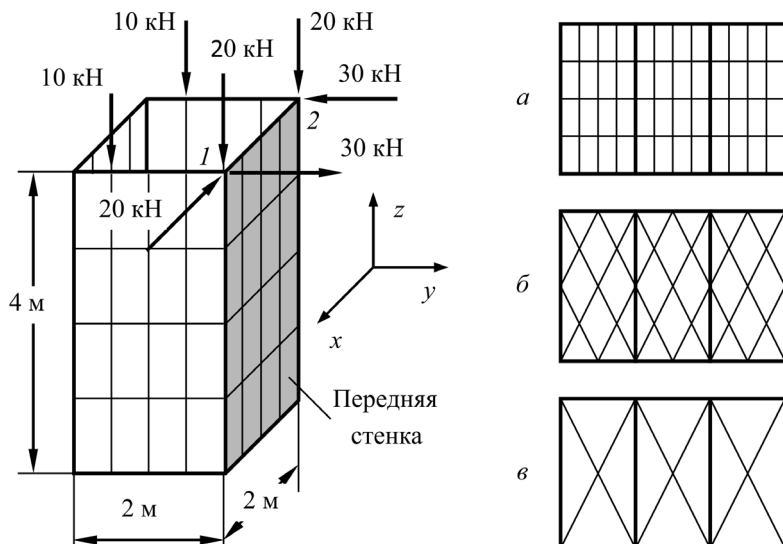


Рис. 7. Расчетная схема стойки и развертка полости стойки с разной компоновкой ребер жесткости

поперечными ребрами (рис. 7, б). Следовательно, при проектировании стойки предпочтение следует отдать наклонным ребрам. Как известно, влияние продольных ребер на перемещения от кручения весьма незначительно, а от изгиба – не превышают 10...20 %.

### Выводы

1. Результаты расчетов показывают, что имеются возможности по улучшению компоновки базовых деталей по сравнению с их серийным исполнением. Для принятой системы предпочтений определен лучший вариант несущей системы со стойкой, имеющей размеры поперечного сечения 1,8 м (по оси  $x$ ) и 2,6 м (по оси  $y$ ). Вариант несущей системы со стойкой 1,6×2,8 (м) отклонен по причине большой протяженности сечения стойки по оси  $y$ , так как это приводит к дальнейшему уменьшению рабочего хода (рабочего пространства) стойки по этой оси.

2. Исследования по влиянию расположения ребер жесткости показывают, что серийная конструкция стойки с пересекающимися продольными и поперечными ребрами (типа «вафельница») по всей высоте тяжелее на 24 % стойки с диагонально пересекающимися ребрами при равной жесткости и менее жесткая, чем стойка с диагонально пересекающимися продольными и поперечными ребрами. Следовательно, при проектировании стойки предпочтение следует отдать наклонным ребрам.

### Список литературы

1. Атапин В.Г. Расчет деформированного состояния фундамента тяжелого многоцелевого станка // Вестник машиностроения. – 1989. – № 6. – С. 31–32.
2. Витес Б.И., Гроссман В.М., Кравцов О.А. Проектирование корпусных деталей металлорежущих станков с использованием метода конечных элементов // Станки и инструмент. – 1991. – № 5. – С. 13–14.
3. Пахмутов В.А., Шалдыбин А.Я. Использование метода конечных элементов для анализа конструкций базовых деталей тяжелых станков // СТИН. – 1992. – № 2. – С. 11–13.
4. Lull B. Statische und dynamische berechnung von werkzeugmaschinengestellen // Maschinenbautechnik. – 1977. – Vol. 26, N 1. – P. 10–13.
5. Roscher A. Berechnung der dynamischen eigenschaften von werkzeugmaschinengestellen mit hilfe der methode der finiten elemente // Maschinenbautechnik. – 1978. – Vol. 27, N 4. – P. 156–160.
6. Haug E.J., Choi K.K., Komkov V. Design sensitivity analysis of structural systems. – Orlando, Florida: Academic Press, 1986. – 381 p. – (Mathematics in Science and Engineering; vol. 177).
7. Rao S.S., Grandhi R.V. Optimum design of radial drilling machine structure to satisfy static rigidity and natural frequency requirements // Journal of Mechanical Design. – 1983. – Vol. 105, iss. 2. – P. 236–241. – doi: 10.1115/1.3258515.
8. Reddy C.P., Rao S.S. Automated optimum design of machine-tool structures for static rigidity, natural frequencies and regenerative chatter stability // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 1978. – Vol. 100, iss. 2. – P. 137–146. – doi:10.1115/1.3439401.
9. Yoshimura M., Takeuchi Y., Hitomi K. Design optimization of machine-tool structures considering manufacturing cost, accuracy, and productivity // Journal of Mechanical Design. – 1984. – Vol. 106, iss. 4. – P. 531–537. – doi: 10.1115/1.3258606.
10. Каминская В.В., Гильман А.М., Егоров Ю.Б. Об автоматизированных расчетах оптимальных размеров деталей и узлов станков // Станки и инструмент. – 1975. – № 3. – С. 2–5.
11. Каминская В.В., Гильман А.М. Оптимизация параметров несущих систем карусельных станков // Станки и инструмент. – 1978. – № 10. – С. 6–7.
12. Хомяков В.С., Яцков А.И. Оптимизация несущей системы одностоечного токарно-карусельного станка // Станки и инструмент. – 1984. – № 5. – С. 14–16.

13. *Ravindran A., Ragsdell K.M., Reklaitis G.V.* Engineering optimization: methods and applications. – 2nd ed. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. – 688 p. – ISBN-10: 0-471-55814-1. – ISBN-13: 978-0-471-55814-9.

14. *Bunday B.D.* Basic optimisation methods. – London: Edward Arnold, 1984. – 136 p. – ISBN-13: 978-0-713-13506-0. – ISBN: 0-713-13506-9.

15. *Атапин В.Г., Пель А.Н., Темников А.И.* Сопротивление материалов. Базовый курс. Дополнительные главы: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 508 с. – (Учебники НГТУ). – ISBN 978-5-7782-1750-8.

16. *Атапин В.Г.* Проектирование несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков с учетом точности, производительности, массы // Вестник машиностроения. – 2001. – № 2. – С. 3–6.

17. *Демкин Н.Б.* Контактное шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.

18. *Гжиров Р.И.* Краткий справочник конструктора. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1983. – 464 с.

19. *Атапин В.Г., Пель А.Н., Темников А.И.* Сопротивление материалов: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 556 с. – (Учебники НГТУ). – ISBN 5-7782-0605-4.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1(66), January – March 2015, Pages 42–50

### Rational design of the column of a heavy multipurpose machining center

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

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

#### Abstract

The main purpose in the design of supporting constructions of heavy multipurpose machining center is the reduction of mass at the given precision and productivity of machining. Accomplish these ends the technology of rational design of supporting constructions is offered. This technology is based on the decomposition method and the finite elements method in the combination with optimization methods. The technology has four stages: 1) calculation (computation) of external all forces and loads, 2) as a result of the boundary conditions (force, kinematics) for individual supporting constructions are formed, 3) a problem about final optimal distribution of a material by the individual supporting constructions with the real cross-section is solved; 4) dynamic analysis. By the example of design of the column of a heavy multipurpose machining center the main stages of rational design of the individual supporting construction are shown. At a design stage of the carrying system consisting of load-bearing structures with simplified geometry, optimum overall dimensions of the column are identified. For the admitted system of preferences, it is necessary to accept the fact that the carrying system with the column with the sizes of cross section of 1.8 m (on an axis x) and 2,6 m (on an axis y) is the best. The analysis of the work of the column under the torsion condition with the use of method of mechanics shows that the column with square cross section = 2,46 · 2,46 m which rigidity on torsion is 26 % higher in comparison with a production version is the best. Results of calculation show that a production-release design of the column with longitudinal and transverse edges of rigidity is 24 % heavier than the column with the edges located on a diagonally at equal rigidity. However, the serial-hour less rigid than stand with slanted edges.

#### Keywords:

heavy multipurpose machining center, design, supporting constructions, column, finite elements method, optimization methods.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-42-50

#### References

1. *Atapin V.G.* Raschet deformirovannogo sostoyaniya fundamenta tyazhelogo mnogotselovogo stanka [Calculation of the deformed state of the foundation of a heavy multipurpose machine tool]. *Vestnik mashinostroeniya – Soviet Engineering Research*, 1989, no. 6, pp. 31–32. (In Russian)



2. Vites B.I., Grossman V.M., Kravtsov O.A. Proektirovanie korpusnykh detalei metallovezhushchikh stankov s ispol'zovaniem metoda konechnykh elementov [Design of body parts of machine tools using finite element method]. *Stanki i instrument – Russian Engineering Research*, 1991, no. 5, pp. 13–14. (In Russian)
3. Pakhmutov V.A., Shaldybin A.Ya. Ispol'zovanie metoda konechnykh elementov dlya analiza konstruktivnykh bazovykh detalei tyazhelykh stankov [Using the finite element method for structural analysis of basic parts heavy machinery]. *STIN – Russian Engineering Research*, 1992, no. 2, pp. 11–13. (In Russian)
4. Lull B. Statische und dynamische berechnung von werkzeugmaschinenstellen. *Maschinenbautechnik*, 1977, vol. 26, no. 1, pp. 10–13.
5. Roscher A. Berechnung der dynamischen eigenschaften von werkzeug-maschinengestellten mit hilfe der methode der finiten elemente. *Maschinenbautechnik*, 1978, vol. 27, no. 4, pp. 156–160.
6. Haug E.J., Choi K.K., Komkov V. *Design sensitivity analysis of structural systems*. Mathematics in Science and Engineering. Vol. 177. Orlando, Florida, Academic Press, 1986. 381 p.
7. Rao S.S., Grandhi R.V. Optimum design of radial drilling machine structure to satisfy static rigidity and natural frequency requirements. *Journal of Mechanical Design*, 1983, vol. 105, iss. 2, pp. 236–241. doi: 10.1115/1.3258515
8. Reddy C.P., Rao S.S. Automated optimum design of machine-tool structures for static rigidity, natural frequencies and regenerative chatter stability. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1978, vol. 100, iss. 2, pp. 137–146. doi:10.1115/1.3439401
9. Yoshimura M., Takeuchi Y., Hitomi K. Design optimization of machine-tool structures considering manufacturing cost, accuracy, and productivity. *Journal of Mechanical Design*, 1984, vol. 106, iss. 4, pp. 531–537. doi: 10.1115/1.3258606
10. Kaminskaya V.V., Gil'man A.M., Egorov Yu.B. Ob avtomatizirovannykh raschetakh optimal'nykh razmerov detalei i uzlov stankov [An automated calculation of the optimum sizes of parts and assemblies of machine tools]. *Stanki i instrument – Machines and Tooling*, 1975, no. 3, pp. 2–5. (In Russian)
11. Kaminskaya V.V., Gil'man A.M. Optimizatsiya parametrov nesushchikh sistem karusel'nykh stankov [Optimization of parameters of the bearing systems vertical lathes]. *Stanki i instrument – Machines and Tooling*, 1978, no. 10, pp. 6–7. (In Russian)
12. Khomyakov V.S., Yatskov A.I. Optimizatsiya nesushchei sistemy odnostoechnogo tokarno-karusel'nogo stanoka [Optimization of the support system of single-column vertical turning and boring lathe]. *Stanki i instrument – Soviet Engineering Research*, 1984, no. 5, pp. 14–16. (In Russian)
13. Ravindran A., Ragsdell K.M., Reklaitis G.V. *Engineering Optimization: methods and applications*. 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2006. 688 p. ISBN-10: 0-471-55814-1. ISBN-13: 978-0-471-55814-9
14. Bunday B.D. *Basic optimization methods*. London, Edward Arnold Publ., 1984. 136 p. ISBN-13: 978-0-713-13506-0. ISBN: 0-713-13506-9
15. Atapin V.G., Pel' A.N., Temnikov A.I. *Soprotivlenie materialov. Bazovyi kurs. Dopolnitel'nye glavy* [Strength of materials. Basic course. Additional chapters]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011. 508 p. ISBN 978-5-7782-1750-8
16. Atapin V.G. Proektirovanie nesushchikh konstruktivnykh tyazhelykh mnogotselevykh stankov s uchetom tochnosti, proizvoditel'nosti, massy [Structural design of heavy multi-task machines, taking into account the accuracy, performance, weight]. *Vestnik mashinostroeniya – Russian Engineering Research*, 2001, no. 2, pp. 3–6. (In Russian)
17. Demkin N.B. *Kontaktirovanie sherokhovatykh poverkhnostei* [Contacting rough surfaces]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 227 p.
18. Gzhairov R.I. *Kratkii spravochnik konstruktora* [Quick reference design]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1983. 464 p.
19. Atapin V.G., Pel' A.N., Temnikov A.I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2006. 556 p. ISBN 5-7782-0605-4

Received 13 January 2015

Revised 27 February 2015

Accepted 2 March 2015

# ХАРАКТЕР ПОВРЕЖДЕНИЙ ЦЕМЕНТОВАННЫХ И БОРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ДЕТАЛЯХ РЕЖУЩЕЙ ПАРЫ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ЩЕЛЕВОГО ПЕРФОРАТОРА\*

*Н.Б. ПУГАЧЕВА, доктор техн. наук, доцент  
Т.М. БЫКОВА, инженер  
(ИМАШ УрО РАН г. Екатеринбург)*

Поступила 3 декабря 2014  
Рецензирование 12 января 2015  
Принята к печати 29 января 2015

**Быкова Т.М.** – 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская 34,  
Институт машиноведения УрО РАН,  
e – mail: tatiana\_8801@mail.ru

Исследовано состояние поверхности ножей и осей режущей пары гидромеханического щелевого перфоратора, предназначенного для вскрытия буровых скважин с целью увеличения сроков их эксплуатации. Показано, что деградация боридного покрытия на углеродистой инструментальной стали происходит за счет развития окислительных процессов. Срок эксплуатации цементованных осей определяется толщиной упрочненного слоя. Максимальную долговечность показали боридные покрытия на осях из стали 4Х5МФС и для ножей из стали 6Х6В3МФС. При этом легирование боридом хрома основы приводит к повышению жаростойкости и пластичности защитного слоя с обеспечением высоких показателей износостойкости.

**Ключевые слова:** покрытие, бориды, микротвердость, пластическая деформация, диффузия.  
DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-51-59

## Введение

В связи с интенсификацией режимов эксплуатации машин и механизмов, повышением температур и давлений роль качества поверхности значительно возрастает. Надежность и долговечность деталей и узлов машин непосредственно связаны с качеством их поверхности, которое характеризуется геометрическими и физико-механическими параметрами. Это относится в первую очередь к рабочей поверхности, находящейся в процессе эксплуатации в контакте с другими твердыми поверхностями (подшипники качения и скольжения, втулки, зубчатые зацепления, режущий инструмент) или твердой, жидкой и газообразной средой (абразивные частицы,

быстротекущий поток жидкости или газа) [1]. В условиях контактного нагружения при любых видах изнашивания детали и узлы машин выходят из строя не вследствие поломок, а по причине недопустимого изменения размеров и формы, так как износ деталей всегда происходит с поверхности. В связи с этим структурное состояние и геометрические характеристики рабочих поверхностей машин и механизмов играют решающую роль в обеспечении их надежности и долговечности.

К наиболее распространенным способам упрочняющей обработки поверхности деталей относят способы химико-термической (ХТО), поверхностной термической, деформационной и деформационно-термической обработки, по-

\* Работа выполнена при частичной поддержке проекта фундаментальных научных исследований Уральского отделения РАН № 15-10-1-22.

верхностного легирования (лазерного, электроискрового), нанесения защитных и упрочняющих покрытий [2]. Поверхностное упрочнение металлообрабатывающего инструмента позволяет значительно повысить его служебные характеристики, долговечность, снизить расход высоколегированных инструментальных сталей и сплавов, уменьшить себестоимость обрабатываемых изделий. По сравнению с другими методами поверхностной обработки металлов (дробеструйный наклеп, накатка роликами, индукционная, газопламенная и электролитная закалка, лазерная обработка и т. д.) химико-термическая обработка, часто уступая им в производительности, имеет ряд существенных преимуществ [3–6]:

- 1) независимость от внешней формы изделия;
- 2) большое различие между свойствами сердцевины и поверхности;
- 3) последствия перегрева поверхности могут быть устранены последующей термической обработкой.

Основными параметрами цементации, азотирования и борирования являются температура нагрева и продолжительность выдержки при этой температуре [7]. Существенное значение для структуры и свойств упрочненного слоя имеют вид и химический состав насыщающей среды. При этом поверхностный упрочненный слой имеет хорошее сцепление с внутренней частью изделия. Наплавка или напыление покрытий, существенно отличающихся от основы по химическому составу, не всегда пригодны для упрочнения сильно нагруженных изделий, поскольку в процессе эксплуатации может происходить отслоение поверхностного слоя. Кроме того, в этом случае происходит изменение размеров деталей [8].

Цель работы – провести сравнительный анализ механизмов деградации упрочненных цементацией и борированием поверхностных слоев деталей режущей пары гидромеханического целевого перфоратора.

### Материалы и методы исследования

Исследованы упрочненные ХТО поверхностные слои на сталях марок 18ХГТ, У8, 4Х5МФС и 6Х6В3МФС. В работе исследовались три фрикционные пары после одинаковых условий

эксплуатации. Первая режущая пара – ось из мягкой конструкционной стали 18ХГТ после цементации и нож из стали У8 с диффузионным боридным покрытием. Вторая режущая пара – ось из стали 4Х5МФС и нож из стали 6Х6В3МФС с нанесенным на них диффузионным боридным покрытием. Третья режущая пара – нож из стали 6Х6В3МФС и ось из стали 4Х5МФС после проведения полного цикла упрочняющей обработки (диффузионного борирования, закалки и отпуска).

Процесс диффузионного борирования проводили в контейнере из нержавеющей стали с плавким затвором и крышкой (на рис. 1 представлен чертеж контейнера). При проведении процесса термодиффузионного борирования для приготовления порошковых насыщающих смесей используются следующие материалы:

карбид бора с зернистостью 6-16П по ГОСТ 3647–80;

окись алюминия безводная, ТУ 6-09-426-75, ГОСТ 8136–85;

калий тетрафтороборат, ТУ 6-09-5304-86.

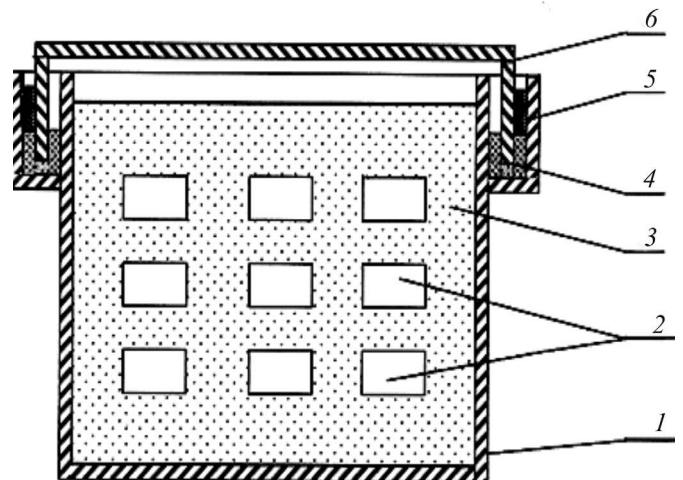


Рис. 1. Схема загрузки герметичного контейнера при термодиффузионном борировании в порошковых смесях:

1 – корпус контейнера; 2 – образцы или детали; 3 – рабочая порошковая смесь; 4 – отработанная порошковая смесь; 5 – силикатная крошка (плавкий затвор); 6 – крышка контейнера

Для просеивания порошков насыщающей смеси используют сито с размером ячейки не более 1 мм.

Герметичность контейнера обеспечивается за счет плавкого затвора, в качестве которого использовали жидкое стекло, размолотое до фрак-

ции (0,3...3) мм. Процесс термодиффузионного борирования проводили при температуре 900 °С, выдерживали 12 ч при этой температуре. После завершения выдержки при 900 °С печь следует выключить и охладить вместе с контейнером до комнатной температуры. Допускается выгрузить контейнер из печи при температуре 200...400 °С. При цементации детали загружали в стальной ящик с герметичным песчаным затвором. Укладка деталей производится таким образом, чтобы они были покрыты карбюризатором со всех сторон, не соприкасались друг с другом и стенками ящика. В качестве карбюризатора применяли смесь древесного угля с углекислыми солями ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$  и др.). Далее ящик герметично закрывается песчаным затвором и загружается в печь. Цементацию проводили по режиму : 900...950 °С, 20 ч выдержки.

Микроструктуру покрытий исследовали методами оптической металлографии на оптическом микроскопе Neophot 21 и растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA II XMU, оборудованном персональным компьютером и программным обеспечением VEGA TC. Локальный химический состав разных зон покрытий определяли с помощью системы рентгеновского волнодисперсионного (ВДС) микроанализа INCA WAVE 700, а характер распределения элементов – энергодисперсионного (ЭДС) микроанализа INCA ENERGY 450 с ADD-детектором и программным обеспечением INCA. Фазовый состав покрытий определяли на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-700 в монохроматизированном  $k_\alpha$ -излучении хромового анода. Микротвердость покрытий измеряли на инструментированном микротвердомере FISHERSCOPE 2000 *хут* с системой кинетического микроиндентирования. Твердость по Бринеллю измеряли в соответствии с требованиями ГОСТ 9012–59, по Роквеллу – ГОСТ 9013–59. Идентификацию микроструктуры сталей проводили по ГОСТ 8233–56, цементованных слоев – по ГОСТ 32.81–97 «Макро- и микроструктуры зубчатых колес тягового подвижного состава. Оценочные шкалы и порядок контроля». Строение боридных покрытий оценивали по ОСТ 24.977.01–82 «Борирование термодиффузионное штампового инструмента. Типовой технологический процесс» [9].

## Результаты и обсуждение

Первая исследованная фрикционная пара – ось из конструкционной стали 18ХГТ с цементованным поверхностным слоем и нож из инструментальной стали У8 с диффузионным боридным покрытием (рис. 2). В процессе эксплуатации на оси оказываются динамические нагрузки от 26,7 до 62,3 МН.



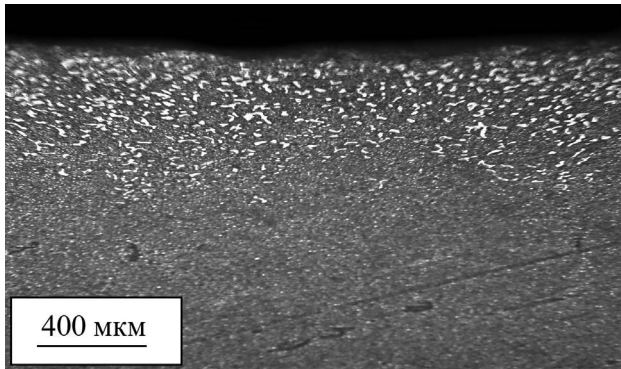
*a*



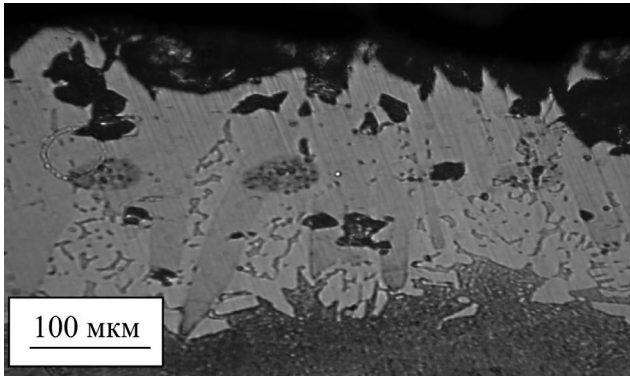
Рис. 2. Внешний вид цементованной оси из стали 18ХГТ (*a*); ножа из стали У8 с борированной поверхностью (*б*)

Толщина цементованного слоя на оси составила 2 мм, микротвердость 970...985  $\text{HV}_{0,05}$  (рис. 3, *a*). Такое состояние упрочненного слоя обеспечивает высокую износостойкость поверхности оси и препятствует адгезионному схватыванию с материалом ножа при эксплуатации [10]. Долговечность оси в этом случае будет определяться толщиной цементованного слоя, и когда он полностью разрушится в результате износа, вязкая сердцевина не выдержит высоких нагрузок. На поверхности боридного покрытия на стали У8 расположены столбчатые зерна боридов  $\text{Fe}_2\text{B}$  (серая фаза на рис. 3, *б*), под ним – бориды  $\text{Fe}_3\text{B}$ . Микротвердость внешнего слоя боридов составила 1285  $\text{HV}_{0,05}$ , твердость сердцевины – 46...47 HRC.





а



б

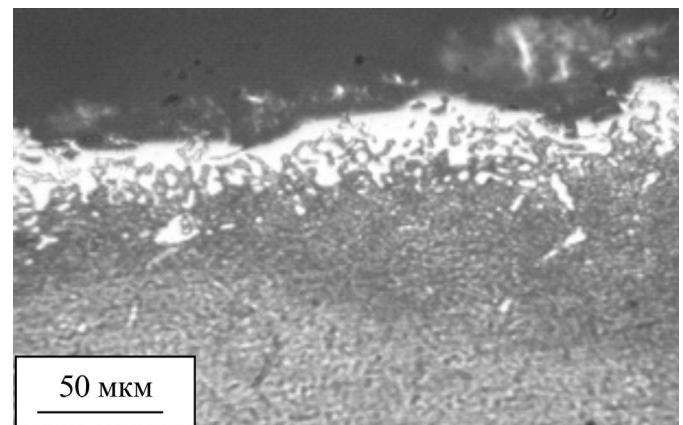
Рис. 3. Микроструктура цементованного слоя на оси из стали 18ХГТ (а); микроструктура боридного покрытия на ноже из стали У8 (б)

Анализ состояния поверхности первой режущей пары показал, что происходит сильный износ с изменениями размеров ножей и значительное окисление их поверхности с образованием сыпучей окалины  $Fe_2O_3$  [11–13]. На исследованном ноже оксид железа образовался непосредственно в покрытии, облегчая его выкрашивание при испытаниях (рис. 4, а).

Микротвердость покрытия на посадочной поверхности ножа –  $1400\text{ HV}_{0,02}$ , внешний слой боридов  $Fe_2B$  поврежден порами, в которых находятся оксиды железа. Поры повреждают покрытие практически на всю толщину, поэтому оно не может обеспечивать высокую износостойкость и легко скалывается при эксплуатации, сохранилась лишь переходная диффузионная зона с единичными боридами  $Fe_2B$  (рис. 4, б). Толщина боридного покрытия на боковой поверхности ножа – 0,18 мм, на режущей кромке – от 0,05 до 0,18 мм. На внутреннем отверстии (поверхность контакта с осью) толщина боридного покрытия не превышала 0,1 мм.

Ранее было показано, что повысить стойкость детали к окислению можно за счет леги-

рования его элементами основы, главным образом хромом [14]. Поэтому в качестве материалов для деталей режущей пары гидромеханического целевого перфоратора можно рекомендовать легированные стали, содержащие хром в количестве не менее 5 масс. %. Например, для ножей подходит сталь марки 6Х6В3МФС, а для осей 4Х5МФС – вторая режущая пара. Сталь 6Х6В3МФС разработана для ножей холодной резки. Отличительной особенностью ее являются повышенные значения теплостойкости за счет сбалансированного структурного состояния [15]. Сталь 4Х5МФС относится к штамповым сталям, которая в основном используется для мелких и крупных молотовых штампов и прессовых вставок при горячем деформировании конструкционных сталей и цветных сплавов в условиях крупносерийного и массового производства, а также пресс-форм литья под давлением цветных сплавов. На сталях боридные иглы фазы  $Fe_2B$  скругляются, более выражена переходная зона на границе с основой (рис. 5).



а

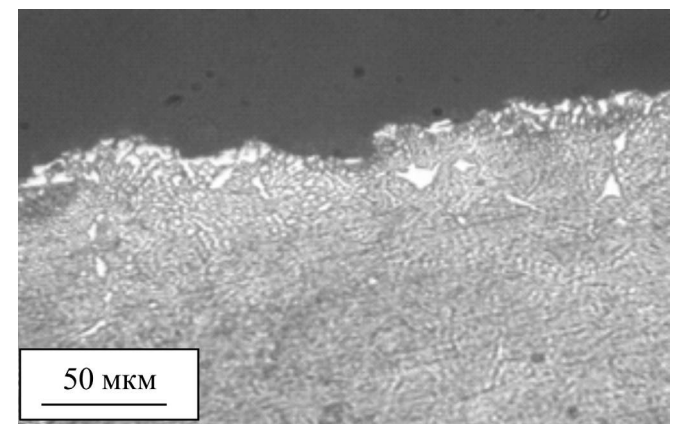
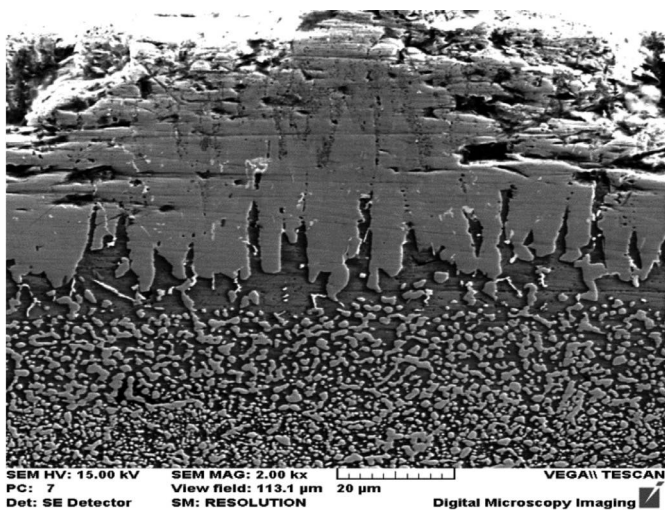


Рис. 4. Характер разрушения боридного покрытия на поверхности посадочного отверстия ножа из стали У8

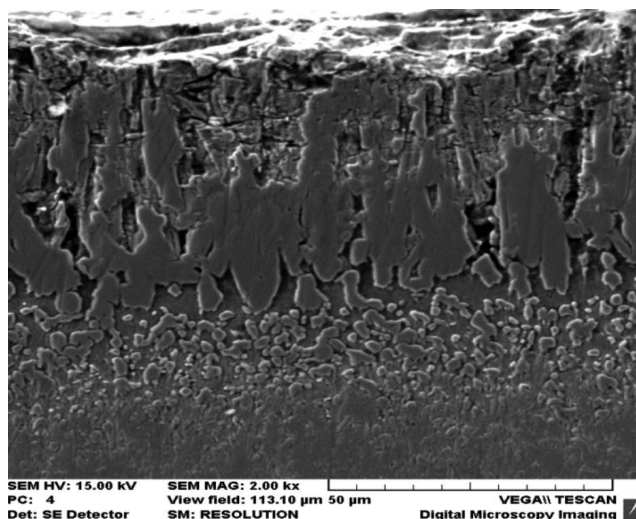
Фазы FeB и Fe<sub>2</sub>B содержат хром в количествах, близких его содержанию в стали-основе, т. е. по сути являются легированными боридами (Fe,Cr)B и (Fe,Cr)<sub>2</sub>B. Переходная зона на границе с основой представляет механическую смесь борированного феррита, в котором содержание бора плавно убывает до нуля, и глобулярных частиц боридов хрома и вольфрама (рис. 5 и таблица).

Исходя из фазового и химического состава боридного покрытия на сталях марки 6Х6В3МФС для ножа и 4Х5МФС для оси, можно ожидать,

что боридное покрытие будет обеспечивать повышенную износостойкость в течение всего времени, пока сохраняется на поверхности. После проведения диффузионного борирования толщина покрытия на ноже составляет 180 мкм с микротвердостью 1400 HV<sub>0,02</sub>, структура сердцевины представляет собой отпущенный мартенсит с твердостью 48 HRC. Толщина покрытия на оси 200 мкм с микротвердостью 1550 HV<sub>0,02</sub>, структура сердцевины представляет собой троосто-мартенсит с твердостью 38,5 HRC.



а



б

Рис. 5. Микроструктура диффузионного боридного покрытия:

а – на ноже из стали 6Х6В3МФС; б – на оси из стали 4Х5МФС

#### Параметры боридных покрытий на исследованных сталях

Марка стали	Содержание бора, масс %	Толщина, мкм	Фазовый состав
4Х5МФС	15–17	200	(Fe,Cr)B, (Fe,Cr) <sub>2</sub> B, CrB <sub>2</sub>
6Х6В3МФС	15–18	180	(Fe,Cr)B, (Fe,Cr) <sub>2</sub> B, W <sub>2</sub> B

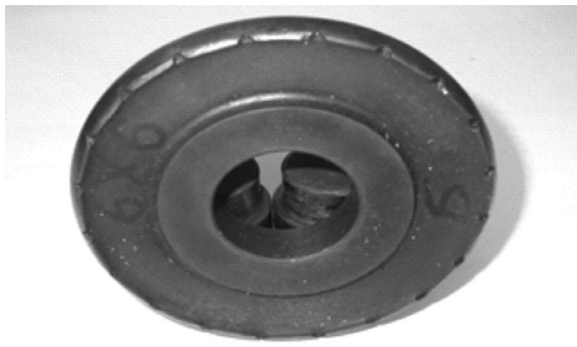
Когда поверхностный слой столбчатых боридов железа будет изношен полностью, в работу вступает зона на границе сталь – покрытие, содержащая большое количество глобулярных боридов хрома, молибдена, вольфрама, ванадия. Таким образом, эффективная толщина покрытия увеличивается на толщину этой переходной зоны и составляет 0,25 мм.

Если ограничиваться только проведением диффузионного борирования деталей режущей пары с нагружением до 44,5 МН, наблюдали

пластическое смятие зубьев ножа (рис. 6, а). Ось также пластически деформировалась на участке контакта с ножом – наблюдался адгезионный износ (рис. 6, б). Износ боридного покрытия на оси из стали 4Х5МФС и ноже из стали 6Х6В3МФС после эксплуатации представлен на рис. 7. Толщина покрытия составила 20 мкм с микротвердостью 400 HV<sub>0,02</sub>.

Проведение закалки ножей и осей после выполнения операции диффузионного борирования позволило получить весьма хорошие




*a*

*б*

Рис. 6. Внешний вид ножа изношенного с пластической деформацией зубьев (отмечена стрелкой), 6Х6В3МФС (*a*) и оси из стали 4Х5МФС с боридным покрытием после эксплуатации (*б*)

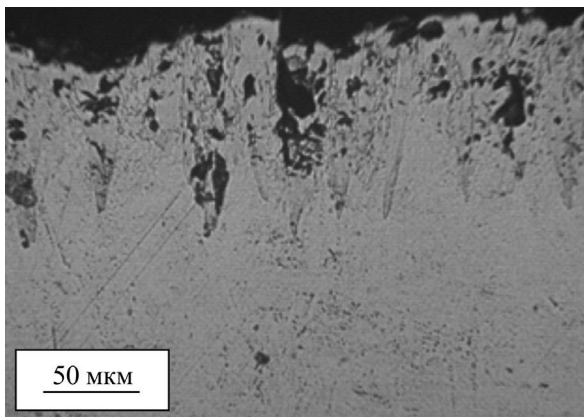
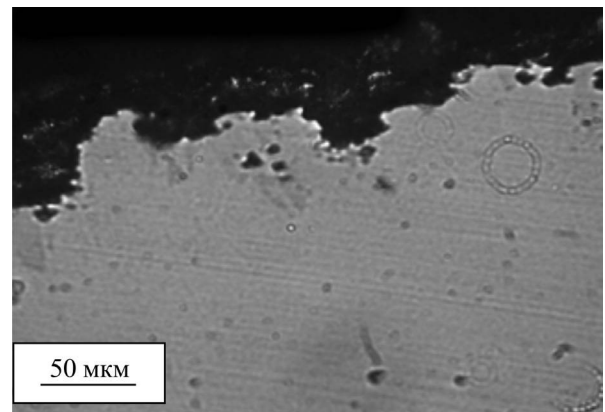

*a*

*б*

Рис. 7. Износ боридного покрытия:

*a* – на оси из стали 4Х5МФС; *б* – на ноже из стали 6Х6В3МФС

результаты: состояние поверхности деталей режущей пары сохранилось практически в исходном состоянии (рис. 8) – третья исследовательская пара. Термическая обработка для деталей третьей режущей пары проходила по режиму: подогрев 750 °С, закалка 1050 °С в масло для осей и на воздухе для ножей, первый отпуск при 540 °С и второй отпуск при 510 °С. Твердость сердцевины после полной термической обработки составила на осях 54...56 HRC, на ножах 60 HRC. Микротвердость боридного покрытия составила 1500...1600 HV<sub>0,02</sub>.

Следует отметить, что последующий высокотемпературный нагрев под закалку немного увеличивает толщину покрытия и выравнивает концентрацию бора в нем (рис. 9), что весьма полезно с позиций улучшения эксплуатационных свойств.

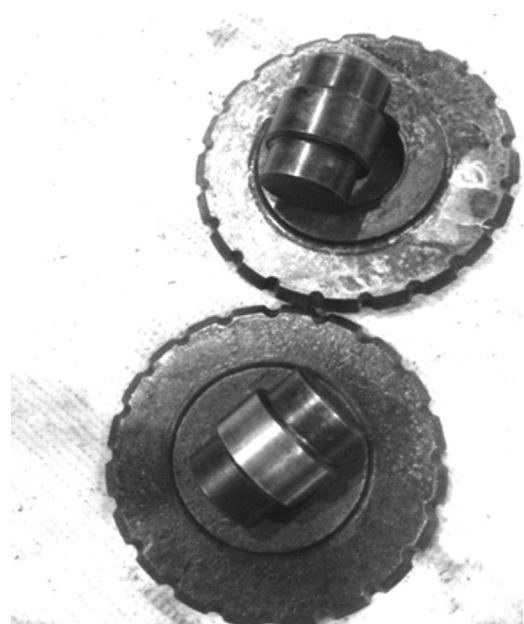
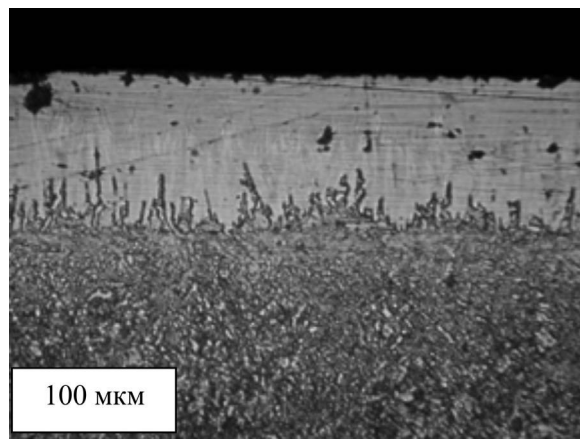


Рис. 8. Состояние поверхности режущих пар после эксплуатационных испытаний



а



б

Рис. 9. Микроструктура диффузионного боридного покрытия после закалки и отпуска:

а – на ноже из стали 6Х6В3МФС; б – на оси из стали 4Х5МФС

В этом случае в процессе эксплуатации в условиях трения фрагментированные частицы боридов с трудом вдавливаются в сталь-основу. Износостойкость покрытий после закалки заметно увеличилась. Причем твердость покрытий после закалки не изменилась, стала более твердой переходная зона и материал под покрытием.

### Выводы

В процессе работы исследованы три фрикционные пары гидромеханического щелевого перфоратора после вскрытия буровой скважины.

При эксплуатации исследованных деталей первой режущей пары – оси из стали 18 ХГТ и ножа из стали У8 – происходил сильный износ с изменениями размеров ножей и сильное окисление их поверхности с образованием сыпучей окалины  $Fe_2O_3$ . У деталей второй режущей пары – оси из стали 4Х5МФС и ножа из стали 6Х6В3МФС – после диффузионного борирования происходит пластическая деформация материала основы деталей режущей пары. У деталей третьей пары – ось из стали 4Х5МФС и нож из стали 6Х6В3МФС – после диффузионного борирования с полным циклом упрочняющей обработки закалки и отпуском получились весьма хорошие результаты, поверхность сохранилось почти в исходном состоянии. Таким образом, оптимальным способом упрочнения деталей режущей пары гидромеханического щелевого перфоратора представляется диффузионное борирование с полным циклом упрочняющей обработки закалки и отпуском.

### Список литературы

1. Ляхович Л.С., Ворошин Л.Г. Борирование стали. – М.: Металлургия, 1967. – 120 с.
2. Земсков Г.В., Коган Р.А. Многокомпонентное диффузионное насыщение металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 208 с.
3. Гузанов Б.Н., Косицын С.В., Пугачева Н.Б. Упрочняющие защитные покрытия в машиностроении. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 244 с. – ISBN 5-7691-1405-3.
4. Технология термической обработки стали / пер. с нем. В.В. Левина; под ред. М.Л. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1981. – 608 с.
5. Mevrel R. State of the art on high-temperature corrosion-resistant coatings // Materials Science and Engineering: A. – 1989. – Vol. 120–121, pt. 1. – P. 13–24. – doi: 10.1016/0921-5093(89)90713-2.
6. Структура и свойства однофазных боридных покрытий / А.Б. Колубаев, С.Ю. Тарасов, Г.В. Трусова, О.В. Сизова // Известия вузов. Черная металлургия. – 1994. – № 7. – С. 49–50.
7. Selected values of thermochemical properties of metals and alloys / R. Hultgren, R.L. Orr, D. Anderson, K.K. Kelley. – New York: J. Wiley & Sons, 1974. – 480 p.
8. Исаков М.Г., Прусаков Г.М., Щербединский Г.В. Исследование кинетики роста боридов в системе Fe-B и Fe-B-C // Известия АН СССР. Металлы. – 1987. – № 1. – С. 185–190.
9. Sarkar A.D. Wear of metals. – Oxford; New York: Pergamon Press, 1976. – xv, 164 p. – (International series in materials science and technology; vol. 18). – ISBN 0080197388. – ISBN 008019737X.
10. Стали и сплавы. Марочник: справочник / В.Г. Сорокин и др.; науч. ред. В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 608 с. – ISBN 5-89594-056-0.



11. Федосов С.А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием: современные зарубежные методики. – М.: Физический факультет МГУ, 2004. – 100 с. – ISBN 5-8279-0038-9.

12. Пугачева Н.Б., Быкова Т.М., Трушина Е.Б. Влияние состава-основы на структуру и свойства диффузионных боридных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 4. – С. 3–7.

13. Особенности разрушения диффузионного боридного покрытия на углеродистой стали в условиях термоциклирования под нагрузкой / Н.Б. Пугачева, Л.М. Замаараев, Е.Б. Трушина, Т.М. Гурченко,

А.Н. Замятин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 3. – С. 24–30.

14. Saunders S.R.J., Nicholls J.R. Coatings and surface treatments for high temperature oxidation resistance // Materials Science and Technology. – 1989. – Vol. 5, iss. 8. – P. 780–798. – doi: 10.1179/mst.1989.5.8.780.

15. Мелкова Г.А. Упрочнение инструмента нанесением износостойких покрытий: аналитический обзор / ВНИИ информации и технико-экономических исследований по машиностроению и робототехнике. – М.: ВНИИТЭМР, 1989. – 31 с.

## OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1(66), January – March 2015, Pages 51–59

### The degree of breakdown of the cemented and borated surfaces on details of the cutting pair of the hydromechanical slot perforator

**Pugacheva N.B.**, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, e-mail: nat@imach.uran.ru  
**Bykova T.M.**, Engineer, e-mail: tatiana\_8801@mail.ru

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

#### Abstract

In connection with the intensification of the operation of machines and mechanisms, elevated temperatures and pressures of the surfaces increases significantly. In terms of contact loading in all types of wear parts and machine components fail not due to failures, but because of an unacceptable change in size and shape, as always wear occurs on the surface. In this connection, the structural state and geometric characteristics of the working surfaces of machines and mechanisms play a crucial role in ensuring its reliability and durability. The condition of the surface of the cutting pair knives and axles of hydromechanical slot perforator designed for the opening of boreholes in order to increase their useful life is investigated. A strengthening thermochemical treatment of the surface layers of steel 18HGT, U8, 4H5MFS, 6H6V3MFS is studied. Three friction pairs after the same operating conditions are investigated. The first cutting pair is presented by the axle of mild structural steel 18HGT after cementation and knife of carbon steel U8 with diffusion boride coatings. The second cutting pair is presented by the axle of steel 4H5MFS and knife of steel 6H6V3MFS with the diffusion boride coating. The third cutting pair is presented by the knife made of steel 6H6V3MFS and the axle made of steel 4H5MFS after a full cycle of strengthening treatment (diffusion borating, quenching and tempering). It is shown that the degradation of the boride coating on carbon tool steel takes place in response to the development of oxidative processes. The service life of cemented axles is determined by the thickness of the hardened layer. Maximum durability have boride coatings on axles made of steel 4H5MFS and knives made of steel 6H6V3MFS. In this case, the chromium boride doping of the bases leads to increased heat resistance and ductility of the protective layer that ensures high durability. It is shown that diffusion borating with a full cycle of strengthening treatment (quenching and tempering) is the best way to strengthen a cutting pair of hydromechanical slot perforator.

#### Keywords:

coatings, borides, microhardness, plastic deformation, diffusion.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-51-59

## References

1. Lyakhovich L.S., Voroshnin L.G. *Borirovanie stali* [Boriding steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1967. 120 p.
2. Zemskov G.V., Kogan R.A. *Mnogokomponentnoe diffuzionnoe насыщение металлов и сплавов* [Multicomponent diffusion saturation of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 208 p.
3. Guzanov B.N., Kositsyn S.V., Pugacheva N.B. *Uprochnyayushchie zashchitnye pokrytiya v mashinostroenii* [Hardening protective coatings in engineering]. Yekaterinburg, Ural Branch of Russian Academy of Sciences Publ., 2004. 244 p. ISBN 5-7691-1405-3
4. Bernst R., Eckstein H.-J. et al. *Technologie der wärmebehandlung von stahl* [Heat treatment technology of steel]. Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1976. 577 p. (Russ. ed.: Bernst R., Eckstein H.-J. et al. *Tekhnologiya termicheskoi obrabotki stali* [Heat treatment technology of steel]. Translated from German by V.V. Levin, edited by M.L. Bernshtein. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 608 p.).
5. Mevrel R. State of the art on high-temperature corrosion-resistant coatings. *Materials Science and Engineering: A*. 1989, vol. 120–121, pt. 1, pp. 13–24. doi: 10.1016/0921-5093(89)90713-2
6. Kolubaev A.B., Tarasov S.Yu., Trusova G.V., Sizova O.V. Структура и свойства одnofазных боридных покрытий [Structure and properties of single-phase boride coatings]. *Izvestiya vuzov. Chernaya Metallurgiya – Steel in Translation*, 1994, vol. 24, iss. 7, pp. 49–50. (In Russian)
7. Hultgren R., Orr R.L., Anderson D., Kelley K.K. *Selected values of thermochemical properties of metals and alloys*. New York, J. Wiley & Sons, 1974. 480 p.
8. Isakov M.G., Prusakov G.M., Shcherbedinskii G.V. Исследование кинетики роста боридов в системе Fe-B и Fe-B-C [Investigation into kinetics of borides growth in Fe-B and Fe-B-C systems]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya Metally – Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Series: Metals*, 1987, no. 1, pp. 185–190.
9. Sarkar A.D. *Wear of metals. International series in materials science and technology*. Vol. 18. Oxford, New York, Pergamon Press, 1976. xv, 164 p. ISBN 0080197388. ISBN 008019737X
10. Sorokin V.G., Gervas'ev M.A., eds. *Stali i splavy. Marochnik. Spravochnik* [Steels and alloys. Grades and specifications. Handbook]. Moscow, Intermet Engineering Publ., 2001. 608 p. ISBN 5-89594-056-0
11. Fedosov S.A., Peshek L. *Opreделение механических свойств материалов микроиндентированием: современные зарубежные методики* [Determination of mechanical properties of materials microindentation: modern foreign methods]. Moscow, Faculty of Physics, Moscow State University Publ., 2004. 100 p. ISBN 5-8279-0038-9
12. Pugacheva N.B., Bykova T.M., Trushina E.B. Влияние состава-основы на структуру и свойства диффузионных боридных покрытий [The steel-basis structure influence on the diffusion boride coatings structure and properties]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya – Strengthening Technologies and Coatings*, 2013, no. 4, pp. 3–7.
13. Pugacheva N.B., Zamaraev L.M., Trushina E.B., Gurchenko T.M., Zamyatin A.N. Особенности разрушения диффузионного боридного покрытия на углеродистой стали в условиях термосиклирования под нагрузкой [The features of destruction by the diffusion boride coating on the carbon constructional steel in thermo-cycling under loading conditions]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya – Strengthening Technologies and Coatings*, 2011, no. 3, pp. 24–30.
14. Saunders S.R.J., Nicholls J.R. Coatings and surface treatments for high temperature oxidation resistance. *Materials Science and Technology*, 1989, vol. 5, iss. 8, pp. 780–798. doi: 10.1179/mst.1989.5.8.780
15. Melkova G.A. *Uprochnenie instrumenta naneseniem iznosostoikikh pokrytii* [Hardening tool by hardfacing]. Moscow, VNIITEMR Publ., 1989. 31 p.

## Funding

The reported study was partially supported by the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, fundamental scientific research project No. 15-10-1-22.

Received 3 December 2014

Revised 12 January 2015

Accepted 29 January 2015

# ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЧУГУННЫХ ИЗДЕЛИЙ ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ ДИФфуЗИОННЫХ ТИТАНОВЫХ ПОКРЫТИЙ

*А.Г. СОКОЛОВ, доктор техн. наук, профессор  
Э.Э. БОБЫЛЁВ, аспирант  
(КубГТУ, г. Краснодар)*

Поступила 17 декабря 2014  
Рецензирование 12 января 2015  
Принята к печати 29 января 2015

Соколов А.Г. – 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2,  
Кубанский государственный технологический университет,  
e-mail: Sag-51@bk.ru

Приведен анализ причин выхода из строя чугунных изделий. Рассмотрены причины снижения износостойкости изделий из чугунов. Приведены результаты исследований процесса диффузионного титанирования чугунов из среды легкоплавких жидкометаллических растворов. Описана технология, обеспечивающая формирование на чугунах качественных работоспособных износостойких титановых покрытий. Толщина покрытия, формируемого за два часа, составила более 30 мкм. Микротвердость покрытия составила 25 000 МПа, микротвердость основы 4000 МПа. При этом в отличие от титанирования, проводимого без обезуглероживания, под покрытием образуется переходной слой пониженной твердости. Твердость этого переходного слоя составляет 3200 МПа. Исследовано влияние диффузионного титанирования на износостойкость чугунных изделий; микроструктура и состав полученных диффузионных титановых покрытий; трибологические свойства титановых покрытий, а также трибологические свойства пар трения. Оптимальной парой трения с точки зрения трибологических свойств является пара трения, в которой неподвижная деталь имеет покрытие. В этом случае линейный износ покрытой детали с титановым покрытием равен нулю, а непокрытый образец изнашивается на 0,02 мм.

**Ключевые слова:** диффузионные титановые покрытия, чугунные изделия, свойства покрытий, обезуглероживание, повышение износостойкости, трибологические свойства.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-60-68

## Введение

Чугун является весьма распространенным конструкционным материалом, из которого изготавливается большое количество корпусных изделий. Он применяется в узлах, где присутствует трение скольжения. Такая распространенность чугунов обусловлена экономическими, технологическими и в ряде случаев их эксплуатационными свойствами. Чугуны значительно дешевле сталей, они обладают высокими литейными свойствами, а также им присущи антифрикционные свойства, которые связаны с наличием в них графитовых включений [1]. Однако работоспособность чугунов в парах трения

значительно ограничена действующими в них нагрузками и скоростями. При повышении нагрузок и скорости движения деталей в парах трения износостойкость чугунного элемента в них резко снижается. Снижению износостойкости также способствует коррозионное воздействие рабочей среды, которое наиболее интенсивно проявляется при возникновении сухого трения. Так как износостойкость изделий определяется свойствами их поверхностных слоев, то стойкость к износу чугунных изделий (особенно в присутствии агрессивного воздействия рабочей среды) может быть повышена путем нанесения на их поверхность покрытий, обеспечивающих высокую твердость и коррозионную стойкость

поверхностных слоев изделий [2–3]. Такими покрытиями являются диффузионные титановые покрытия.

Известно несколько способов получения титановых покрытий на чугунах [4–9]. Однако все эти способы обладают следующими недостатками: применение специального оборудования; использование дорогого порошкообразного титана; использование хлоридов или фторидов титана; большая длительность процесса; малая толщина покрытия; высокие потери диффузанта и др. Указанных недостатков лишена технология диффузионного легирования из среды легкоплавких жидкометаллических растворов. Однако процесс нанесения диффузионных титановых покрытий на чугуны имеет проблематичный характер, что обусловлено формированием на них очень хрупких, состоящих из карбида титана покрытий [10], которые скалываются с поверхности чугуна даже при его охлаждении после процесса титанирования (рис. 1).

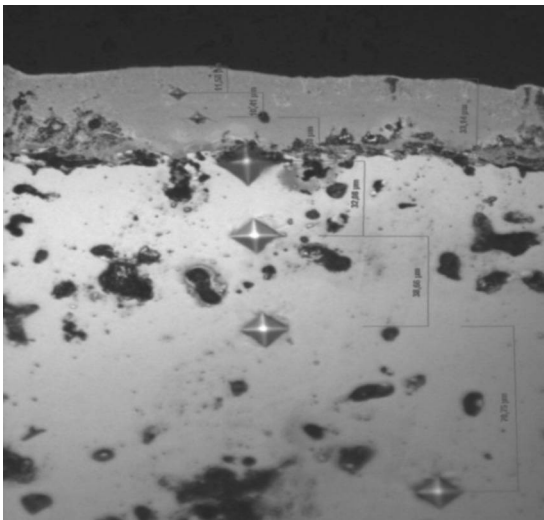


Рис. 1. Микроструктура титанового покрытия, полученного на чугунах СЧ 26, после предварительного обезуглероживания его поверхности

Для обеспечения возможности формирования на чугунах качественных работоспособных покрытий, обеспечивающих повышение износостойкости и коррозионной стойкости, нами разработана и запатентована технология [11], включающая проведение перед процессом нанесения титановых покрытий обезуглероживающего отжига поверхностных слоев чугунных изделий. Проведение обезуглероживающего от-

жига приводит к снижению концентрации углерода в поверхностных слоях чугунных изделий до 1...1,5 %, т. е. на поверхности чугунов формируется слой стали. При таком содержании углерода, используя соответствующие режимы диффузионной металлизации, можно получать двухфазные покрытия, состоящие из карбида титана с твердорастворной связкой на базе  $\alpha$ -Ti, которые не обладают хрупкостью и имеют высокую износостойкость и коррозионную стойкость [12–14]. Таким образом, процесс диффузионного титанирования чугунов состоит из двух стадий: 1-й стадии – отжиг чугунных изделий в окислительной среде и 2-й стадии – диффузионной металлизации (диффузионного титанирования).

Целью исследований, описываемых в данной статье, является оценка влияния диффузионного титанирования чугунных изделий, в частности, гильз и колец цилиндропоршневых групп двигателей внутреннего сгорания на их износ, а также анализ трибологических свойств данных пар трения.

### Методика исследования

В качестве исследуемого материала выбран чугун СЧ26, используемый для изготовления гильзы двигателя ЗМЗ-406. Исследование влияния диффузионного титанирования на износостойкость чугунных изделий и на трибологические свойства пар трения «чугун по чугуну», «чугун по чугуну с титановым покрытием» и «чугун с титановым покрытием по чугуну с титановым покрытием» проводились на машине трения СМЦ-2 с применением образцов типа «колодка – ролик».

Процесс диффузионного титанирования образцов осуществляется по рассмотренной ранее технологии [11] в две стадии. На первой стадии образцы подвергаются отжигу в кислородсодержащей среде длительностью от 3 до 10 часов при температуре 800...950 °С, а на второй – диффузионному титанированию в легкоплавком расплаве, содержащем свинец-висмут-литий-титан [10]. Температура процесса титанирования варьировалась от 1000 до 1120 °С. Благодаря введению в технологический процесс стадии предварительного отжига чугунных изделий в кислородсодержащей среде происходит снижение концентрации углерода в поверхностных



слоях изделий, вследствие этого при последующей металлизации (насыщении) на изделии формируется покрытие, которое помимо карбида содержит и твердорастворную связку. Такие покрытия обладают высокой износостойкостью и в то же время достаточной вязкостью, исключая скалывание, растрескивание и разрушение покрытий от внешнего механического воздействия. Таким образом, обеспечивается возможность формирования на поверхности чугунных изделий качественных, работоспособных покрытий, обеспечивающих повышение их износостойкости.

Микроструктура (без травления) титанового покрытия, полученного по предлагаемой нами технологии, включающей стадию предварительного обезуглероживания поверхностных слоев чугуна путем окислительного отжига, представлена на рис. 1. Анализ микроструктуры и распределения микротвердости по покрытию, переходной зоне и основе показывает (рис. 2), что обезуглероживание поверхностных слоев чугуна перед титанированием обеспечивает формирование на его поверхности равномерного бездефектного покрытия значительной для данного типа покрытий толщиной более 30 мкм за два часа.

Микротвердость покрытия составила  $H_{50} = 25\ 000$  МПа, микротвердость основы 4000 МПа. При этом в отличие от титанирования, проводимого без обезуглероживания, под покрытием

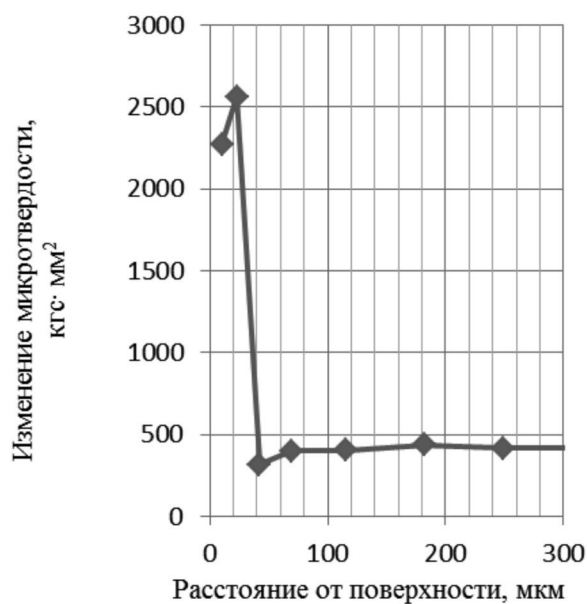


Рис. 2. Микротвердость покрытия и приповерхностной зоны при нагрузке 50 граммов, х500

образуется переходной слой пониженной твердости. Твердость этого переходного слоя составляет  $H_{50} = 3200$  МПа.

Как следует из анализа микроструктуры чугуна, представленного на рис. 3, за счет предварительного отжига под покрытием формируется достаточно протяженный обезуглероживанный слой толщиной порядка 600 мкм, в котором отсутствует пластинчатый графит.

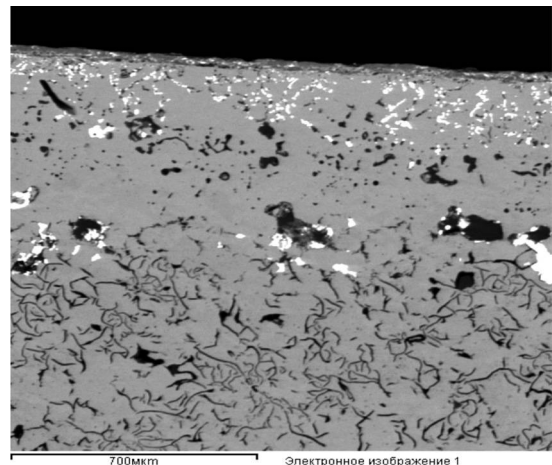


Рис. 3. Микроструктура титанового покрытия, обезуглероживанного слоя и основы. Чугун СЧ 26, титанирование после предварительного обезуглероживания его поверхности

Качество и свойства получаемых покрытий, кроме химического состава чугуна и толщины изделия, при использовании предлагаемой технологии зависят от длительности процесса предварительного отжига и его температуры.

Исследования влияния параметров и состава титановых покрытий на трибологические свойства покрытых чугунных изделий проводились путем проведения сравнительных испытаний на образцах типа «колодка – ролик», изготовленных из чугуна марки СЧ 26 установленных геометрических размеров. При этом исследовались трибологические свойства образцов без покрытий и с титановыми покрытиями при различном сочетании пар трения – колодка и ролик без покрытия; колодка и ролик с титановым покрытием; колодка с титановым покрытием и ролик без покрытия; колодка без покрытия и ролик с титановым покрытием. Покрытия наносились из расплава свинец-висмут-литий-титан по ранее оптимизированному режиму. Образцы перед нанесением покрытий были подвергну-

ты обезуглероживающему отжигу. В результате титанирования на поверхности образцов образовывались покрытия на базе карбида титана с  $\alpha$ -титановой связкой.

При испытаниях в качестве смазки использовалось индустриальное масло И20А. В ходе испытаний измерялась температура в зоне трения, а также коэффициент трения. Также замерялась шероховатость поверхности до и после испытаний.

### Результаты и обсуждение

Анализ результатов проведенных испытаний показывает, что титановые покрытия, нанесенные на чугун, обеспечивают чугунным деталям высокую износостойкость. Как показали проведенные исследования, при одинаковых условиях испытаний линейный износ деталей с титановыми покрытиями равен нулю. В то же время на образцах без покрытия наблюдался интенсивный износ.

При этом необходимо отметить, что трибологические свойства пар трения в значительной степени зависят от их сочетания. В парах трения, состоящих из деталей с покрытием и без покрытия, их износ и трибологические свойства зависят от наличия покрытия на подвижной или неподвижной деталях (рис. 4–8).

Оптимальной парой трения с точки зрения трибологических свойств является пара трения, в которой неподвижная деталь имеет покрытие. В этом случае линейный износ покрытой детали

с титановым покрытием равен нулю, а непокрытый образец изнашивается на 0,02 мм. В такой паре трения присутствует период приработки, который приводит к снижению коэффициента трения до уровня 0,015, после чего наступает период стабильной работы. О наличии стабилизации процессов в паре трения свидетельствует и стабилизация прироста температуры смазывающей среды. О наличии процесса приработки и стабилизации процесса износа на участке безыносности [15] говорят и характеристики шероховатости трущихся поверхностей.

В паре трения, в которой титановое покрытие нанесено на подвижную деталь, а неподвижная деталь не покрыта, наблюдается более интенсивный износ непокрытой детали. Так, если линейный износ подвижной детали с титановым покрытием составил ноль миллиметров, то линейный износ непокрытой неподвижной детали за период испытаний составил 0,76 мм.

В такой паре трения коэффициент трения значительно выше. После периода приработки коэффициент трения равен 0,027, т. е. в 1,8 раза больше, чем в паре трения, в которой неподвижная деталь имеет покрытие.

Кроме повышения линейного износа непокрытой детали и коэффициента трения в паре покрытая подвижная деталь – непокрытая неподвижная после приработки пары трения практически отсутствует период стабильной безыносной работы, о чем свидетельствует анализ зависимости прироста температуры от времени испытания.

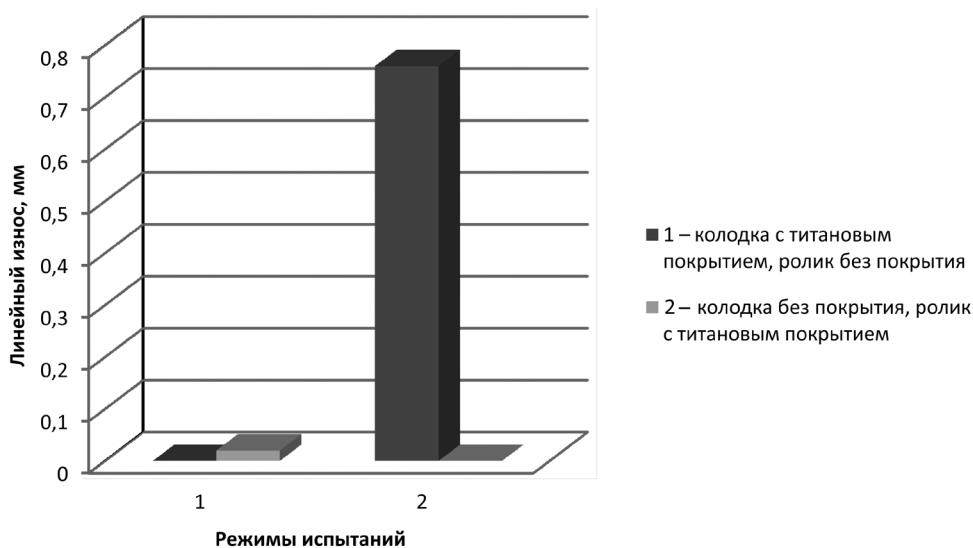


Рис. 4. Влияние титановых покрытий на износостойкость чугуна

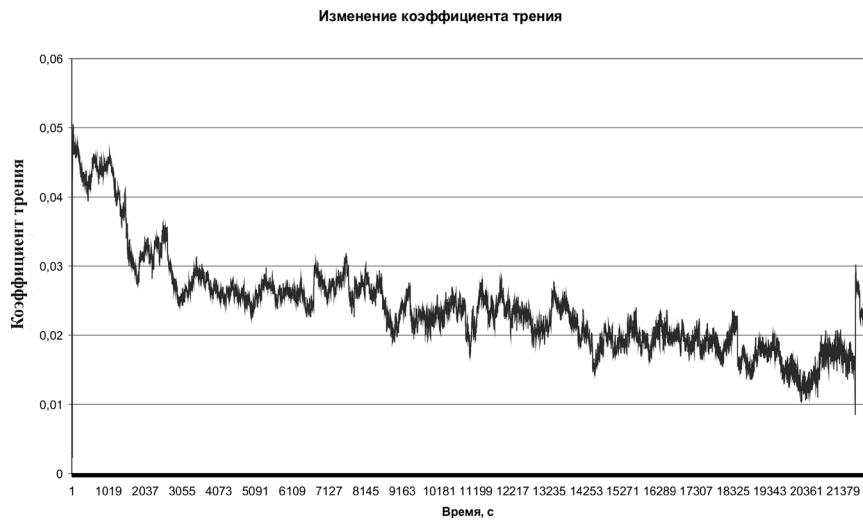


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от времени испытания Колодка с титановым покрытием, ролик без покрытия

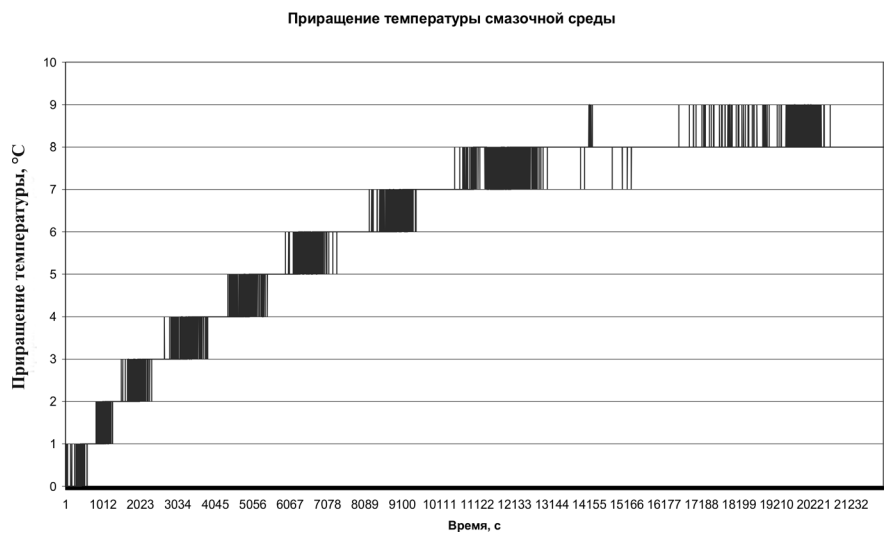


Рис. 6. Зависимость приращения температуры смазочной среды от времени. Колодка с титановым покрытием, ролик без покрытия

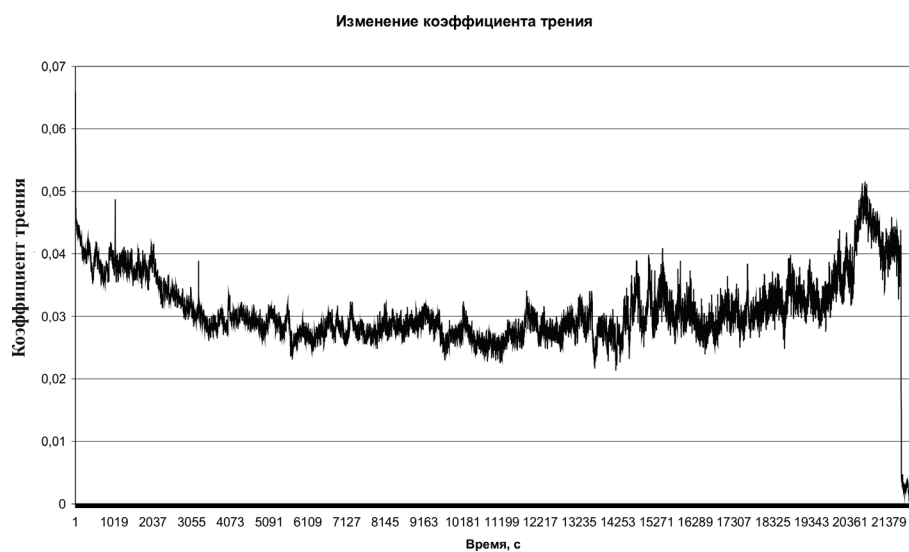


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения от времени испытания Колодка без покрытия, ролик с титановым покрытием

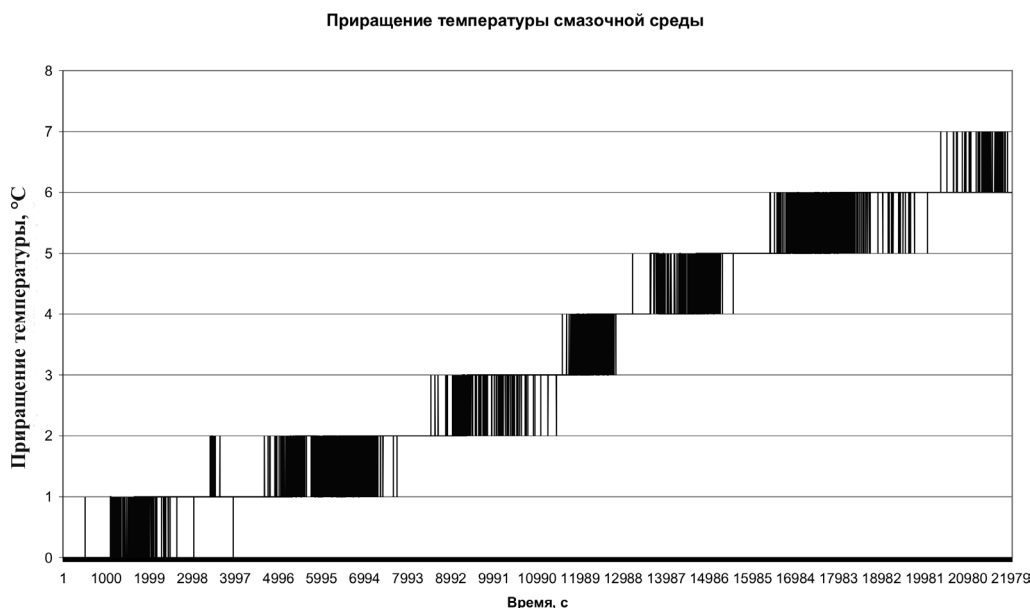


Рис. 8. Зависимость приращения температуры смазочной среды от времени Колodka без покрытия, ролик с титановым покрытием

## Выводы

Проведенные исследования показали следующее:

- для формирования качественных титановых покрытий на чугунах перед нанесением покрытий необходимо проведение обезуглероживания поверхностных слоев чугуна, которое может проводиться в виде обезуглероживающего отжига;

- титановые покрытия, нанесенные на чугун, обеспечивают чугунным деталям высокую износостойкость, линейный износ деталей с титановыми покрытиями равен нулю при работе в паре с непокрытым чугуном;

- трибологические свойства пар трения, состоящих из деталей с покрытием и без покрытия, зависят от наличия покрытия на подвижной или неподвижной деталях. При нанесении титановых покрытий на неподвижную деталь пары трения наблюдается минимальный износ сопрягаемой непокрытой детали, при этом коэффициент трения имеет минимальное значение.

## Список литературы

1. Гуляев А.П. *Металловедение: учебник для вузов.* – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Изучение роста износостойких слоев из карбида титана на твердых сплавах / Г.Л. Платонов,

В.Н. Аникин, А.И. Анисеев, Н.Н. Золоторева, М.Н. Нахимова, Р.Ф. Чебураева, К.Ф. Кузнецова, В.С. Торопченков // *Порошковая металлургия.* – 1980. – № 8. – С. 48–52.

3. Тушинский Л.И. Оптимизация структуры для повышения износостойкости сплавов // *Физика износостойкости поверхности металлов: сборник научных трудов / АН СССР, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе.* – Л.: Изд-во ФТИ, 1988. – С. 42–45.

4. Карпман М.Г. Выбор метода и способа диффузионного насыщения поверхности изделий // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1982. – № 4. – С. 19–20.

5. Земсков Г.В., Коган Р.Л., Шевченко И.М. Исследование некоторых свойств диффузионных слоев, содержащих бор // *Защитные покрытия на металлах: [республиканский межведомственный сборник научных трудов] / Академия наук УССР, Институт проблем материаловедения.* – Киев: Наукова думка, 1971. – Вып. 4. – С. 67–73.

6. Шаповалов В.П., Горбунов Н.С. Диффузионное титанирование стали // *Защитные покрытия на металлах: [республиканский межведомственный сборник научных трудов] / Академия наук УССР, Институт проблем материаловедения.* – Киев: Наукова думка, 1973. – Вып. 7. – С. 116–119.

7. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д. Влияние состава насыщающей среды на структуру и свойства диффузионного слоя при титанировании сталей // *Известия вузов. Физика.* – 2001. – № 11. – С. 269–270.



8. *Ворошнин Л.Г.* Многокомпонентные диффузионные покрытия. – Минск: Наука и техника, 1981. – 296 с.

9. Патент на изобретение № 2493289 Российская Федерация, МПК С 23 С 10/36, С 23 С 10/60. Способ диффузионного титанирования изделий из чугуна / Ю.Г. Гуревич, В.Е. Овсянников, В.А. Фролов, П.А. Суханов; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Курганский государственный университет». – № 2012116651/02; заявлено 24.04.2012; опубл. 20.09.2013, Бюл. № 26. – 6 с.

10. *Соколов А.Г.* Разработка теоретических и технологических основ повышения стойкости режущего и штампового инструмента за счет диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.01.02. – Краснодар, 2008. – 369 с.

11. Патент на изобретение № 2439171 Российская Федерация, МПК С 21 D 5/10, С 21 D 3/04, С 23 С 10/22. Способ обработки чугунных изделий / А.Г. Соколов, Н.А. Крайнев; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский

государственный технологический университет». – № 2010114444/02; заявлено 12.04.2010; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1. – 6 с.

12. *Соколов А.Г., Артемьев В.П.* Повышение работоспособности инструмента методами диффузионной металлизации. – Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. – 228 с.

13. *Соколов А.Г., Крайнев Н.А.* Выбор элементов для диффузионной металлизации инструментальных сталей с целью повышения их работоспособности // Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: материалы 12 Международной научно-практической конференции, 13–16 апреля 2010 г. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – Ч. 2. – С. 352–357.

14. *Соколов А.Г., Крайнев А.Н.* Диффузионное титанирование как способ повышения стойкости инструментальных сталей // Технология металлов. – 2010. – № 4. – С. 44–49.

15. *Горкунов Д.Н.* Триботехника. Износ и безызносность: учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с. – (Для вузов). – ISBN 5-94327-004-3.

## OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1(66), January – March 2015, Pages 60–68

### The improvement of wear resistance of cast iron products by application of diffusion titanium coatings

**Sokolov A.G.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: sag-51@bk.ru

**Bobylyov E.E.**, Ph.D. student, e-mail: ebobylyev@mail.ru

Kuban State Technological University, 2 Moskovskayast., Krasnodar, 350072, Russian Federation

#### Abstract

The cast iron is rather popular structural material for products and elements, operating in a sliding friction conditions. Nevertheless, functionability of cast iron in friction pairs is significantly limited by loads and speeds, acting on them. The analysis of the causes of failure of cast iron products is given. The reasons of cast irons wear resistance decrease are presented. It is shown that the effective way to improve the wear resistance of cast iron products is a diffusion titanizing. But the process of the application of diffusion titanium coatings have problematic nature, because diffusion layers consist of very fragile titanium carbides, that break off from surface even during process of cooling after process of titanizing. The results of studies of the process of diffusion titanizing of cast iron from the environment of fusible liquid metal solutions is given. The technology of formation of workable coatings, including decarbonizing anneal before

the process of titanizing is developed and patented. This technology provides a high quality functional wear-resistant titanium coating on the surface of the cast iron. Coating formed during 2 hours had the thickness of more than 30  $\mu\text{m}$ . The microhardness of the coating is 25000 MPa, of substrate – 4000 MPa. A transition layer of low hardness (3200 MPa) is detected under the coating. The influence of diffusion titanizing on the wear resistance of cast iron products is investigated. The microstructure and composition of the obtained titanium coatings is investigated. The tribological properties of titanium coatings are investigated, the tribological properties of the friction pairs are investigated. The studies of tribological properties conducted by comparative “pad-roller” is given. The linear wear of coated part with titanium coating is zero, and the uncovered sample wear is 0.02 mm.

### Keywords:

diffusion titanium coatings, iron cast products, properties of coatings, decarburization, improvement of wear resistance, tribological properties.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-60-68

### References

1. Gulyaev A.P. *Metallovedenie* [Metal Science]. 6<sup>th</sup> ed. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 544 p.
2. Platonov G.L., Anikin V.N., Anikeev A.I., Zolotareva N.N., Nalimova M.N., Cheburaeva R.F., Kuznetsova K.F., Toropchenov V.S. Izuchenie rosta iznosostoikikh sloev iz karbida titana na tverdykh splavakh [Growth of wear-resistant titanium carbide layers on hard metals]. *Poroshkovaya metallurgiya – Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1980, no. 8, pp. 48–52. (In Russian)
3. Tushinsky L.I. [Optimization of the structure to improve the wear resistance of alloys]. “*Fizika iznosostoičnosti poverkhnosti metallov*”: *sbornik nauchnykh trudov* [Collected papers “Physics wear of metal surfaces”], Leningrad, FTI Publ., 1988, pp. 42–45.
4. Karpman M.G. Vybora metoda i sposoba diffuzionnogo nasyshcheniya poverkhnosti izdelii [Choice of method and procedure for diffusion impregnation of article surfaces]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 1982, no. 4, pp. 19–20. (In Russian)
5. Zemskov G.V., Kogan R.L., Shevchenko I.M. [The study of some properties of the diffusion layers containing boron]. *Zashchitnye pokrytiya na metallakh* [Protective coatings on metals]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1971, iss. 4, pp. 67–73.
6. Shapovalov V.P., Gorbunov N.S. [Diffusion Titanation of Steel]. *Zashchitnye pokrytiya na metallakh* [Protective Coatings on Metals]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1973, iss. 7, pp. 116–119.
7. Gur’ev A.M., Lygdenov B.D. Vliyanie sostava nasyshchayushchei sredy na strukturu i svoystva diffuzionnogo sloya pri titanirovanii stali [Influence of saturating environment on the structure and properties of the diffusion layer at titanation steels]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*, 2001, no. 11, pp. 269–270. (In Russian)
8. Voroshnin L.G. *Mnogokomponentnye diffuzionnye pokrytiya* [Multicomponent diffusion coatings]. Minsk, Nauka i rekhnika Publ., 1981. 296 p.
9. Gurevich Yu.G., Ovsyannikov V.E., Frolov V.A., Sukhanov P.A. *Sposob diffuzionnogo titanirovaniya izdelii iz chuguna* [Method of diffusion titanizing of cast iron products]. Patent RF, no. 2493289, 2013.
10. Sokolov A.G. *Razrabotka teoreticheskikh i tekhnologicheskikh osnov povysheniya stoikosti rezhushchego i shtampovogo instrumenta za schet diffuzionnoi metallizatsii iz sredy legkoplavkikh zhidkometallicheskikh rastvorov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development of theoretical and technological foundations for increasing the resistance of the cutting and punching tools due to the diffusion of plating medium of low-melting liquid metal solutions. Dr. eng. sci. diss.]. Krasnodar, 2008. 369 p.
11. Sokolov A.G., Krainev N.A. *Sposob obrabotki chugunnykh izdelii* [Cast-iron ware processing method]. Patent RF, no. 2439171, 2012.
12. Sokolov A.G., Artem’ev V.P. *Povyshenie rabotosposobnosti instrumenta metodami diffuzionnoi metallizatsii* [Increase efficiency tool by diffusion metallization]. Rostov-on-Don, SKNTs VSh Publ., 2006. 228 p.
13. Sokolov A.G., Krainev A.N. [Selecting elements for diffusion metallization tool steels to improve their efficiency]. *Materialy 12 Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Resursosberegayushchie tekhnologii re-*

*monta, vosstanovleniya i uprochneniya detalei mashin, mekhanizmov, oborudovaniya, instrumenta i tekhnologicheskoi osnastki ot nano- do makrourovnya*” [Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference “Resource-saving technology of repair, restoration and strengthening of machine parts, machinery, equipment, tools and tooling from the nano- to the macro level”]. Saint Petersburg, 2010, pt. 2, pp. 352–357.

14. Sokolov A.G., Krainev A.N. Diffuzionnoe titanirovaniye kak sposob povysheniya stoikosti instrumental’nykh stalei [Diffusive titanizing as method of improvement in tool steel resistance]. *Technologiya Metallov – Technology of metals*, 2010, no. 4, pp. 44–49.

15. Gorkunov D.N. *Tribotekhnika. Iznos i bezyznosnost’* [Tribology. Wear. Wearless]. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, MSKhA Publ., 2001. 616 p. ISBN 5-94327-004-3

Received 17 December 2014

Revised 12 January 2015

Accepted 29 January 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.

### **10. Список литературы**

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

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

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

## ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

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

Авторское резюме должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или 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  $^{31}\text{PMR}$ , 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.



# МЕДИАКИТ ЖУРНАЛА

О ЖУРНАЛЕ

МЕДИАКИТ



Ежеквартальный научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» публикует:

- материалы о прогрессивном оборудовании и инструментах для металло- и деревообработки, слесарно-монтажных, строительных и малярных работах, о достижениях в области их разработки и авангардных технологиях производства, а также о проблемах экономики и организации производства, подготовки специалистов и повышения их квалификации;

- результаты научных исследований докторов и кандидатов наук, аспирантов, магистров техники и технологии по следующим научным направлениям: 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; 05.02.08 – Технология машиностроения; 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка

металлов и сплавов; 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение). Присутствуют разделы: «Технология», «Оборудование», «Инструменты», «Материаловедение», «Труды конференции», «Научно-техническая информация» и др.

**Научно-технические статьи**, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. Публикация статей **бесплатная**.

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

Дата основания:

1998 г. – Инструмент Сибири; с 2001 г. – Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты).

Свидетельство о регистрации средств массовой информации ПИ № ФС77-23961 от 05 апреля 2006 г. ISSN 1994-6309.

Учредители журнала:

- ОАО Новосибирский проектно-технологический и экспериментальный институт «Оргстанкинпром»;
- Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»;

- ООО Научно-производственная коммерческая фирма «Машсервисприбор».

**Издатель:**

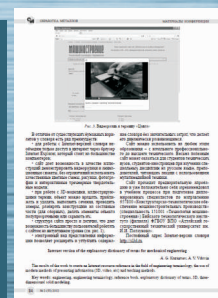
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»;

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.



## Технические характеристики журнала:

- **Периодичность** – 4 раза в год (1 раз в квартал)
- **Язык** – русский
- **Объем** – до 200 страниц
- **Формат** – А4 (210 x 297 мм)
- **Тираж** – до 500 экз





## Структура распространения:

- по подписке (Индекс в каталоге агентства «Роспечать» – 70590);
- адресная почтовая рассылка авторам статей, по промышленным предприятиям, научным и учебным заведениям России;
- на выставках, конференциях.

## Регионы распространения:

- Сибирь, Алтай, Дальний Восток – 60 %;
- Урал, Европейская часть РФ – 40 %.

## Структура читательской аудитории

Преподаватели учебных заведений и научные сотрудники	64 %
Руководители (инжиниринговых предприятий, фирм-разработчиков и др. )	8 %
Ведущие специалисты предприятий (главные инженеры, технологи, конструкторы и т.д.)	11 %
Инженерно-технический состав предприятий и организаций	17 %

## Журнал представлен:

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

- электронная версия журнала доступна на платформе eLIBRARY.RU.

## График выхода журнала в течение текущего года

Номер	Выход (число, месяц)
1	15.03
2	15.06
3	15.09
4	15.12

## Адрес редакции журнала:

630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 274, зам. гл. редактора – В. Г. Атапин, В. Ю. Скиба.

Тел.: Атапин В.Г. (383) 346-17-77,

Скиба В.Ю. (383) 346-17-79

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



С 2014 научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» является организатором ежегодной (третья декада марта) Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении»/ «Actual Problems in Machine Building» совместно с «ИТЕ Сибирь» в рамках Международной выставки машиностроения и металлообработки Mashex Siberia. По результатам конференции издается сборник материалов конференции.

## Тематика работы конференции:

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

## Официальный сайт конференции:

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



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

Цветная реклама на обложке (формат А4):

2 страница 18 000 руб.

3 страница 15 000 руб.

4 страница 20 000 руб.

