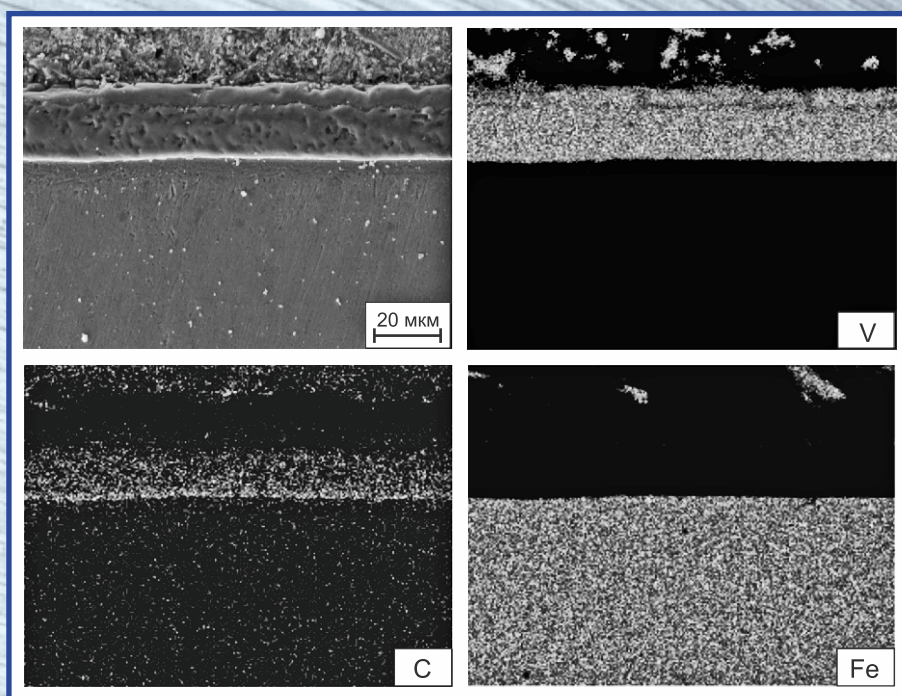


ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ISSN 1994-6309

ТЕХНОЛОГИЯ
ОБОРУДОВАНИЕ
ИНСТРУМЕНТЫ

№ 2 (71) АПРЕЛЬ–ИЮНЬ 2016 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



Распределение элементов по площади шлифа на стали У7
после насыщения в смеси состава №5
(в характеристическом излучении ванадия, углерода, железа)

НОВОСИБИРСК

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ»

С 29 марта по 01 апреля компания «ИТЕ Сибирь» провела в Новосибирском Экспоцентре 18-ю выставку оборудования для металлообработки и сварки Masheх Siberia 2016 – наиболее значимое событие отрасли за Уралом. Выставка послужила инструментом для технического перевооружения предприятий Сибирского Федерального округа и создания условий для опережающего развития машиностроительного комплекса. На выставке демонстрировались новинки отрасли, что способствует внедрению инноваций в производство, обновлению основных фондов предприятий и повышению их конкурентоспособности. В выставке приняли участие более 100 компаний из 17 регионов РФ, а также из Германии, Китая и Республики Беларусь. Среди участников выставки были такие известные производители технологического оборудования, как Linn High Therm GMBH (Германия), Mazak (Япония), «Завод механических прессов», «Ишимбайский станкоремонтный завод», «КАМ-Инжиниринг», «Липецкое станкостроительное предприятие», «Омрон-Электроникс», «Роланд ДГ РУС», «Сарапульский электрогенераторный завод», «Свердловский инструментальный завод», «Термал-Спрей-Тек», «Новосибирский завод генераторных установок» и другие. За четыре дня на выставке побывало 3389 уникальных посетителей.

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



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

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

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

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



ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309

№ 2 (71) АПРЕЛЬ–ИЮНЬ 2016 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

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

Члены совета

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

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

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

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

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

Журнал вошел в список рекомендованных к включению в **Перечень рецензируемых научных изданий**, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в соответствии с требованиями приказа Минобрнауки России от 25 июля 2014 г. № 793, с изменениями, внесенными приказом Минобрнауки России от 03 июня 2015 г. № 560 (по состоянию на 22.07.2015)

СОУЧРЕДИТЕЛИ

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Атапин Владимир Григорьевич – профессор,
доктор технических наук

Скиба Вадим Юрьевич – доцент, кандидат технических наук

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

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. 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
E-mail: 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

Скворцов В.Ф. , Бознак А.О. Снижение остаточных напряжений в обрабатываемых дорнованием толстостенных цилиндрах с использованием их пластического сжатия.....	6
Рахмьянов Х.М., Василевская С.И. Технологические возможности электрохимической обработки отверстий неподвижным катодом-инструментом.....	12

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

Алексеев Н.С., Капорин В.А., Иванов С.В. Сравнительный анализ работоспособности кругов на керамической и бакелитовой связках.....	21
Солер Я.И., Май Д.Ш., Нгуен В.Л. Оценка режущих способностей нитридборовых высокопористых кругов при маятниковом шлифовании деталей из сплава ВТ20 с использованием искусственных нейронных сетей.....	28
Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г., Скиба В.Ю., Лобанов Д.В., Жирова А.А., Бредихина А.Н., Косилов А.С., Печоркина Н.С. Методика уравнивания роторов технологических машин.....	41

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Гилев В.Г., Барышников И.Н. Особенности фазообразования при спекании высокопористых ячеистых материалов системы Fe-Cr-Al.....	51
Соколов А.Г., Бобылёв Э.Э. Кинетика формирования покрытий на базе карбида титана, нанесенных по технологии диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов, на сплавах типа ТК и ВК.....	59
Чертовских Е.О., Габец А.В., Габец Д.А., Марков А.М., Околович Г.А., Комаров П.Н. Получение структуры бейнита регулируемой термической обработкой стали 20ГФЛ.....	70
Бутуханов В.А., Лыгденов Б.Д. Влияние состава насыщающих порошковых сред на структуру и свойства диффузионных карбидных слоев.....	80
Афанасьев В.К., Малюх М.А., Попова М.В., Лейс В.А., Долгова С.В. Тепловое расширение сплавов Al-Si после обработки расплава и термообработки.....	87
Рекомендации по написанию научной статьи	95
Подготовка аннотации	97
Правила для авторов	100

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

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

Подписано в печать 02.06.2016. Выход в свет 15.06.2016. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ.л. 13,5. Уч.-изд. л. 25,11. Изд. № 127. Заказ 838. Тираж 300 экз.

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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

ISSN 1994-6309

Journal no.2 (71) April–June 2016

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

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

Vadim Y. Skeebe, 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
E-mail: metal_working@mail.ru

EDITORIAL COUNCIL

CHAIRMAN:

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

MEMBERS:

The Federative Republic of Brazil:

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

The Federal Republic of Germany:

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

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

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

The Republic of Belarus:

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

The Ukraine:

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

The Russian Federation:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Aleksey V. Makarov, D.Sc. (Engineering), Senior Researcher,
Head of division, Head of laboratory (Laboratory of Mechanical Properties)

M.N. Miheev Institute of Metal Physics,
Russian Academy of Sciences (Ural Branch), *Yekaterinburg*

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

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

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

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

Skvortsov V.F., Boznak A.O. The reduction of residual stresses in cold expanded thick-walled cylinders by plastic compression.....	6
Rakhimyanov Kh.M., Vasilevskaya S.I. Technological capabilities of the holes electrochemical machining using fixed cathode-tool.....	12

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

Alexeev N.S., Kaporin V.A., Ivanov S.V. A comparative analysis of the efficiency of ceramic and bakelite bonded grinding wheels.....	21
Soler Ya.I., Mai D.S., Nguyen V.L. An assessment of cutting abilities of boron nitride high porous wheels while pendulum grinding of elements made of titanium alloy VT20 using the artificial neural network.....	28
Podgorniy Yu.I., Martynova T.G., Skeebe V.Yu., Lobanov D.V., Zhirova A.A., Bredikhina A.N., Kosilov A.S., Pechorkina N.S. The methods of technological machines' rotors balance.....	41

MATERIAL SCIENCE

Gilev V.G., Baryshnikov I.N. Special features of the phase formation during sintering of high porous cellular materials of the Fe-Cr-Al system.....	51
Sokolov A.G., Bobilyov E.E. The kinetics of formation of coatings based on titanium carbide during diffusion metallization from the fusible liquid metal solutions, on the hard alloys.....	59
Chertovskih E.O., Gabets A.V., Gabets D.A., Markov A.M., Okolovich G.A., Komarov P.N. The formation of the bainite structure during heat treatment of the rail steel (analogue J13052).....	70
Butukhanov V.A., Lygdenov B.D. The effect of powder mixtures composition on the structure and properties of carbide diffusion layers.....	80
Afanas'ev V.K., Malyuh M.A., Popova M.V., Leis V. A., Dolgova S.V. Thermal expansion of Al-Cu alloys after conditioning and heat treatment.....	87
Guidelines for Writing a Scientific Paper	95
Abstract requirements	97
Rules for authors	100

СНИЖЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ДОРНОВАНИЕМ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИХ ПЛАСТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ

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

Поступила 27 апреля 2016
Рецензирование 3 мая 2016
Принята к печати 15 мая 2016

Бознак А.О. – 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
e-mail: aleksey@tpu.ru

На основе анализа литературы высказано предложение, что для снижения остаточных напряжений в обрабатываемых дорнованием с большими натягами толстостенных цилиндрах, при которых пластические деформации в них являются сквозными, и сохранения высокой точности цилиндров необходимо осуществить их осевое пластическое сжатие и последующее дорнование с малыми натягами, при которых в цилиндрах воспроизводится полупругий режим деформирования. Представлены результаты экспериментальных исследований методом Закса окружных, радиальных и осевых остаточных напряжений в цилиндрах из стали 50 (HB 2170...2290 МПа) с диаметром отверстий $d = 5$ мм, наружным диаметром $D = 15$ мм, длиной $L = 30$ мм, а также точности отверстий цилиндров, выполненных для проверки этого предположения. Установлено, что в цилиндрах, обработанных двухцикловым дорнованием с суммарным натягом $a_{\Sigma}/d = 5,1\%$, наибольшие по абсолютной величине окружные остаточные напряжения составляют -284 МПа; после пластического сжатия этих цилиндров с деформациями $\Delta L/L$ 0,5 и 1 % и одноциклового дорнования с натягом $a/d = 0,9\%$ эти напряжения равны -177 МПа. Показано, что достигнутая при двухцикловом дорновании высокая точность отверстий (IT7) после пластического сжатия цилиндров и одноциклового дорнования полностью сохраняется.

Ключевые слова: толстостенные цилиндры, дорнование, пластическое сжатие, остаточные напряжения.
DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-6-11

Введение

Дорнование отверстий малого диаметра ($d \leq 5$ мм) в деталях типа толстостенных цилиндров ($D/d \geq 2$) является одним из наиболее эффективных методов их отделочно-упрочняющей обработки [1–3]. Обладая высокой производительностью, дорнование, выполняемое твердосплавными дорнами с натягами до $0,1d$ и более, дает возможность повысить точность отверстий с IT11–IT13 до IT7, снизить шероховатость их поверхности с $Ra = 2$ мкм до $Ra = 0,1...0,3$ мкм, значительно упрочнить поверхностный слой и

сформировать в нем благоприятные сжимающие остаточные напряжения [4, 5].

Вместе с тем создаваемые при дорновании с большими натягами остаточные напряжения в толстостенных цилиндрах в отдельных случаях могут быть нежелательно высокими. Если при последующей обработке с цилиндров удаляются значительные припуски, то вследствие перераспределения остаточных напряжений они претерпевают существенные деформации и теряют ранее достигнутую точность [6, 7]. Это возможно также из-за релаксации остаточных напряжений в процессе эксплуатации цилиндров [8]. В связи

с изложенным значительный интерес представляет поиск технологических путей снижения этих напряжений.

Основываясь на анализе литературы [1, 9, 10], можно предположить, что одним из таких путей является использование после дорнования с большими натягами осевого пластического сжатия цилиндров с малыми (1...2 %) деформациями и последующего дорнования с малыми (ориентировочно до 1 % от диаметра отверстия) натягами. При сжатии следует ожидать [8, 10, 11], что созданные при дорновании с большими натягами остаточные напряжения резко уменьшатся. Однако при этом неизбежно некоторое снижение достигнутой ранее точности отверстий. Последующее дорнование с малыми натягами, когда в цилиндрах воспроизводится полупругий режим деформирования (их наружная область остается в упругом состоянии), позволит восстановить эту точность и, как показано в работах [1, 9], сформировать остаточные напряжения значительно меньшие, чем при дорновании с большими натягами, при которых имеют место сквозные пластические деформации цилиндров.

Цель работы – экспериментально исследовать возможности снижения остаточных напряжений в обрабатываемых дорнованием с большими натягами толстостенных цилиндрах с использованием пластического сжатия.

Методика исследования

Эксперименты проводили на образцах из стали 50 (HB 2170...2290 МПа, $\sigma_{0,2} \approx 470$ МПа). Диаметр отверстия образцов составлял 5 мм, наружный диаметр – 15 мм, длина – 30 мм. Суть экспериментов состояла в определении остаточных напряжений и анализе точности отверстий образцов после дорнования с большими натягами, пластического сжатия и дорнования с малыми натягами.

Отверстия в образцах получали сверлением спиральным сверлом на токарном станке, затем отверстия разворачивали ручной разверткой. Дорнование отверстий выполняли однозубыми дорнами из твердого сплава ВК8 с углами рабочего и обратного конусов 6° и шириной соединяющей их цилиндрической ленточки 3 мм. Обработку производили на испытательной машине УМЭ-10ТМ с помощью специального

приспособления по схеме сжатия при скорости 0,008 м/с. В качестве смазочного материала применяли жидкость МР-7. Дорнование с большими натягами осуществляли за два цикла, используя дорны диаметром 5,25 и 5,298 мм. Средний суммарный натяг при этом составлял $a_\Sigma = 0,259$ мм ($a_\Sigma/d \approx 5,1$ %). Дорнование с малыми натягами производили за один цикл дорном диаметром 5,304 мм. Натяг при этом был $a = 0,046$ мм ($a/d \approx 0,9$ %). Пластическое сжатие образцов с деформациями 0,5 и 1% выполняли на ручном механическом прессе с применением специального приспособления. Для исключения перекосов образцов при сжатии предварительно с их торцов плоским шлифованием удаляли возникшие при дорновании наплывы металла, а для снижения трения торцы образцов смазывали смесью жидкости МР-7 с дисульфидом молибдена.

Измерение диаметров отверстий образцов выполняли нутромером фирмы «Carl Zeiss Jena» (ФРГ) с ценой деления 0,002 мм. Измерения проводили в двух продольных и трех поперечных сечениях отверстия (посередине образца и на расстоянии около 2 мм от его торцов). Точность отверстий оценивали по величине рассеивания их диаметров $\Delta_d = d_{\max} - d_{\min}$, где $d_{\max}$, $d_{\min}$ – соответственно максимальный и минимальный диаметры в выборке из пяти образцов. Измерение наружных диаметров и длины образцов осуществляли микрометром МР25 с ценой деления 0,002 мм.

Остаточные напряжения определяли методом Закса [12, 13] с использованием формул И.А. Биргера [12]. При этом применяли методику экспериментов по определению остаточных напряжений, описанную в [14, 15]. В каждом опыте использовали по три образца.

Результаты и обсуждение

Распределение окружных σ_θ , радиальных σ_r и осевых σ_z остаточных напряжений вдоль радиуса r образцов (эпюры напряжений), обработанных дорнованием со средним суммарным натягом $a_\Sigma/d = 5,1$ %, который вызывает окружную остаточную деформацию на их наружной поверхности $\Delta D/D = 0,0047$, являющуюся упруго-пластической, показано на рис. 1.

Видно, что в области, прилегающей к отверстию образцов, окружные и осевые остаточные

напряжения являются сжимающими, которые уравниваются соответствующими растягивающими остаточными напряжениями в наружной области образцов. Радиальные остаточные напряжения равны нулю на поверхности отверстия и наружной поверхности образцов и являются сжимающими в остальной их области. Наибольшими по абсолютной величине являются окружные остаточные напряжения, которые у поверхности отверстия достигают -284 МПа. Рассеивание диаметров отверстий образцов при дорновании с указанными выше натягами уменьшилось с $0,042$ до $0,009$ мм (диаметр отверстий после развертывания составлял $5,018^{+0,042}$ мм, после дорнования $5,254^{+0,009}$ мм).

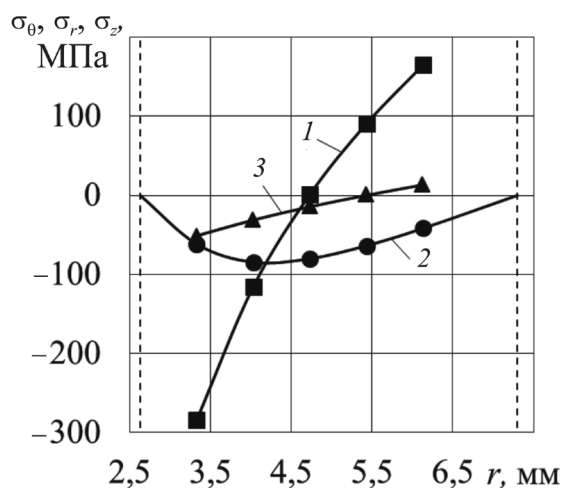


Рис. 1. Эпюры окружных 1, радиальных 2 и осевых 3 остаточных напряжений в образцах после дорнования с натягом $a_{\Sigma}/d = 5,1\%$. Здесь и ниже пунктирными линиями показаны поверхности отверстия и наружные поверхности образцов

При пластическом сжатии обработанных дорнованием со средним суммарным натягом $a_{\Sigma}/d = 5,1\%$ образцов происходит резкое снижение по абсолютной величине окружных и радиальных остаточных напряжений (рис. 2). При этом характер эпюр остаточных напряжений в значительной степени сохраняется неизменным. При деформации сжатия $0,5\%$ окружные остаточные напряжения снижаются с -284 МПа (см. рис. 1) до -120 МПа (рис. 2, а), а радиальные с -85 МПа (см. рис. 1) до -21 МПа (см. рис. 2, а). Увеличение деформации сжатия до 1% (рис. 2, б) приводит к уменьшению окружных остаточных напряжений до -75 МПа, а радиальных

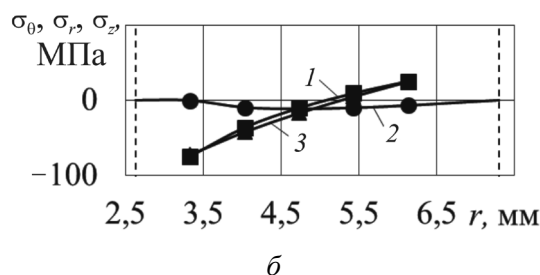
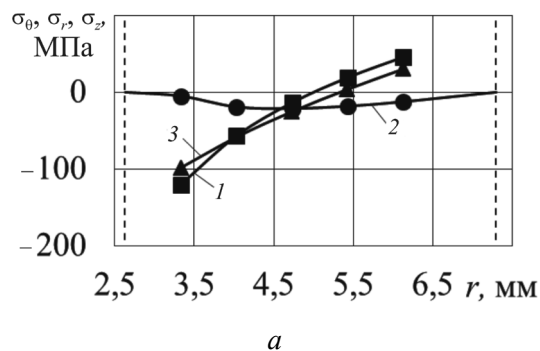


Рис. 2. Эпюры окружных 1, радиальных 2 и осевых 3 остаточных напряжений в образцах после дорнования с натягом $a_{\Sigma}/d = 5,1\%$ и пластического сжатия со степенью деформации $0,5\%$ (а) и 1% (б)

до -12 МПа. В то же время при пластическом сжатии заметно увеличиваются осевые остаточные напряжения. Если после дорнования со средним суммарным натягом $a_{\Sigma}/d = 5,1\%$ их наибольшие значения составляют -51 МПа (рис. 1), то после пластического сжатия с деформациями $0,5$ и 1% осевые остаточные напряжения возрастают соответственно до -99 МПа (рис. 2, а) и -73 МПа (рис. 2, б). Такое увеличение, вероятно, обусловлено неоднородностью деформаций образцов при сжатии, вызываемой трением на их торцах. По этой же причине при сжатии снижается точность отверстий образцов. При деформациях сжатия $0,5$ и 1% рассеивание диаметров отверстий образцов соответственно увеличивается с $0,009$ до $0,012$ и $0,015$ мм (диаметр отверстий образцов после сжатия на $0,5\%$ – $5,254^{+0,012}$ мм, после сжатия на 1% – $5,251^{+0,015}$ мм).

Эпюры остаточных напряжений после дорнования пластически сжатых образцов со средним натягом $a/d = 0,9\%$, вызывающим окружную остаточную деформацию на их наружной поверхности, равную $0,00034$, которая является упругой, показаны на рис. 3. Из него видно, что остаточные напряжения в образцах практически не зависят от степени их пластической дефор-

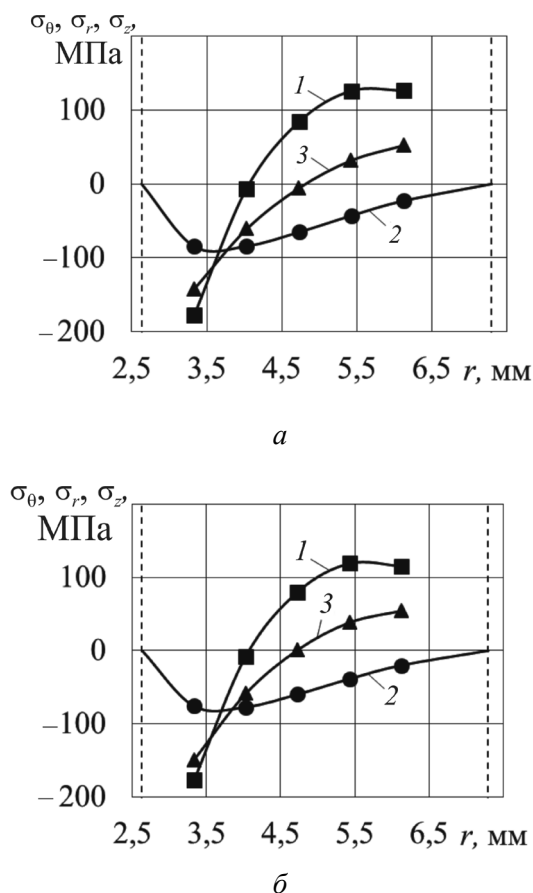


Рис. 3. Эпюры окружных 1, радиальных 2 и осевых 3 остаточных напряжений в образцах после дорнования с натягом $a_{\Sigma}/d = 5,1\%$, пластического сжатия со степенью деформации 0,5 % (а) и 1 % (б) и дорнования с натягом $a/d = 0,9\%$

магии при сжатии. Наибольшие по абсолютной величине окружные остаточные напряжения составляют -177 МПа, что в 1,6 раза меньше их значений в образцах, обработанных дорнованием со средним суммарным натягом $a_{\Sigma}/d = 5,1\%$ (см. рис. 1). Рассеивание диаметров отверстий образцов после дорнования с этим натягом не превышало $0,008$ мм (диаметр отверстий был $5,27^{+0,008}$ мм).

Выводы

1. Возникающие при двухцикловом дорновании отверстий в толстостенных цилиндрах из стали 50 (диаметр отверстия 5 мм, наружный диаметр 15 мм, длина 30 мм) с суммарным натягом $a_{\Sigma}/d = 5,1\%$ наибольшие по абсолютной величине окружные остаточные напряжения, равные -284 МПа, при последующем пластическом сжатии цилиндров со степенями деформаций

0,5 и 1 % и одноцикловом дорновании отверстий с натягом $a/d = 0,9\%$ снижаются до -177 МПа, т. е. в 1,6 раза.

2. Достигнутая при двухцикловом дорновании высокая точность отверстий (IT7) при этом полностью сохраняется.

Список литературы

1. Проскуряков Ю.Г. Дорнование отверстий. – Свердловск: Машгиз, 1961. – 192 с.
2. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.
3. Шнейдер Ю.Г. Технология финишной обработки давлением: справочник. – СПб.: Политехника, 1998. – 414 с.
4. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. – 2012. – № 2. – С. 1–24.
5. 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.
6. 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.
7. Проскуряков Ю.Г., Романов В.Н., Исаев А.Н. Объемное дорнование отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
8. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1989. – 254 с.
9. Проскуряков Ю.Г. Технология упрочняющей и формообразующей обработки металлов. – М.: Машиностроение, 1971. – 208 с.
10. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. В 2 ч. Ч. 1. Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
11. Алюминий: пер. с англ. / под ред. А.Т. Туманова, Ф.И. Квасова, И.Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 1972. – 664 с.
12. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
13. Кобрин М.М., Дехтярь Л.И. Определение внутренних напряжений в цилиндрических деталях. – М.: Машиностроение, 1965. – 175 с.
14. Остаточные напряжения при дорновании отверстий в толстостенных цилиндрах по схемам сжатия 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.

15. Скворцов В.Ф., Бознак А.О. Влияние длины толстостенных цилиндров на остаточные напряже-

ния, возникающие при одноцикловом дорновании отверстий // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 1 (66). – С. 20–26. – doi: 10.17212/1994-6309-2015-1-20-26.

OBRAHOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (71), April – June 2016, Pages 6–11

The reduction of residual stresses in cold expanded thick-walled cylinders by plastic compression

Skvortsov V.F., Ph.D. (Engineering), Associate Professor

Boznak A.O., Ph.D. student, e-mail: aleksey@tpu.ru

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

Abstract

Thick-walled cylinders ($D/d \geq 2$) constitute a large group of parts with precise small diameter holes ($d = 1 \dots 10$ mm). Improvement of surface finish and accuracy of small diameter holes is an actual task and requires the development of new methods of processing and cold expansion is one of the most effective methods of finishing and hardening of holes in such parts. Along with high productivity, cold expansion helps to increase accuracy, improve surface roughness, considerably work-harden surface layer and generate favorable compressive residual stresses. However, residual stresses generated during cold expansion of parts such as thick-walled cylinders can be undesirably high in some cases.

We suppose that in order to maintain high accuracy of holes and to lower residual stresses after cold expansion of thick-walled cylinders, which undergo throughout plastic deformations, it is needed to perform axial plastic compression with subsequent cold expansion with small interferences. To test the hypothesis, we studied accuracy of holes as well as hoop, radial and axial residual stresses in cylinders made of steel grade 50 (0,5 % C, HB 2170...2290 MPa) with hole diameter $d = 5$ mm, outer diameter $D = 15$ and length $L = 30$ mm by Sachs method. It is found that double-cycle cold expansion with total interference $a_{\Sigma}/d = 5,1$ % generates hoop residual stresses with largest absolute value equal to 284 MPa, which, after plastic compression with strain $\Delta L/L$ equal to 0,5 and 1 % and single-cycle cold expansion with interference $a/d = 0,9$ %, changed to 177 MPa. It is shown that high hole accuracy (IT7) achieved through double-cycle expansion remained at the same high level after plastic compression and single-cycle expansion.

Keywords

thick-walled cylinders, cold expansion, plastic compression, residual stresses

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-6-11

References

1. Proskuryakov Yu.G. *Dornovanie otverstii* [Hole mandrelling]. Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1961. 192 p.
2. Rozenberg A.M., Rozenberg O.A. *Mekhanika plasticheskogo deformirovaniya v protsessakh rezaniya i deformiruyushchego protyagivaniya* [Mechanics of plastic deformation in processes of cutting and deforming broaching]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990. 320 p.
3. Shneider Yu.G. *Tekhnologiya finishnoi obrabotki davleniem: spravochnik* [Finish forming technology: a handbook]. St. Petersburg, Politehnika Publ., 1998. 414 p.
4. 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.
5. Skvortsov V.F., Okhotin I.S., Arlyapov A.Yu. Ostatochnye napryazheniya pri dornovanii otverstii malogo diametra v polykh tolstostennykh tsilindrakh s bol'shimi natyagami [Residual stresses at pin hole mandrelling in hol-

low thick-walled cylinder with at great tensions]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 2, pp. 24–27. (In Russian)

6. 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 – Soviet Engineering Research*, 1973, no. 7, pp. 57–60. (In Russian)

7. Proskuryakov Yu.G., Romanov V.N., Isaev A.N. Ob'ёмное дорнование отверстий [Three-Dimensional mandrelling of holes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 224 p.

8. 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.

9. Proskuryakov Yu.G. Tekhnologiya uprochnyayushche-kalibruyushchei i formoobrazuyushchei obrabotki metallov [Technology of work hardening, calibration and forming of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 208 p.

10. Fridman Ya.B. Mekhanicheskie svoystva metallov. V 2 ch. Ch. 1. Deformatsiya i razrushenie [Mechanical properties of metals. In 2 pt. Pt. 1. Strain and fracture]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 472 p.

11. Tumanov A.T., Kvasov F.I., Fridlyander I.N., eds. *Alyuminii* [Aluminium]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 664 p.

12. Birger I.A. Ostatochnye napryazheniya [Residual stresses]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963. 232 p.

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. Skvortsov V.F., Tsygankov R.S., Boznak A.O., Fedotov V.S. Ostatochnye napryazheniya pri dornovanii otverstii v tolstostennyykh 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.

15. Skvortsov V.F., Boznak A.O. Vliyanie dliny tolstostennyykh tsilindrov na ostatochnye napryazheniya, voznikayushchie pri odnotsiklovom dornovanii otverstii [The effect of length of thick-walled cylinders on the residual stresses generated during the single-cycle mandrelling]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2015, no. 1 (66), pp. 20–26. doi: 10.17212/1994-6309-2015-1-20-26

Article history:

Received 27 April 2016

Revised 3 May 2016

Accepted 15 May 2016

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ НЕПОДВИЖНЫМ КАТОДОМ-ИНСТРУМЕНТОМ

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

Поступила 4 марта 2016
Рецензирование 5 апреля 2016
Принята к печати 15 мая 2016

Рахимьянов Х.М. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: kharis51@mail.ru; Svetlana.vasilevskaya.87@mail.ru

Рассматриваются технологические возможности электрохимической размерной обработки меди неподвижным катодом-инструментом. Катод выполнен полым для подачи электролита в зону обработки. Предложено использовать схему с горизонтальным расположением катода, что позволило рассматривать струю электролита как формообразующий инструмент. Получена зависимость изменения глубины прошивки во времени, свидетельствующая о снижении скорости обработки по мере увеличения межэлектродного зазора. Данный факт подтверждается снижением плотности тока при обработке, что объясняется увеличением омического сопротивления потока электролита с ростом межэлектродного зазора. Установлено, что повышение технологического напряжения на электродах приводит к увеличению как глубины обработки, так и диаметра входного отверстия. Изменение избыточного давления струи от 0,3 до 0,8 МПа не оказало заметного влияния как на производительность обработки, так и на закономерности формирования отверстия. Показано, что увеличение диаметра катода-инструмента сопровождается ростом глубины отверстия и его диаметра. Показаны перспективы дальнейшего совершенствования процесса электрохимической размерной обработки малых отверстий для увеличения производительности процесса и улучшения точностных показателей.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, анод, катод-инструмент, анодное растворение, электролит, плотность тока.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-12-20

Введение

В современном машиностроении существует ряд технологических задач, реализация которых традиционными методами обработки не представляется возможной. Это относится как к обработке высокопрочных материалов, в том числе аморфных и нанокристаллических, различного рода покрытий, так и к обработке микрообъектов (отверстий, пазов и т. д.).

Решение этих задач возможно при использовании электрофизических технологий, включающих традиционные схемы разрушения

материала, присущие механическим методам обработки. Комплексное решение по обеспечению точности и качества обработки электропроводных материалов достигается при использовании электрохимической обработки (ЭХО), основанной на локальном анодном растворении обрабатываемого материала [1–7]. Применение ЭХО как для предварительной, так и для окончательной обработки различных классов материалов позволяет обеспечить требуемые показатели точности и качества обработки при высокой производительности процесса [8–14]. Это спо-

способствовало внедрению ЭХО в технологические процессы обработки деталей машин и инструментов в машиностроительной, инструментальной, авиационной, медицинской и других отраслях промышленности.

В настоящее время интенсивно развиваются исследования, связанные с микрообработкой деталей, когда размеры обрабатываемых поверхностей составляют десятые доли миллиметра, а порой и несколько микрон [16]. Так, в работе [17] отмечается, что основные трудозатраты при изготовлении исследованной номенклатуры деталей связаны с получением отверстий диаметром от 0,1 до 0,3 мм. Обработка отверстий в данном размерном диапазоне с обеспечением требуемых показателей точности, качества и производительности является сложной технической задачей.

Настоящая статья посвящена оценке технологических возможностей ЭХО-отверстий малого диаметра неподвижным катодом-инструментом с прокачкой электролита в межэлектродном промежутке. Установление технологических ограничений в обработке позволит выявить пути дальнейшего совершенствования процесса.

Методика экспериментального исследования

В качестве модельного материала в настоящем исследовании использовалась медь марки М1 ГОСТ 859–2001. Состав и концентрация электролита (5 % NaCl) для ЭХО были выбраны по результатам предварительных исследований [14]. Методика подготовки образцов подробно изложена в работе [18].

При подготовке методики исследований важным оказался выбор схемы ЭХО. Так, при использовании в ЭХО сплошного катода-инструмента по схеме, представленной на рис. 1, продукты электрохимических реакций (шлам), заполняя межэлектродный зазор, ухудшают условия обновления электролита в зоне обработки. Это приводит к торможению процесса и снижению качества обрабатываемой поверхности.

Для своевременного удаления продуктов анодного растворения используют схему с про-

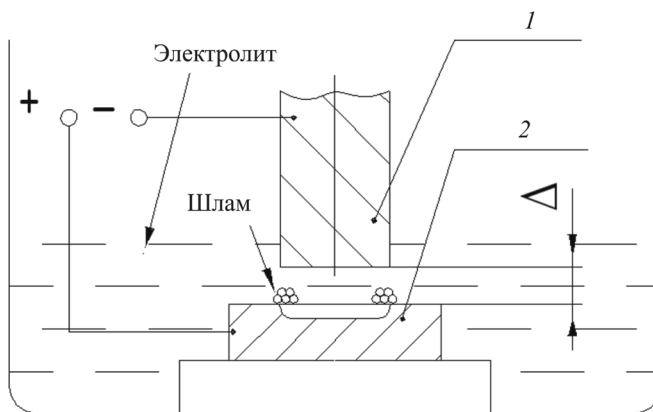


Рис. 1. Схема ЭХО с вертикальным расположением катода-инструмента 1; 2 – анод – деталь; Δ – межэлектродный зазор

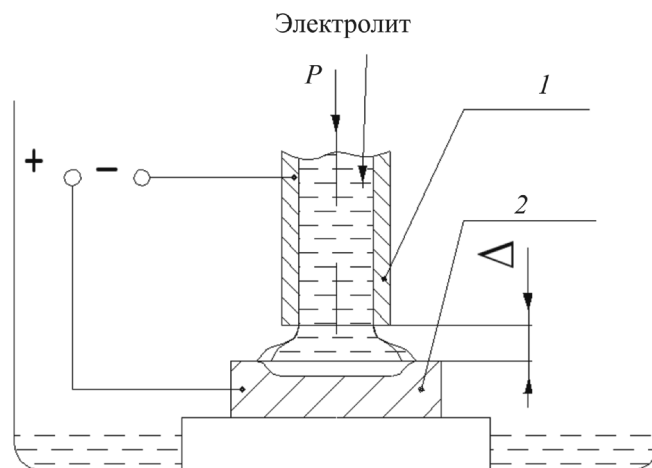


Рис. 2. Схема ЭХО с прокачкой электролита через полый катод-инструмент 1; 2 – анод – деталь; Δ – межэлектродный зазор

качкой электролита через полый катод-инструмент (рис. 2). Подача электролита через катод улучшает гидродинамические условия в межэлектродном промежутке, обеспечивая как удаление продуктов электрохимических реакций, так и обновление электролита в зоне обработки. Однако вертикальное расположение катода над анодом сопровождается скоплением определенного объема электролита на обрабатываемой поверхности анода. Это снижает локализацию процесса под катодом и приводит к растворению материала вокруг обрабатываемого отверстия.

Для устранения подобного явления в экспериментах реализована схема ЭХО с горизонтальным расположением полого катода-инструмен-

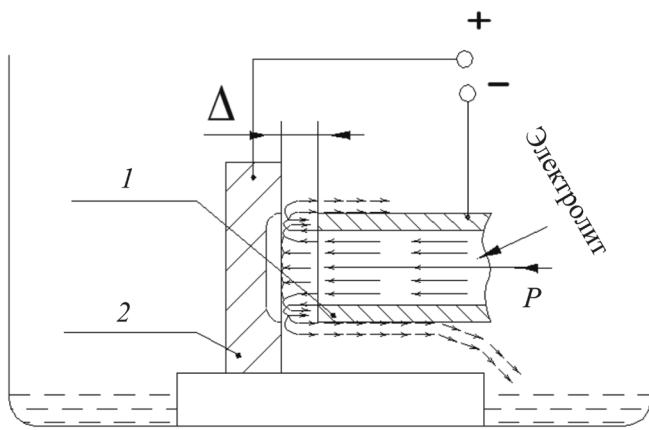


Рис. 3. Схема ЭХО с горизонтальным расположением полового катода-инструмента 1; 2 – анод – деталь; Δ – межэлектродный зазор

та относительно обрабатываемой поверхности (рис. 3).

При подаче электролита под давлением (P) через полый катод-инструмент подающая струя, отражаясь от обрабатываемой поверхности, формирует обратный поток, движущийся вдоль катода. Данная схема исключает скопление электролита вне зоны обработки, что улучшает ее точностные параметры. Подобный результат может быть реализован и при вертикальном нижнем по отношению к аноду расположении катода.

Электрохимическое формообразование катодом-инструментом осуществляется на малых межэлектродных зазорах (0,1...0,3 мм), что обеспечивает достижение значительных плотностей тока в зоне обработки. Последнее является немаловажным в достижении как точности обработки, так и производительности процесса.

В настоящем исследовании использовалась схема с неподвижным относительно анода расположением катода-инструмента при первоначальном значении межэлектродного зазора, равным 0,1 мм. При использовании схемы ЭХО, представленной на рис. 3, при обработке отверстия в образце формируется струя электролита, состоящая из подающего и отраженного потоков, которая, по существу, и является инструментом при формировании отверстия на

аноде. В исследованиях использовался источник технологического тока с диапазоном рабочих напряжений от 5 до 20 В. Для подачи электролита через катод-инструмент избыточное давление изменялось от 0,3 до 0,8 МПа. Время обработки составляло от 1 до 10 мин. В качестве катода-инструмента использовались металлические иглы длиной 10 мм и соотношениями внутренних и наружных диаметров, равными $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26/0,46$ мм; 0,39/0,64 мм; 0,55/0,8 мм. Глубина и форма полученных отверстий в образцах контролировались с помощью индикатора многооборотного с ценой деления 0,001 мм (ГОСТ 9696–82) и микроскопа Nikon MM – 400.

Результаты и обсуждение

Данные экспериментальных исследований по оценке производительности обработки отверстия в виде зависимости глубины прошивки отверстия от времени обработки для различных значений напряжения на электродах представлены на рис. 4, а также на фотографиях поперечных сечений отверстий (рис. 5).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что производительность обработки отверстия снижается по мере его углубления и тем значительнее, чем меньше технологическое напряжение. При этом повышение напряжения интенсифицирует процесс обработки на всех ее этапах. Снижение производительности по

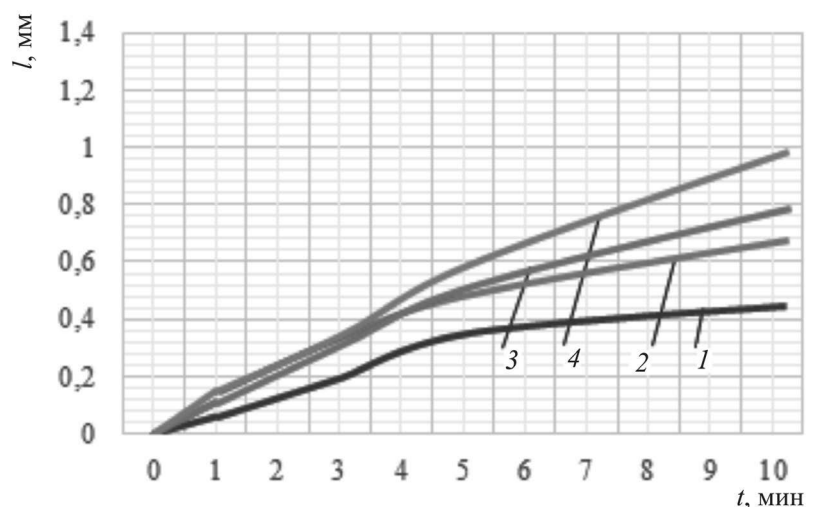


Рис. 4. Зависимость глубины отверстия от времени обработки: $P = 0,3$ МПа; $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26/0,46$ мм; 1 – 5 В; 2 – 10 В; 3 – 15 В; 4 – 20 В

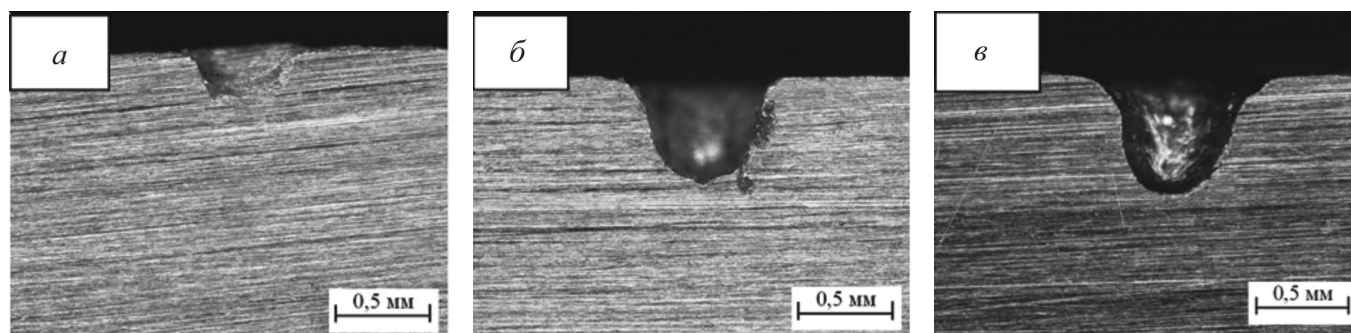


Рис. 5. Фотографии поперечных сечений отверстий:

$P = 0,3$ МПа; $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26/0,46$ мм; а – $U = 5$ В; $t = 3$ мин; б – $U = 15$ В; $t = 5$ мин; в – $U = 20$ В; $t = 5$ мин

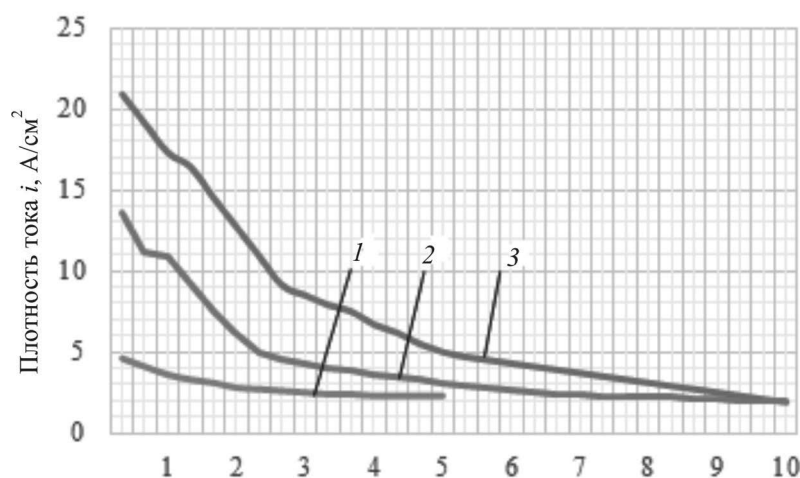


Рис. 6. Изменение плотности тока от времени обработки:

$P = 0,3$ МПа; $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26/0,46$ мм; 1 – $U = 5$ В; 2 – $U = 10$ В; 3 – $U = 20$ В

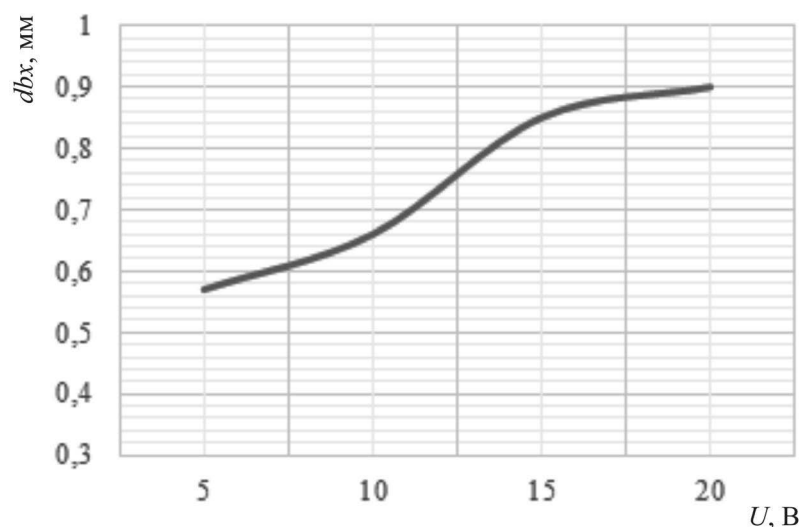


Рис. 7. Зависимость диаметра входного отверстия от напряжения;

$P = 0,3$ МПа; $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26/0,46$ мм

мере углубления отверстия также подтверждается падением плотности тока по ходу обработки (рис. 6).

Данный факт можно объяснить тем, что по мере обработки увеличивается первоначально установленное значение межэлектродного зазора, что сопровождается ростом омического сопротивления потока электролита.

В то же время рост напряжения приводит к увеличению диаметра входного отверстия на образце (рис. 7), что также можно увидеть на фотографиях поперечных сечений образцов (см. рис. 5).

Если изменение глубины обработки со временем носит очевидный характер, то колебания величины диаметра входного отверстия от времени весьма незначительны (рис. 8). В основном изменение данного параметра зависит от напряжения (см. рис. 7).

Увеличение избыточного давления струи до 0,55 и 0,8 МПа не привело к изменению закономерностей формирования отверстия (рис. 9, 10).

Переход на следующие типоразмеры катодов-инструментов $\varnothing_{\text{кат}} = 0,39/0,64$ мм и 0,55/0,8 мм сопровождается увеличением глубины и входного диаметра отверстия при равных значениях остальных режимных параметров (рис. 11, 12). При этом сохраняется общая закономерность влияния режимных параметров ЭХО на процесс анодного растворения.

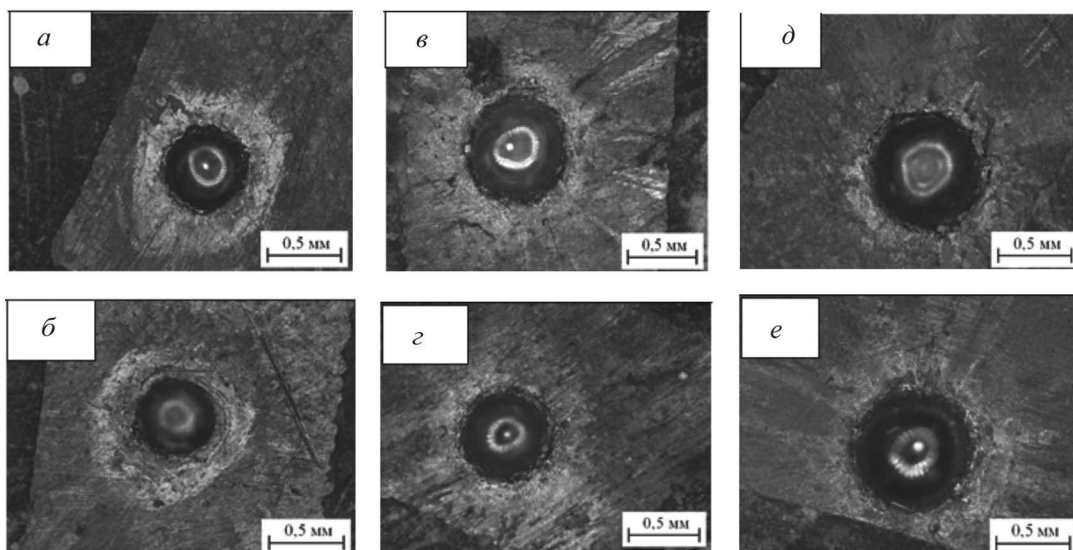


Рис. 8. Входное отверстие при различном времени обработки и напряжении на электродах:

$P = 0,3$ МПа; $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26/0,46$ мм; а – $U = 5$ В; $t = 3$ мин; б – $U = 5$ В; $t = 5$ мин; в – $U = 10$ В; $t = 3$ мин; г – $U = 10$ В; $t = 5$ мин; д – $U = 15$ В; $t = 3$ мин; е – $U = 15$ В; $t = 5$ мин)

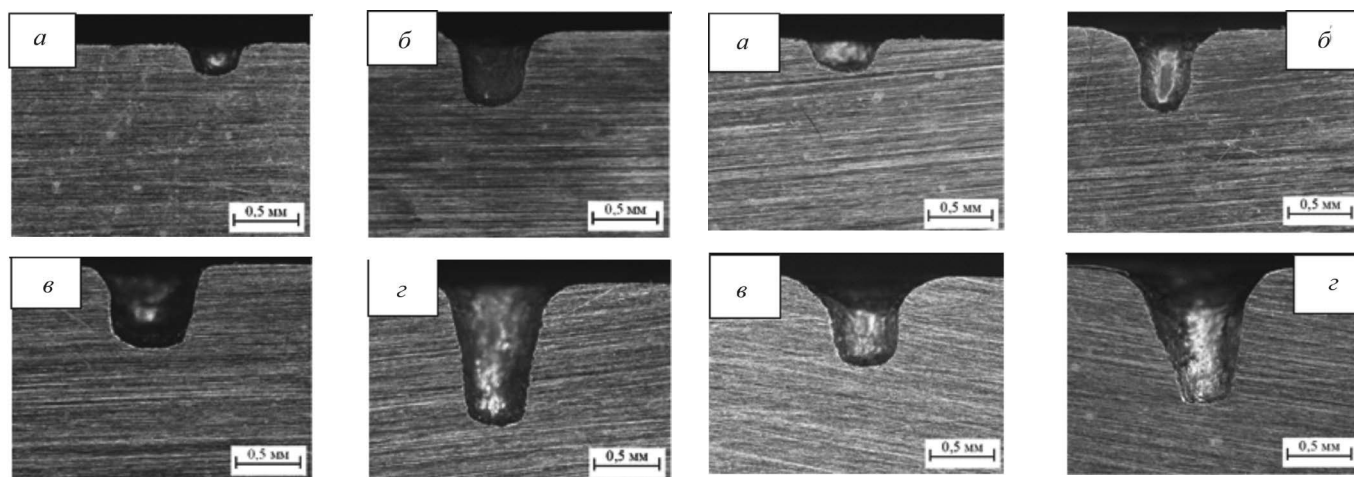


Рис. 9. Поперечные сечения отверстий:

$P = 0,55$ МПа; $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26/0,46$ мм; а – $U = 5$ В; $t = 3$ мин; б – $U = 15$ В; $t = 5$ мин; в – $U = 20$ В; $t = 5$ мин; г – $U = 20$ В; $t = 10$ мин

Рис. 10. Поперечные сечения отверстий:

$P = 0,8$ МПа; $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26/0,46$ мм; а – $U = 5$ В; $t = 3$ мин; б – $U = 15$ В; $t = 5$ мин; в – $U = 20$ В; $t = 5$ мин; г – $U = 20$ В; $t = 10$ мин

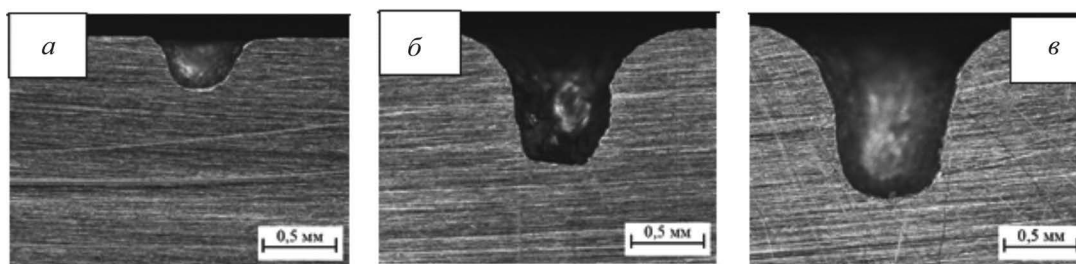


Рис. 11. Поперечные сечения отверстий при обработке катодом-инструментом

$\varnothing_{\text{кат}} = 0,39/0,64$ мм:

а – $U = 5$ В; $P = 0,3$ МПа; $t = 5$ мин; б – $U = 20$ В; $P = 0,55$ МПа; $t = 10$ мин; в – $U = 20$ В; $P = 0,8$ МПа; $t = 10$ мин

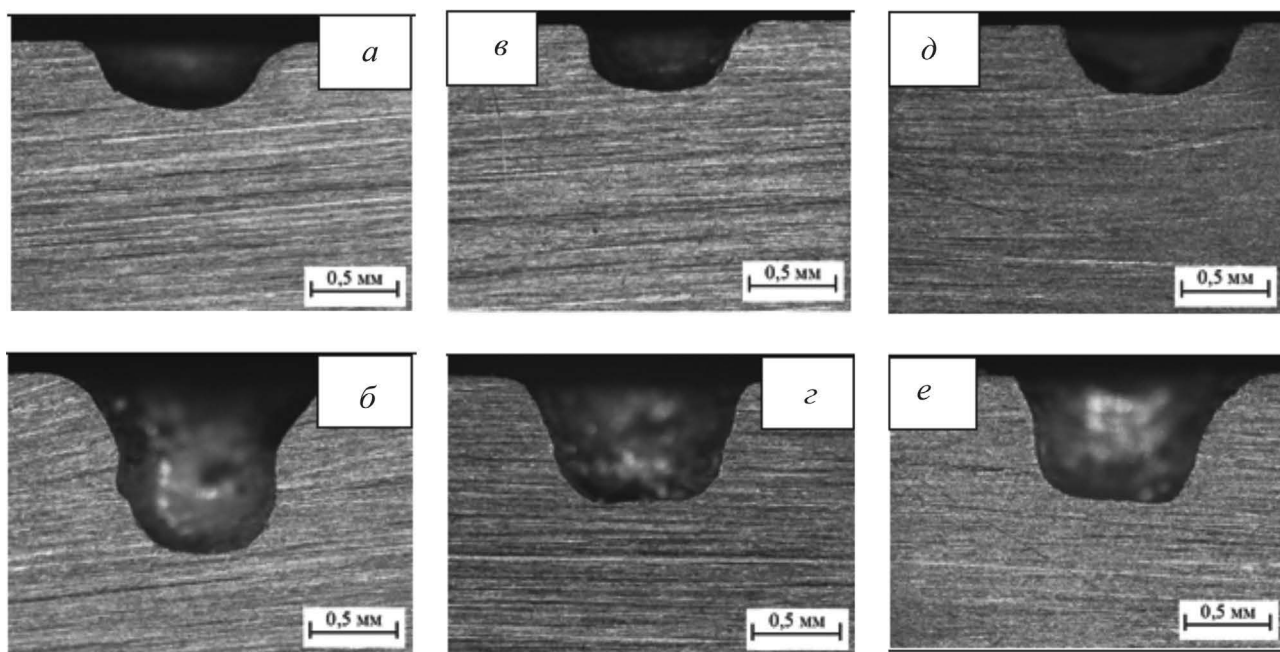


Рис. 12. Поперечные сечения отверстий при обработке катодом-инструментом $\varnothing_{\text{кат}} = 0,55/0,8$ мм:
 а – $U = 5$ В; $P = 0,3$ МПа; $t = 5$ мин; б – $U = 20$ В; $P = 0,3$ МПа; $t = 10$ мин; в – $U = 5$ В; $P = 0,55$ МПа; $t = 5$ мин;
 г – $U = 20$ В; $P = 0,55$ МПа; $t = 5$ мин; д – $U = 5$ В; $P = 0,8$ МПа; $t = 5$ мин; е – $U = 20$ В; $P = 0,8$ МПа; $t = 5$ мин

Выводы

Анализ полученных результатов позволил определить технологические возможности прошивки отверстий при использовании ЭХО неподвижным катодом-инструментом. Установлено, что плотности тока, реализуемые в обработке, составляющие в первоначальный момент обработки от 5 до 20 А/см² в зависимости от напряжения снижаются по мере формирования отверстия до 1,5...2,5 А/см² (при $U = 5$ В) и до 6...7 А/см² (при $U = 20$ В). Снижение плотности тока по мере углубления отверстия не позволяет поддерживать постоянной скорость обработки.

ЭХО по схеме стационарного катода-инструмента приводит к значительной потере точности получаемого отверстия за счет формирования конусности. Для устранения данного недостатка необходимо осуществлять стабилизацию межэлектродного зазора, используя так называемую схему нестационарного катода-инструмента [1]. Это позволит не только повысить точность прошивки, но и увеличить в определенной степени производительность процесса. Для дальнейшего совершенствования технологии ЭХО-отверстия в части повышения производительности потребуются поиск путей увеличения плотностей тока за счет ее комбинирования с другими электрофизическими процессами.

Список литературы

1. Мороз И.И. Электрохимическая размерная обработка металлов. – М.: Машиностроение, 2009. – 279 с.
2. Davydov A.D., Volgin V.M., Lyubimov V.V. Electrochemical machining of metals: fundamentals of electrochemical shaping // Russian Journal of Electrochemistry. – 2004. – Vol. 40, iss. 12. – P. 1230–1265. – doi: 10.1007/s11175-005-0002-6.
3. Митрюшин Е.А., Саушкин С.Б., Саушкин Б.П. Пути развития и перспективы применения технологий электрохимической размерной обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 12. – С. 40–45.
4. Высокоскоростное анодное растворение жаропрочных хромоникелевых сплавов, содержащих вольфрам и рений. 1. Хлоридные растворы / А.И. Дикусар, Б.П. Саушкин, И.А. Иваненков, С.А. Силкин, С.П. Ющенко // Электронная обработка материалов. – 2007. – Т. 43, № 1. – С. 4–15.
5. Lohrengel M.M. Pulsed electrochemical machining of iron in NaNO₃: fundamentals and new aspects // Materials and Manufacturing Processes. – 2005. – Vol. 20, iss. 1. – P. 1–8.
6. Zhang Z., Zhu D. Experimental research on the localized electrochemical micro-machining // Russian Journal of Electrochemistry. – 2008. – Vol. 44, N 8. – P. 926–930. – doi: 10.1134/S1023193508080077.
7. Электрохимическая размерная обработка сложнопрофильных отверстий малой глубины в де-

талях из хромоникелевых сплавов в хлоридных растворах / И.В. Яковец, В.Г. Звонкий, В.В. Коблов, А.И. Дикусар // Металлообработка. – 2006. – № 2. – С. 22–25.

8. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В. Анодное растворение быстрорежущей стали Р6М5 и ее составляющих в водных растворах // Сборник научных трудов НГТУ. – 2003. – № 4 (34). – С. 141–147.

9. Кабанов Б.Н., Давыдов А.Д., Кащеев В.Д. О взаимосвязи между особенностями анодного растворения металлов и точностью электрохимической размерной обработки // Размерная электрохимическая обработка деталей машин: материалы IV всесоюзной конференции. – Тула, 1975. – Ч. 1: Основы теории процесса. – С. 10–14.

10. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н. Размерная обработка деталей с покрытиями из наноструктурированных порошковых материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 4. – С. 22–26.

11. Амирханова Н.А., Галиев В.Э., Устюжанина С.В. Особенности высокоскоростного растворения железохромоникелевого сплава ХН35ВТЮ применительно к электрохимической обработке // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16, № 5 (50). – С. 132–136.

12. Электрохимическое растворение покрытий из порошковых материалов / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский, М.И. Никитенко, А.Н. Моисеенко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 2. – С. 3–5.

13. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И. Особенности анодного растворения спла-

ва ЖС 6 в условиях электроалмазной обработки // Инновации в машиностроении (ИнМаш–2015): VII Международная научно-практическая конференция: сборник трудов / Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева и др.; под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово, 2015. – С. 131–135.

14. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И. Степень локализации процесса при интенсификации анодного растворения меди // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 3 (68). – С. 58–65. – doi: 10.17212/1994-6309-2015-3-58-65.

15. Burov V.G., Yanpolskiy V.V., Rakhimyanov K. Kh. Technological aspects of forming the surface microrelief of low-wear coatings after electro-diamond grinding // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 126, N 1. – P. 012018. – doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012018.

16. Веневцева С.Н., Белоусов И.А. Микроэлектрохимическая обработка материалов с применением наносекундных импульсов технологического напряжения // Современная электротехнология в промышленности России (молодежные инновации): сборник трудов научно-технической конференции, Тула, 7 октября 2011 г. – Тула, 2011. – С. 9–10.

17. Левинсон Е.М. Отверстия малых размеров (методы получения). – Л.: Машиностроение, 1977. – 152 с.

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

OBRAOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (71), April – June 2016, Pages 12–20

Technological capabilities of the holes electrochemical machining using fixed cathode-tool

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

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

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

Abstract

The technological possibilities of electrochemical dimensional machining of copper using fixed cathode-instrument are considered. The cathode is hollow to supply the electrolyte into the processing area. It is proposed to use the scheme with a horizontal position of the cathode, which permitted to use the electrolyte stream as the forming tool. The dependence of the needed depth change in time that indicates a decrease in processing speed with increasing electrode gap is obtained. This fact is confirmed by decrease in current density during processing, and can be explained by the increase in the ohmic resistance of electrolyte flow with the increase of the electrode gap. It is

found that increasing technological voltage on the electrodes leads to the increase of treatment depth and the diameter of the inlet hole. Changing the overpressure of the jet from 0.3 to 0.8 MPa had no significant influence on processing productivity and on the regularities of the hole formation. It is shown that the increase in diameter of the cathode-tool is accompanied by a growth in both the depth of processing and the diameter of the inlet hole. The possibilities for further improvement of the electrochemical machining of a small-diameter holes to increase the productivity of the process and improve the accuracy parameters. Electrochemical machining scheme with fixed cathode-tool results in a significant loss of accuracy of the hole by cone forming. To eliminate this disadvantage it is necessary to stabilize the electrode gap using a so-called scheme of non-stationary cathode-tool. It allows us to improve the accuracy of the needling and also to increase to some extent the productivity of the process. Further improving of Electrochemical machining of holes in terms of increasing productivity requires finding ways to current density increasing by combining with other electro-physical processes.

Keywords

electrochemical machining, anode, cathode-tool, anodic dissolution, electrolyte, current density

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-12-20

References

1. Moroz I.I. *Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka metallov* [Electrochemical machining of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 279 p.
2. Davydov A.D., Volgin V.M., Lyubimov V.V. Electrochemical machining of metals: fundamentals of electrochemical shaping. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2004. vol. 40, iss. 12, pp. 1230–1265. doi: 10.1007/s11175-005-0002-6
3. Mitryushin E.A., Saushkin S.B., Saushkin B.P. Puti razvitiya i perspektivy primeneniya tekhnologii elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotki [Ways of development and prospects of application electrochemical dimensional processing technologies]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya – Strengthening technologies and coatings*, 2009, no. 12, pp. 40–45.
4. Dikuser A.I., Ivanenkov I.A., Saushkin B.P., Silkin S.A., Yushchenko S.P. Vysokoskorostnoe anodnoe rastvorenie zharoprochnykh khromonikelevykh splavov, sodershashchikh vol'fram i renii. 1. Khlordnye rastvory [High-speed anode dissolution of heat-resistant chrome-nickel alloys containing tungsten and rhenium. 1. Chloride solutions]. *Elektronnaya obrabotka materialov – Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2007, vol. 43, no. 1, pp. 4–15. (In Russian)
5. Lohrengel M.M. Pulsed electrochemical machining of iron in NaNO_3 : fundamentals and new aspects. *Materials and Manufacturing Processes*, 2005, vol. 20, iss. 1, pp. 1–8. doi: 10.1081/AMP-200041591
6. Zhang Z., Zhu D. Experimental research on the localized electrochemical micro-machining. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2008, vol. 44, iss. 8, pp. 926–930. doi: 10.1134/S1023193508080077
7. Jakovets I.V., Zvonkyj V.G., Koblov V.V., Dikuser A.I. Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka slozhnoprofil'nykh otverstii maloi glubiny v detalyakh iz khromonikelevykh splavov v khlordnykh rastvorakh [Electrochemical dimensional processing (ECDP) of complicated-profile apertures of small depth in details from chromel alloys in chloride solutions]. *MetallООbrabotka – Metal processing*, 2006, no. 2, pp. 22–25.
8. Rakhimyanov Kh.M., Yanpolsky V.V. Anodnoe rastvorenie bystrorezhushchei stali R6M5 i ee sostavlyayushchikh v vodnykh rastvorakh [Anode dissolution of high-speed steel R6M5 and its components in water solutions]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2003, no. 4 (34), pp. 141–147.
9. Kabanov B.N., Davydov A.D., Kashcheev V.D. [On the relationship between the characteristics of the anodic dissolution of metals and precision electrochemical machining]. *Materialy IV vsesoyuznoi konferentsii “Razmernaya elektrokhimicheskaya obrabotka detalei mashin”. Ch. 1. Osnovy teorii protsessa* [Proceedings of the IV All-Union Conference “Dimensional Electrochemical Machining of Machine Parts”. Pt. 1. Basic Theory of the Process]. Tula, 1975, pp. 10–14. (In Russian)
10. Rakhimyanov Kh.M., Yanpolsky V.V., Moiseenko A.N. Razmernaya obrabotka detalei s pokrytiyami iz nanostrukturirovannykh poroshkovykh materialov [Dimensional processing of details with coverings from nano powder materials]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2010, no. 4, pp. 22–26.
11. Amirkhanova N.A., Galiyev V.E., Ustyuzhanina S.V. Osobennosti vysokoskorostnogo rastvoreniya zhelezo-khromonikelevogo splava KhN35VTYu primenitel'no k elektrokhimicheskoi obrabotke [Features of high-speed dis-

solution of iron–chromium–nickel alloy XH35BTiO at electrochemical machining]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, 2012, vol. 16, no. 5 (50), pp. 132–136.

12. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Yanpolsky V.V., Nikitenko M.I., Moiseenko A.N. Elektrokhimicheskoe rastvorenie pokrytii iz poroshkovykh materialov [Electrochemical dissolution of coatings from powder materials]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 2, pp. 3–5.

13. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Vasilevskaya S.I. [Features of anode dissolution of the alloy of ЖС 6 in the conditions of electrodiamond processing]. *Innovatsii v mashinostroenii (InMash–2015): VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: sbornik trudov* [Innovations in mechanical engineering: VII International scientific and practical conference: Materials]. Kemerovo, 2015, pp. 131–135. (In Russian)

14. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Vasilevskaya S.I. Stepen' lokalizatsii protsessa pri intensifikatsii anodnogo rastvoreniya medi [The degree of the process localization at the intensification of anodic dissolution of copper]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2015, no. 3 (68), pp. 58–65. doi: 10.17212/1994-6309-2015-3-58-65

15. Burov V.G., Yanpolskiy V.V., Rakhimyanov K.Kh. Technological aspects of forming the surface microrelief of low-wear coatings after electro-diamond grinding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126, no. 1, p. 012018. doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012018

16. Venevtseva S.N., Belousov I.A. [Mikroelektrokhimicheskaya processing materials using nanosecond pulse voltage technology]. *Sbornik trudov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Sovremennaya elektrotekhnologiya v promyshlennosti Rossii (molodezhnye innovatsii)"* [Proceedings of the scientific-technical conference "Modern electro-technology industry in Russia (youth innovation)"], Tula, 7 October 2011, pp. 9–10. (In Russian)

17. Levinson E.M. *Otverstiya malykh razmerov (metody polucheniya)* [Small size holes (production methods)]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977. 152 p.

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

Article history:

Received 4 March 2016

Revised 5 April 2016

Accepted 15 May 2016

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КРУГОВ НА КЕРАМИЧЕСКОЙ И БАКЕЛИТОВОЙ СВЯЗКАХ

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

Поступила 30 марта 2016
Рецензирование 29 апреля 2016
Принята к печати 15 мая 2016

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

Шлифование износостойких микропористых покрытий на никелевой и железной основе отмечается низкой шлифуемостью и сопровождается быстрой потерей абразивными кругами режущей способности из-за высокой теплосиловой напряженности процесса, интенсивного износа и засаливания кругов. При шлифовании работа абразивного зерна в значительной степени зависит от прочности удержания его в круге, т. е. от типа и количества связки. Учитывая низкую теплопроводность и склонность микропористых покрытий к прижогаобразованию при шлифовании, становится особенно важным снижение затрат на трение. Этому условию может удовлетворять выбор более антифрикционного материала связок при соблюдении требований достаточно надежного закрепления абразивных зерен в круге.

В статье представлены результаты исследований режущей способности кругов из электрокорунда и карбида кремния на керамической и бакелитовых связках при черновом шлифовании микропористых покрытий на никелевой и железной основе. Установлены периоды стойкости кругов и производительность обработки, исследованы силовая напряженность шлифования, энергозатраты и другие показатели. Сделано заключение о целесообразности перехода к использованию абразивного инструмента на керамической связке, что позволяет увеличить стойкость кругов и производительность обработки при одновременном снижении силовой напряженности процесса шлифования и энергозатрат по сравнению с кругами на бакелитовой связке. Комплексная оценка результатов испытаний показала, что наибольшей эффективностью при круглом наружном шлифовании микропористых покрытий на никелевой основе обладает абразивный круг из электрокорунда на керамической связке, а при шлифовании покрытий на железной основе – абразивный круг из карбида кремния также на керамической связке.

Ключевые слова: плазменные покрытия, абразивная обработка, связка, шлифовальные круги, силы резания, износ инструмента, шероховатость поверхности.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-21-27

Введение

Нанесение микропористых износостойких покрытий на никелевой и железной основе (далее покрытий) для упрочнения и восстановления изношенных деталей машин давно стало общепризнанным [1]. Основным методом черновой обработки этих покрытий является шлифование.

При этом работоспособность абразивного инструмента (АИ), интенсивность съема материала, качество изделий после обработки и экономичность шлифования во многом определяются видом связующего, или связки [2, 3]. В связи с этим выбору связки придают важное значение.

Шлифовальный инструмент из сверхтвердых материалов (СТМ) – синтетического алмаза и

эльбора – изготавливают на металлической, керамической и органической связках. Исследования установили [4–9], что при шлифовании покрытий алмазными кругами на металлической связке происходит интенсивное «засаливание» их рабочей поверхности. Это связано с наличием химического сродства материала детали с материалом связки, являющейся причиной интенсивного образования «налипов» из продуктов шлифования, а также высокой прочностью металлической связки. Поэтому эти круги быстро теряют режущую способность и их использование затруднено.

Лучшие результаты при шлифовании покрытий показали круги из СТМ на органической связке [4, 6, 9]. Обладая демпфирующей способностью, эта связка позволяет алмазным и эльборовым зернам лучше использовать их режущие свойства. Алмазные круги на органической связке хорошо самозатачиваются, на режущей поверхности инструмента заметные «налипы» отсутствуют, и процесс шлифования протекает стабильно.

Промежуточное положение по величине износа и достигаемому периоду стойкости занимают шлифовальные круги (ШК) из СТМ на керамической связке [7–9]. При работе этими кругами тоже имеет место незначительное образование «налипов», но они удаляются вместе с достаточно мягкой связкой. Постепенно этот процесс приводит к обновлению режущей поверхности ШК и можно считать, что круг работает в режиме самозатачивания.

Из сказанного следует, что круги из СТМ на органической и керамической связках в целом хорошо зарекомендовали себя на практике при шлифовании покрытий, однако они значительно дороже абразивных, поэтому и не нашли широкого применения в промышленности [6, 7].

При изготовлении абразивных инструментов из традиционных шлифовальных материалов – электрокорунда и карбида кремния – наиболее распространенными являются керамическая, бакелитовая и вулканитовая связки [10]. Довольно редко используются силикатовые, магнезиальные и другие связки.

При выборе связки для шлифования компактных (однородных) материалов основное внимание обращают на вид и характер операций абразивной обработки и на условия рабо-

ты инструмента. Вулканитовые связки обычно используются при изготовлении кругов для отрезки, шлифования пазов и фасонных поверхностей, отделочного шлифования и полирования [11]. Для размерной черновой и чистовой абразивной обработки деталей используются преимущественно круги на керамической и бакелитовой связке.

Однако в технической литературе отсутствуют рекомендации и систематизированные данные о влиянии вида связки на основные показатели процесса чернового шлифования покрытий кругами из электрокорунда и карбида кремния. В статье представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных в целях сравнительной оценки работоспособности ШК на керамической и бакелитовой связке при черновом шлифовании покрытий.

Методика экспериментального исследования

Для определения влияния вида связки на основные показатели процесса шлифования покрытий проведено комплексное исследование работоспособности опытных кругов. Исследования проводились на экспериментальной установке на базе круглошлифовального полуавтомата мод. 3М152МВФ2 с ЧПУ по схеме круглого наружного продольного шлифования с выхаживанием по методике [12]. Шлифовали образцы – втулки из стали 45 диаметром $60 \pm 0,1$ мм и высотой 70 мм с плазменно-напыленными покрытиями на никелевой (покрытие ПВ) и железной (покрытие ПЖ) основе [12].

Покрытия обрабатывали серийными кругами из электрокорунда нормального (14А) на керамической (V) и бакелитовой (В) связках с характеристикой 14AF46N6 формы 1 600×25×305 ГОСТ Р52781–2007. Для сравнения испытывались круги из карбида кремния черного 54CF46N6 также на связках V и В тех же геометрических размеров. Выбор типоразмера и характеристики кругов для проведения экспериментов был обусловлен их широким применением в промышленности [13].

Параметры режима резания, подобранные на основании рекомендаций [5], поддерживались неизменными: скорость резания 35 м/с, скорость вращения детали 18,84 м/мин, скорость

продольной подачи 425 мм/мин и глубина резания 10 мкм.

Экспериментальная установка оснащена системами подачи СОЖ с поливом в зону шлифования и очистки ее от шлифовального шлама с помощью магнитного сепаратора и бака-отстойника. В качестве СОЖ применялся 3%-й водный раствор эмульсола «ЭПМ-1шп», который подавали поливом в зону шлифования свободно падающей струей через клиновой насадок с расходом 12 л/мин.

ШК правили методом обтачивания алмазным карандашом 3308-0054 (ГОСТ 607–80) с непрерывной подачей СОЖ поливом с расходом 4 л/мин. Режим правки: четыре рабочих хода с подачей 0,03...0,04 мм/дв.ход; два прохода без подачи алмазного карандаша; скорость продольной подачи 140±5 мм/мин.

Для оценки работоспособности АИ использовали перечисленные ниже критерии.

1. Период стойкости T кругов, определяемый по появлению следов дробления или прижогов на шлифованной поверхности, мин.

2. Удельная производительность, мм³/мм³:

$$q = Q_m / Q_a$$

где Q_m – объем материала, снятого с заготовки (образца) за период стойкости ШК, мм³; Q_a – объем рабочего слоя ШК, израсходованного за тот же период, мм³.

3. Коэффициент режущей способности абразивного круга, мм³/мин·Н:

$$K_p = Q_m / TP_y$$

где P_y – среднее значение радиальной составляющей силы резания за период стойкости ШК, Н.

4. Удельная мощность шлифования, Вт·мин/мм³:

$$K_N = N_{эф} / Q_m$$

где $N_{эф}$ – эффективная мощность шлифования, Вт;

$$N_{эф} = P_z V_{кр} / 102,$$

где P_z – среднее значение тангенциальной составляющей силы резания за период стойкости ШК, Н; $V_{кр}$ – скорость резания, м/с.

5. Шероховатость шлифованной поверхности, оцениваемая по параметру Ra , мкм.

6. Комплексный критерий, мм³/мин·Вт·мкм:

$$K_m = Q_m / N_{эф} Ra.$$

7. Интенсивность засаливания ШК за период их стойкости при шлифовании покрытия ПЖ, мг/см²·мин:

$$C_3 = m / S_k T,$$

где m – количество налипшего материала на рабочую поверхность ШК за период его стойкости, мг; S_k – площадь рабочей поверхности ШК, см².

Продолжительность опытов равнялась периоду стойкости круга. По ходу экспериментов фиксировали составляющие P_y и P_z силы резания с помощью измерительной установки. По окончании каждого опыта определяли величину припуска, снятого с образца за время эксперимента, измеряли его размерный износ и контролировали шероховатость шлифованной поверхности. Затем определяли значения всех расчетных показателей процесса шлифования (Q_m , Q_a , q , K_p , K_N , K_m и C_3).

Измерение диаметра образцов до и после шлифования производилось гладким микрометром Din 863 (производство фирмы «Микрон», Чешская Республика) с ценой деления 0,01 мм. Размерный износ АИ измеряли индикатором часового типа с ценой деления 0,001 мм. Шероховатость шлифованной поверхности контролировалась на профилографе – профилометре АБРИС – ПМ7. Наличие прижогов на поверхности устанавливалось визуально.

Испытания кругов проводили трехкратно, что обеспечивало достоверность полученных результатов с вероятностью $P = 0,95$. По каждой серии опытов определялись средние значения показателей.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Результаты испытаний кругов при круглом наружном продольном шлифовании покрытий показаны в таблице. Видно, что при обработке покрытия ПВ круги на керамической связке как из электрокорунда, так и из карбида кремния имели больший период стойкости, чем круги из 14А и 54С на бакелитовой связке, что объясняется лучшими антифрикционными свойствами керамической связки [14].

Усредненные показатели продольного шлифования плазменных покрытий кругами на керамической и бакелитовой связках

Показатели шлифования		Характеристики кругов			
		14AF46N6V/B	54CF46N6V/B	14AF46N6V/B	54CF46N6V/B
		Результаты, полученные при шлифовании покрытия на никелевой основе кругами на керамической (числитель) и бакелитовой (знаменатель) связках		Результаты, полученные при шлифовании покрытия на железной основе кругами на керамической (числитель) и бакелитовой (знаменатель) связках	
Стойкость кругов T , мин		6,5/5,9	3,1/3,0	13,1/9,6	50,0/22,0
Удельная производительность q , мм ³ /мм ³		3,5/2,8	1,7/2,4	5,2/6,2	28,3/19,4
Составляющие силы шлифования, Н	P_y	103/162	179/121	117/118	104/112
	P_z	59/95	96/79	57/67	40/56
Удельная мощность шлифования K_N , Вт·мин/мм ³		57,3/106	98,5/80,8	57,2/61,6	33,9/49,8
Коэффициент режущей способности K_p , мм ³ /мин·Н		3,4/1,9	1,9/2,7	2,9/3,2	3,9/3,4
Комплексный критерий K_m , мм ³ /мин·Вт·мкм		0,093/0,045	0,070/0,052	0,081/0,066	0,127/0,048
Шероховатость поверхности Ra , мкм		0,19/0,21	0,14/0,24	0,32/0,35	0,23/0,41
Интенсивность засаливания кругов C_3 , мг/см ² ·мин		—	—	0,075/0,071	0,033/0,079

Удельная производительность q , достигаемая кругом 14AF46N6V, превышала этот показатель для кругов 14AF46N6B и 54CF46N6B соответственно в 1,3 и 1,5 раза, что свидетельствует о наименьшей интенсивности его изнашивания. Причину такого различия можно объяснить более надежным закреплением абразивных зерен в круге при использовании керамической связки [15, 16].

Исследования силовой напряженности и энергозатрат показали (см. таблицу), что при шлифовании покрытия ПВ кругом 14AF46N6V силы P_y и P_z уменьшились по сравнению с шлифованием кругами 14AF46N6B и 54CF46N6B соответственно на 17...57 и 34...61 %, а энергозатраты соответственно на 85 и 41 %.

Наибольшие значения коэффициента K_p при шлифовании покрытия ПВ получены при использовании электрокорундового круга на связке V . При оценке технологической эффек-

тивности по комплексному критерию K_m также выявляются преимущества круга из 14А на керамической связке.

При шлифовании покрытия ПВ существенных различий значений параметра Ra шероховатости поверхностей, шлифованных кругами на керамической и бакелитовой связках, не выявлено.

При обработке покрытия ПЖ, как и при шлифовании покрытия ПВ, периоды стойкости кругов из 14А и 54С на керамической связке оказались более продолжительными по сравнению с кругами из электрокорунда и карбида кремния на бакелитовой связке (см. таблицу). Так, значение T , зафиксированное для АИ 14AF46N6V, превысило этот показатель для круга 14AF46N6B в 1,4 раза, а период стойкости ШК 54CF46N6V оказался в 2,3 раза больше, чем у круга 54CF46N6B.

Наименьшая силовая напряженность процесса шлифования покрытия ПЖ получена при



использовании круга из 54С на связке V, а следовательно, и удельная мощность шлифования этим кругом ниже, чем кругами 14AF46N6B и 54CF46N6B соответственно на 82 и 47 %. Следует отметить, что достигнутые результаты по силам P_y и P_z и удельной мощности K_N для круга 54CF46N6V получены при существенно большем значении периода его стойкости ($T = 50$ мин). Шлифовальный инструмент из 54С на керамической связке обеспечивает наименьшую интенсивность изнашивания его рабочей поверхности ($q = 28,3 \text{ мм}^3/\text{мм}^3$). При использовании круга из 54С на связке V были достигнуты наибольшие значения коэффициента K_p и комплексного критерия K_m .

Применение круга из 54С на керамической связке позволяет получить шлифованные поверхности с меньшим параметром шероховатости ($Ra = 0,23 \text{ мкм}$), что в совокупности с меньшими значениями сил P_y и P_z положительно сказывается на качестве обработанной поверхности и уменьшает вероятность отслаивания покрытия.

Интенсивность засаливания C_3 круга 54CF46N6V при шлифовании покрытия ПЖ оказалась более чем в два раза ниже по сравнению с этим показателем, достигаемым при обработке кругами 14AF46N6B и 54CF46N6B.

Выводы

1. Комплексная оценка результатов испытаний показала, что при круглом наружном шлифовании с продольной подачей микропористых покрытий на никелевой и железной основе кругами из электрокорунда и карбида кремния на бакелитовой связке не обеспечивает достаточной технологической эффективности.

2. Более высокая режущая способность АИ в рассмотренных условиях шлифования микропористых покрытий на никелевой основе по совокупности установленных показателей обеспечивается кругом из электрокорунда на керамической связке.

3. В рассмотренных условиях обработки микропористых покрытий на железной основе более высокие эксплуатационные возможности показал абразивный круг из карбида кремния также на керамической связке.

Список литературы

1. Черноиванов В.И., Лялякин В.П. Организация и технология восстановления деталей машин. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: ГОСНИТИ, 2003. – 488 с.
2. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.
3. Nagaraj A.P., Ghattopadhyay A.K. On some aspects of wheel loading // Wear. – 1989. – Vol. 135, iss. 1. – P. 41–52. – doi: 10.1016/0043-1648(89)90094-X.
4. Кащук В.А., Верещагин А.Б., Чистяков Е.М. Шлифование детонационных покрытий // Новые сверхтвердые материалы и прогрессивные технологии их применения: тезисы докладов всесоюзной конференции, Канев, сентябрь 1985. – Киев: ИСМ, 1985. – С. 140–141.
5. Совершенствование процесса шлифования износостойких покрытий / П.И. Ящерицын, С.Н. Казаков, С.И. Миткевич, А.И. Белицкая // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента: межвузовский сборник научных трудов. – Пенза, 1986. – Вып. 14. – С. 3–8.
6. Сире Ю.С. Обрабатываемость наплавов и покрытий алмазными кругами при торцевом и круглом шлифовании // Прогрессивные процессы шлифования, инструменты и его рациональная эксплуатация: тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции, Ереван, 14–16 октября 1986 г. – М., 1986. – С. 124–127.
7. Сире Ю.С., Горбатовский В.М. Определение областей эффективного использования алмазных кругов при шлифовании наплавов и покрытий // Повышение технического уровня алмазных инструментов: труды ВНИИалмаза. – М., 1987. – С. 26–32.
8. Иванов В.А., Спиринов В.А., Фассахов И.Т. Износостойкость шлифовальных кругов при обработке деталей с напыленными покрытиями // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении: межвузовский сборник научных трудов. – Пермь, 1990. – С. 145–150.
9. Неклюдов В.И. Выбор режущего инструмента и режимов при точении и шлифовании покрытия ПН85Ю15 // Трение. Износ. Смазка. – 2003. – Т. 5, № 4. – С. 65–69.
10. Дятлов В.Н. Исходные материалы для абразивного инструмента // Машины и технология обработки давлением порошковых и композиционных материалов: сборник научных трудов. – Челябинск, 1997. – С. 63–73.
11. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

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

13. Худобин Л.В., Правиков Ю.М. Анализ номенклатуры абразивных инструментов, применяемых на предприятиях Ульяновской области // Вестник УлГТУ. – 2003. – № 1/2. – С. 34–36.

14. Шлифование сплавов на основе титана: методические рекомендации / Г.И. Саютин, И.В. Хар-

ченко, А.Д. Богущкий, Д.Н. Спиридонов, А.П. Гатаинов, В.А. Носенко. – М.: НИИМАШ, 1977. – 27 с.

15. Смирнов В.А., Григорьева К.Т., Саютин Г.И. Пути снижения работы трения в зоне резания за счет уменьшения количества связки в круге // Физико-химические явления при шлифовании: материалы семинара (г. Волжский, 3–5 октября 1972 г.). – Киев, 1976. – С. 14–17.

16. Stokes R.J., Valentine T.J. Wear mechanisms of ABN abrasive // Industrial Diamond Review. – 1984. – Iss. 1. – P. 34–44.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (71), April – June 2016, Pages 21–27

A comparative analysis of the efficiency of ceramic and bakelite bonded grinding wheels

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

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

Ivanov S. V., Engineer, e-mail: vitsal_72@mail.ru

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

Abstract

Grinding of nickel and iron based wear-resistant microporous coatings is marked to have low grindability and is accompanied by a rapid loss of cutting capacity of the abrasive wheels due to the high intensity of thermal power process, intensive wear and wheels smearing. In the grinding operation the performance of the abrasive grains largely depends on the strength of its retention in the disc, i.e. the type and number of bond. In consideration of the low thermal conductivity and the tendency of micro porous coatings to burn during grinding, it is particularly important to minimize friction costs. This requirement can be met by a choice of more antifriction material of the bonds while meeting the requirements of a sufficiently reliable fastening of the abrasive grains in the wheel.

The research data on the cutting ability of wheels of aluminum oxide and silicon carbide with a ceramic and bakelite bond for rough grinding of nickel and iron based microporous coatings are presented in the article. Redress life and process efficiency are established, grinding power strain, energy demands and other indicators are investigated. The findings of the feasibility of the transition to the use of an abrasive tool with a ceramic bond, which allows increasing the wheels resistance and processing performance while reducing power strain of the grinding process and energy demands compared with wheels on bakelite base, are made. A comprehensive assessment of the test results showed that in the round external grinding of nickel-based microporous coatings the most effective is an abrasive wheel of made of electrocorundum with a ceramic bond, and when grinding iron-based coating – abrasive wheel made of silicon carbide with a ceramic bond.

Keywords

plasma coatings, abrasive tool, bond, grinding wheels, cutting forces, tool wear out, surface roughness

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-21-27

References

1. Chernov V.I., Lyalyakin V.P. *Organizatsiya i tekhnologiya vosstanovleniya detalei mashin* [Organization and technology of details of machines]. 2nd ed. Moscow, GOSNITI Publ., 2003. 488 p.

2. Maslov E.N. *Teoriya shlifovaniya materialov* [Theory of grinding materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 319 p.
3. Nagaraj A.P., Ghattopadhyay A.K. On some aspects of wheel loading. *Wear*, 1989, vol. 135, iss. 1, pp. 41–52. doi: 10.1016/0043-1648(89)90094-X
4. Kashchuk V.A., Vereshchagin A.B., Chistyakov E.M. [Grinding detonation coatings]. *Tezisy dokladov vsesoyuznoi konferentsii "Novye sverkhтвердые материалы i progressivnye tekhnologii ikh primeneniya"* [Proceedings of the All-Union Conference "New superhard materials and advanced technology of their application"]. Kiev, 1985, pp. 140–141.
5. Yashcheritsyn P.I., Kazakov S.N., Mitkevich S.I., Belitskaya A.I. [Improving the process of grinding wear-resistant coatings]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov "Almaznaya i abrazivnaya obrabotka detalei mashin i instrumenta"* [The interuniversity collection of scientific papers "Diamond and abrasion of machine parts and tools"], 1986, iss. 14, pp. 3–8.
6. Sire Yu.S. [Workability claddings and coatings diamond wheels in face and cylindrical grinding]. *Tezisy dokladov vsesoyuznoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Progressivnye protsessy shlifovaniya, instrumenty i ego ratsional'naya ekspluatatsiya"* [Proceedings of the All-Union Scientific and Technical Conference "Progressive grinding processes, tools, and its rational exploitation"]. Moscow, 1986, pp. 124–127.
7. Sire Yu.S., Gorbatskii V.M. [Determination of the effective use of diamond wheels for grinding weld overlays and coatings]. *Trudy VNIImaza "Povyshenie tekhnicheskogo urovnya almaznykh instrumentov"* [Proceedings of the Scientific-research institute for natural, synthetic diamond and tools "Raising the technical level of diamond tools"]. Moscow, 1987, pp. 26–32.
8. Ivanov V.A., Spirin V.A., Fassakhov I.T. [The wear resistance of the grinding wheel in the processing of parts with a spray coating]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov "Sovershenstvovanie protsessov abrazivno-almaznoi i uprochnyayushchei obrabotki v mashinostroyeni"* [The interuniversity collection of scientific papers "Process improvement diamond abrasive and hardening treatment in mechanical engineering"]. Perm', 1990, pp. 145–150.
9. Neklyudov V.I. Vybor rezhushchego instrumenta i rezhimov pri tochenii i shlifovanii pokrytiya PN85Yu15 [The choice of cutting tools and modes for turning and grinding coating ПН85Ю15]. *Trenie. Iznos. Smazka – Friction. Wear. Lubricant*, 2003, vol. 5, no. 4, pp. 65–69.
10. Dyatlov V.N. [The starting materials for abrasive tools]. *Sbornik nauchnykh trudov "Mashiny i tekhnologiya obrabotki davleniem poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov"* [Proceedings of scientific papers "Machines and technology forming powder and composite materials"]. Chelyabinsk, 1997, pp. 63–73.
11. Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroyitelya*. V 2 t. T. 2 [The handbook of technologist-machine engineer. In 2 vol. Vol. 2]. 4th ed., corrected. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 496 p.
12. Alekseev N.S., Ivanov S.V., Kaporin V.A. [Grinding plasma coatings on nickel and iron base]. *Materialy 16-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Tekhnologii uprochneniya, naneseniya pokrytii i remonta: teoriya i praktika"*. V 2 ch. Ch. 1 [Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Conference "Hardening, coating and repair technologies: Theory and Practice", St. Petersburg, 15–18 April 2014: in 2 pt.]. St. Petersburg, 2014, pt. 1, pp. 181–187. (In Russian)
13. Khudobin L.V., Pravikov Yu.M. *Analiz nomenklatury abrazivnykh instrumentov, primenyaemykh na predpriyatiyakh Ul'yanovskoi oblasti* [The analysis of the nomenclature of the abrasive tools used at the enterprises of the Ulyanovsk area]. *Vestnik UIGTU – Vestnik of UlSTU*, 2003, no. 1–2, pp. 34–36.
14. Sayutin G.I., Kharchenko I.V., Bogutskii A.D., Spiridonov D.N., Gatarinov A.P., Nosenko V.A. *Shlifovanie splavov na osnove titana: metodicheskie rekomendatsii* [Grinding of titanium-based alloys. Guidelines]. Moscow, NIIMASh Publ., 1977. 27 p.
15. Smirnov V.A., Grigor'eva K.T., Sayutin G.I. [Ways to reduce the work of friction in the cutting area by reducing the number of bundles in a circle]. *Materialy seminara "Fiziko-khimicheskie yavleniya pri shlifovanii"* [Proceedings of scientific seminar "The physico-chemical phenomena in grinding", Volzhsky, 3–5 October 1972]. Kiev, 1976, pp. 14–17.
16. Stokes R.J., Valentine T.J. Wear mechanisms of ABN abrasive. *Industrial Diamond Review*, 1984, iss. 1, pp. 34–44.

Article history:

Received 30 March 2016

Revised 29 April 2016

Accepted 15 May 2016

ОЦЕНКА РЕЖУЩИХ СПОСОБНОСТЕЙ НИТРИДБОРОВЫХ ВЫСОКОПОРИСТЫХ КРУГОВ ПРИ МАЯТНИКОВОМ ШЛИФОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА ВТ20 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*Я.И. СОЛЕР, канд. техн. наук, доцент
ДИНЬ ШИ МАЙ, аспирант
ВАН ЛЕ НГУЕН, аспирант
(ИрННТУ, г. Иркутск)*

Поступила 2 апреля 2016
Рецензирование 3 мая 2016
Принята к печати 15 мая 2016

Солер Я.И. – 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
email: solera@istu.irk.ru

Прорыв при шлифовании титановых сплавов обеспечил появление на рынке абразивной продукции высокопористых кругов (ВПК) из кубического нитрида бора (КНБ), снизивших адгезионное и диффузионное явления, протекающие в зоне резания. В исследовании испытаны ВПК из КНБ шести наименований (CBN30; ЛКВ50) В126 100 (L; M; O) V K27 (КФ25; КФ40). Стохастический характер шлифования обусловил выбор непараметрического метода статистики с его мерами положения (медианами) и рассеяния (квартильными широтами (КШ), которые оценивают параметры шлифования: R_a , R_{max} , S_m (ГОСТ 2789–73). Вследствие высокой режущей способности (РС) нитридборовых ВПК на заводах стали использовать для шлифования любые нитридборовые ВПК. Нами установлено, что выбор оптимальной характеристики позволяет снизить высотные параметры на 2-3 категориальных величины или 1-2 технологических перехода. Моделирование топографии поверхности в искусственных нейронных сетях (ИНС) по трем параметрам шероховатости с учетом стабильности их формирования позволило первое место по РС отдать ВПК ЛКВ50 В126 100 MV K27-КФ40 с лингвистической оценкой «очень хорошая». ИНС представили входные переменные по убыванию чувствительности к принятию решения в следующей последовательности: R_a , R_{max} , $КШ(R_{max})$, $КШ(S_m)$, $КШ(R_{a1i})$ и S_m .

Ключевые слова: шлифование, титановый сплав ВТ20, статистика, искусственная нейронная сеть, чувствительность.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-28-40

Введение

Развитие современного машиностроительного производства непрерывно требует повышения эксплуатационных свойств деталей и машин. Сказанное обеспечивается физико-механическими свойствами материалов деталей и технологией их изготовления. В авиационной и космической технике, судостроении, нефтяном и химическом машиностроении для многих от-

ветственных деталей используются титановые сплавы благодаря их высокой удельной прочности и коррозионной стойкости. Качество поверхности деталей в первую очередь определяется ее шероховатостью, которая на завершающем этапе их изготовления обычно достигается шлифованием. Однако для титановых деталей оно используется намного реже, чем для стальных. Последнее обусловлено низкой шлифуемостью титана [1–3], что вызвано адгезионным и диффу-

зионным взаимодействием между абразивными зернами и титановыми сплавами. Эффективным средством снижения этих дефектов служит использование высокопористых кругов (ВПК) из кубического нитрида бора (КНБ, зарубежная аббревиатура – CBN). Инструменты из КНБ обеспечивают повышение эффективности шлифования титановых сплавов до 8...10 раз. Поры, созданные в ВПК разными методами, позволяют свободно размещать в них стружки, тем самым снижать засаливание, а также улучшать условия подачи СОЖ в зону резания, предотвращая появление прижогов и трещин.

Несмотря на то что было выполнено много работ, связанных с исследованием процесса шлифования титановых сплавов, эта проблема остается недостаточно изученной до сих пор. На качество титановых деталей при абразивной обработке влияют механические свойства конкретных марок, которые зависят от индивидуальных свойств и фаз, их расположения и объемной доли. В частности, сплав BT20 представляет систему $Ti - (5,5...7,0) \% Al - (1,5...2,5) \% Zn - (0,5...2) \% Mo - (0,8...2,5) \% V$. Содержание β -стабилизирующих элементов (Mo, V) в нем весьма невелико. Он практически является однофазным с α -структурой (более строгая характеристика: псевдо- α -сплав). Все псевдо- α -сплавы не подвергаются закалке и используются в отожженном состоянии. Механические свойства исследуемого сплава: $\sigma_b = 950...1150$ МПа, $\sigma_{0,2} = 840$ МПа, $\delta = 10 \%$, $\psi = 25 \%$, $E = 105...110$ ГПа, $KCU = 0,8...1,0$ МДж/м², что позволяет относить его к среднепрочным [1–3]. Этот сплав используется в основном для изготовления обшивки крыла, корпусных деталей, деталей газотурбинных двигателей, сварных узлов, работающих до 400...450 °С [4].

ВПК по сравнению с лезвийными режущими инструментами имеют свои особенности. Их режущие способности (РС) определяются большим разнообразием элементов характеристики ВПК, которые сложно выбрать для предсказания требуемой топографии поверхности. Это связано с тем, что конкретные значения характеристик из рекомендованных интервалов не ранжируются в соответствии с наибольшей приоритетностью. Названную проблему можно решить с помощью элементов искусственного интеллекта [5], таких как нечеткая логика (НЛ)

и искусственная нейронная сеть (ИНС). В работе [6] показано применение НЛ для поиска оптимальной зернистости нитридоборовых ВПК по основным параметрам микрорельефа с учетом мер положения и рассеяния.

ИНС является филиалом искусственного интеллекта, которая используется в качестве новой вычислительной техники в разных областях науки (в финансах, медицине, машиностроении и т. д.) для решения сложных задач, анализа данных, управления и кластеризации [7–9], в частности, моделирования параметров производственного процесса и шлифования. ИНС является мощным инструментом для моделирования, особенно когда отношение анализируемых данных неизвестно. В работе [10] рассмотрена реализация модели ИНС с учетом функциональности, частот изображений, точного обнаружения и идентификации различных компонентов с помощью программного обеспечения MATLAB в инженерной системе обработки. ИНС также использовалось для мониторинга шероховатости обработанной поверхности в процессе фрезерования [11], контроля износа инструментов на металлорежущих станках [12] и исследования шероховатости поверхности в процессе гидроабразивной обработки [13]. Автор статьи [14] создал сетевую модель для выбора зернистости шлифовальных кругов с элементами использования ИНС, но конкретные результаты исследования в ней отсутствуют.

В данной работе ИНС привлечены для оценки РС нитридоборовых ВПК, в которых при постоянной зернистости B126 [15, 16] варьировались остальные элементы характеристики для шести наименований инструментов.

Методика исследований

Органически разбивается на три последовательно выполняемых этапа: методику проведения натурного эксперимента, статистической интерпретации экспериментальных данных и моделирования в ИНС.

Методика натурного эксперимента. Это исследование проведено при следующих постоянных условиях: плоскошлифовальный станок – модель 3E711B; образцы из титанового сплава BT20 с размерами $B \times L \times H = 40 \times 40 \times 40$ мм, шлифуемые по плоскости $B \times L$ без выхаживания; форма и размеры инструментов – нитридоборо-

вые ВПК 1A1 200×20×76×5 мм [15, 16] высокой пористости; технологические параметры – скорость резания $v_k = 28$ м/с, продольная подача $s_{пр} = 6$ м/мин, поперечная подача $s_{п} = 4$ мм/дв.ход, глубина резания $t = 0,01$ мм, операционный припуск $z = 0,1$ мм; СОЖ-5 %-я эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148845–98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7...10 л/мин; число дублирующих опытов $n = 30$ ($v = \overline{1;30}$).

Вращение шпинделя на станке 3E711B осуществляется по часовой стрелке. Опускание ВПК на глубину ведем в момент, когда продольной стол с заготовкой смещается в крайнее левое положение относительно рабочего. Тогда при задании $s_{п}$ на двойной ход перемещение продольного стола слева направо по функциональному назначению относится к рабочему ходу, выполняемому в условиях встречного срезания металла. Обратное движение стола вместе с заготовкой в пределах заданной подачи $s_{п}$ становится выхаживающим, формирующим микрорельеф поверхности. Оставшаяся часть детали по ширине ВПК, равная в конце поперечного перемещения заготовки не более 16 мм, также формируется в режиме многократного выхаживания по схеме попутного шлифования.

Переменные условия шлифования представим в виде кода «*dijv*», удобного для анализа выходных параметров процесса с использованием статистических методов. В данном случае индекс $d = 1; 2$ отражает направление расположения шероховатости: 1 – параллельно вектору $S_{п}$, 2 – параллельно вектору $S_{пр}$. Характеристики кругов закодированы индексом $i = \overline{1;6}$: 1 – CBN30 B126 100 LV K27-КФ25; 2 – CBN30 B126 100 LV K27-КФ40; 3 – CBN30 B126 100 MV K27-КФ40; 4 – CBN30 B126 100 OV K27-КФ40; 5 – ЛКВ50 B126 100 MV K27-КФ40; 6 – ЛКВ50 B126 100 OV K27-КФ40. Для ВПК $i = \overline{1;4}$ зерна CBN с индексом прочности 30 изготовлены в Китае, а сами ВПК на АО НПК «Абразивы и шлифование» (г. Санкт-Петербург). ВПК $i = 5; 6$ (Аэробор) с зернами эльбора ЛКВ50 освоены по российским технологиям полностью на ООО «Петербургский Абразивный завод “Ильич”» (г. Санкт-Петербург). Необходимо отметить, что в ВПК $i = 1$ использован порообразователь КФ25 (0,25 мм – размер его основной фракции),

который мельче КФ40, используемого в остальных ВПК. Кроме сказанного, в ВПК варьируется твердость от L (среднемягкой) до O (среднетвердой) [15].

Параметры шероховатости измерены с помощью системы на базе профилографа – профилометра модели 252 завода «Калибр». Для оценки топографии поверхности привлечены параметры $(R_a, R_{max}, S_m)_{li}$ [17], которые превышают продольные аналоги, особенно по высотам микрорельефа, и оказывают доминирующее влияние на долговечность и надежность машин [1].

Методика статистической интерпретации экспериментальных данных. РС тридцатидесяти ВПК невозможно оценить детерминированной величиной, как для лезвийных инструментов. Сказанное обусловлено тем, что абразивные зерна имеют произвольную форму, хаотичное расположение в связке, разновысотность в радиальном направлении, различное количество активных зерен и режущих кромок на единицу площади контакта круга при врезании в заготовку. Учитывая сказанное, анализ наблюдений целесообразно вести с использованием статистических подходов, рассматривая их случайными величинами (СВ), и представлять в виде независимых множеств $i = \overline{1;k}$:

$$\{y_{iv}\}, v = \overline{1;30}. \quad (1)$$

В теоретической статистике рассматриваются две группы статистических методов: параметрическая и непараметрическая, в частности, ранговая, каждая из которых имеет «свое поле» [18, 19] для эффективного применения. Для использования первого метода необходимо обеспечить выполнение двух ограничений, накладываемых на СВ: однородность дисперсий отклонений и нормальность распределений. Эти требования при шлифовании часто нарушаются в той или иной мере, что может сопровождаться значимым смещением оценок, доверительных границ и коэффициентов доверия. Тогда оценки СВ, их доверительные границы нуждаются в уточнении. В такой ситуации целесообразно использовать непараметрический метод, который не связан с конкретным семейством распределений и не использует его свойств. Для оценки СВ используются следующие одномерные распределения частот:

- меры положения (опорные значения):

$$\text{средние } \bar{y}_i = y_{i\bullet}, \quad (2)$$

$$\text{медианы } \tilde{y}_i; \quad (3)$$

- меры рассеяния (прецизионность):

$$\text{стандарты отклонений } (SD)_i, \quad (4)$$

$$\text{размахи } R_i = |y_{\max} - y_{\min}|_i, \quad (5)$$

квартильные широты

$$\text{КШ}_i = |y_{0,75} - y_{0,25}|_i. \quad (6)$$

На одномерных распределениях частот (2), (4) и (5) базируется параметрический метод, а на (3), (6) – ранговые статистики. Чтобы упростить процесс анализа данных, в работе использована программа *Statistica 6.1.478.0*. После обработки экспериментальных данных для получения параметров (2)–(6) проведено тестирование (1) при $i = \overline{1;6}$ на однородность дисперсий (нуль-гипотез H_0 по трем группам критериев ($\omega = \overline{1;3}$): 1 – Хартли, Кохрена, Бартлетта (в программе представлены одной совокупностью), 2 – Левене, 3 – Брауна–Форсайта при условии $\alpha_{i\omega} < 0,05$, где $\alpha_{i\omega}$ – расчетный уровень значимости для статистик $\omega = \overline{1;3}$. В данном случае однородность дисперсий принимается, если количество решений f_0 в пользу H_0 удовлетворяет требованию: $f_0 \in [2; 3]$. По критерию Шапиро–Уилка для принятия H_0 о нормальности распределений (1) для каждого параметра и ВПК должны удовлетворять строгим неравенствам: $\alpha_i > 0,5$, где 0,5 – надежность принятия H_{0i} .

Методика реализации ИНС. Архитектура ИНС определяет ее структуру, включающую входные, выходные (нейроны) и множество скрытых слоев, в которых присутствуют скрытые нейроны (рис. 1) [13, 20]. ИНС может быть разных типов: многослойный персептрон (МП), радиальная базисная функция, самоорганизующаяся карта Кохонена и т. д. Для решения задачи в данной работе используем ИНС типа МП в пакете «*STATISTICA Neural Networks*», легко интерпретируемую как модель вход-выход. Такая сеть может моделировать функцию практически

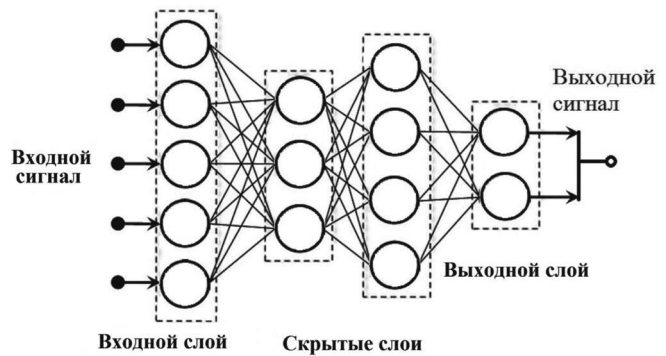


Рис. 1. Многослойная ИНС

любой степени сложности, причем число слоев и число элементов в каждом слое определяют сложность функции. Количество входных и выходных элементов устанавливается условиями задачи. На рис. 1 представлен МП, который состоит из множества слоев нейронных элементов. Входной слой нейронов выполняет распределительные функции, а выходной слой предназначен для обработки информации от предыдущих слоев и выдачи результата. Между входным и выходным слоями расположены так называемые скрытые (промежуточные) слои.

Под искусственным нейроном (ИН) понимают систему из двух элементов: сумматора и функции активации (рис. 2) [8, 21]. ИН получает входные сигналы (исходные данные либо выходные сигналы других нейронов ИНС) через несколько входных каналов. Каждый входной сигнал проходит через соединение, имеющее определенную интенсивность (или *вес*), которая показывает синаптическую активность биологического нейрона. Вычисляется взвешенная сумма входов и в результате получается вели-

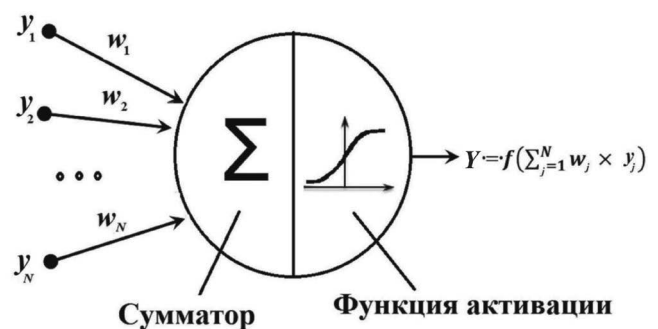


Рис. 2. Схематическое изображение искусственного нейрона:

$y_1, y_2, \dots, y_N$ – входные сигналы; $w_1, w_2, \dots, w_N$ – веса нейронов предыдущего слоя; Y – выходной сигнал; f – функция активации; N – число входов данного нейрона

чина активации нейрона, которая в дальнейшем преобразуется с помощью функции активации (или передаточной функции для получения выходного сигнала нейрона. Функция активации f предназначена для определения значения выходного нейрона по результату сумматора (взвешенной суммы входов) (см. рис. 2). В пакете «*STATISTICA Neural Networks*» применяются разные функции активации как по умолчанию, так и по выбору пользователем (табл. 1). Идеально подходящей для пользовательской настройки многослойных персептронов выбрана гиперболическая, которая часто дает лучшие результаты, чем логистическая благодаря своему свойству симметрии. Для задач классификации в выходном слое МП использована специально функция «Софтмакс» (10), которая интерпрети-

рует выходы как вероятности принадлежности к классу (см. табл. 1).

Для построения моделей ИНС необходимо задать правила оценки исследуемых параметров и использовать их в качестве исходных данных для обучения, контроля и тестирования нейронных сетей. Выбор обучающего набора исходных данных выполняется интуитивно и зависит от опыта исполнителя в рассматриваемой области науки. При моделировании ИНС в данной работе для их обучения использовано 70 % представленных правил, для их контроля – 15 %, для их тестирования – 15%. После создания ИНС необходимо провести процедуру их обучения [22]. Процесс обучения нейронной сети представлен на рис. 3. Эта процедура разделяется на следующие этапы.

Таблица 1

Функции активации, наиболее часто используемые в МП

Вид	Формула, $j = \overline{1; N}$	Область значений
Линейная	$Y = y_j$ (7)	$(-\infty, +\infty)$
Логистическая	$Y = \frac{1}{1 - e^{-y_j}}$ (8)	$(0, +1)$
Гиперболическая	$Y = \frac{e^{y_j} - e^{-y_j}}{e^{y_j} + e^{-y_j}}$ (9)	$(-1, +1)$
Софтмакс	$Y = \frac{e^{y_j}}{\sum_{j=1}^N e^{y_j}}$ (10)	$(0, +1)$

1. В нейронную сеть из набора внешней среды поступают стимулы.

2. В результате этих воздействий происходит изменение свободных параметров нейронной сети.

3. После изменения внутренней структуры нейронная сеть отвечает на последующие возбуждения иначе.

В данной работе воспользовались обучением с учителем, когда сети известно требуемое значение выходного сигнала при воздействии на нейронную сеть заданного входного сигнала. В процессе обучения МП используется алгоритм обратного распространения ошибки, который определяет два потока в нейронной сети: прямой поток от входного слоя к выходному и обратный

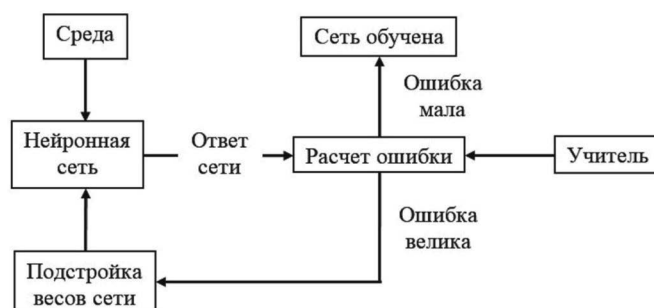


Рис. 3. Алгоритм обучения нейронной сети

поток – от выходного слоя к входному. На входе нейронной сети считается выходное значение, которое сравнивается с соответствующим ранее заданным целевым значением. Вычисляется сиг-

нал ошибки, определяемый разностью между желаемым сигналом и текущим откликом ИНС. После этого происходит корректировка синаптических весов в соответствии с выбранным алгоритмом, стремящимся минимизировать ошибку до тех пор, пока ошибка по всему обучающему множеству не достигнет приемлемо низкого уровня.

В результате моделирования нейронной сети получены разные ИНС различных типов. Наилучшей, используемой в дальнейшей, признана модель с максимальной производительностью и минимальной ошибкой на всех трех подмножествах (обучающем, контрольном и тестовом). Под производительностью сети понимают отношение стандартного отклонения ошибок сети к стандартному отклонению исходных данных [23].

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты статистической интерпретации (1). В табл. 2 представлены результаты тестирования (1) на однородность дисперсий при принятом уровне значимости $\alpha = 0,05$. Как видно из табл. 2, H_0 для высотных параметров приняты при условии $f_0 = 3$. Для поперечного среднего шага H_0 отвергнута по двум статистикам из трех.

Результаты тестирования (1) на нормальность распределений иллюстрирует табл. 3. Видно, что (1) аппроксимируются кривой Гаусса только в пяти (подчеркнуты снизу) из 18 слу-

чаев. Требования к (1) со стороны параметрической статистики выполнены не в полной мере. Сказанное заставило обратиться к непараметрическому методу, используемому ожидаемые медианы $\hat{m}y_i$ (меры положения) и квартильные широты $KШ_i$ (меры рассеяния), величины которых представлены в табл. 4. Они показывают, что ожидаемые медианы исследуемых параметров шероховатости для всех кругов $i = 1; 6$ варьируются в пределах: для высотных $\hat{R}_{ali} \in [0,496 (0,50); 0,725 (0,8)]$ мкм; $\hat{R}_{max li} \in [2,868 (3,2) - 4,165 (5,0)]$ мкм и шагового параметра $\hat{S}_{mli} \in [83,915 - 88,88 (100)]$ мкм. В скобках расположены категориальные величины (КВ) [24]. Таким образом, РС ВПК позволяют снизить ожидаемые медианы $\hat{m}\hat{R}_{ali}$ и $\hat{m}\hat{R}_{max li}$ на 3 КВ, средние шаги в пределах КВ = 100 мкм. При правильном их выборе можно снизить количество переходов при шлифовании. По $\hat{m}y_i$ и $KШ_i$ для высотных шероховатостей наилучшие РС показал ВПК $i = 5$, а по средним шагам – ВПК $i = 6$. Для окончательного решения РС ВПК используем ИНС.

Выбор ВПК с использованием ИНС. В ней для входных переменных используем три лингвистических выражения: низкая, средняя, высокая (табл. 5), а для выходных – пять лингвистических выражений: очень хорошая (ОХ), хорошая (Х), средняя (С), плохая (П), очень плохая (ОП). Общее количество правил, используемых для построения нейронных сетей, равно $3^6 = 729$ возможных сочетаний входных параметров и

Таблица 2

Проверка (1) на однородность дисперсий для всех исследуемых параметров

Параметр	Расчетный уровень значимости $\alpha_{\omega i}$ для множеств $i = \overline{1; 6}$ по критериям $\omega = \overline{1; 3}$			Принятие H_0
	1	2	3	
R_{a1}	0,000	0,008	0,023	+
R_{max1}	0,000	0,004	0,004	+
S_{m1}	0,022	0,449	0,572	–

Примечание: $\omega = \overline{1; 3}$: 1 – Хартли, Кохрена, Бартлетта; 2 – Левене; 3 – Брауна-Форсайта, знак «+» – H_0 принята, знак «–» – H_0 отклонена, круги i – см. методику проведения эксперимента

Таблица 3

Проверка (1) на нормальность распределений по критерию Шапиро-Уилка

Параметр	Расчетный уровень значимости $\alpha_i, i = \overline{1;6}$ по ВПК					
	1	2	3	4	5	6
R_{al}	0,3706	0,4849	0,2365	0,7797	0,6751	0,0308
R_{maxl}	0,914	0,7379	0,3041	0,2541	0,0080	0,0325
S_{ml}	0,2651	0,0000005	0,5586	0,2194	0,0123	0,4889

Примечание. Круги i – см. методику проведения эксперимента

Таблица 4

Ожидаемые параметры шероховатости и их квартильные широты

Круг $i = \overline{1;6}$	Параметр					
	R_{ali} , мкм		R_{maxli} , мкм		S_{mli} , мкм	
	$\hat{m}y_i$	КШ _{i}	$\hat{m}y_i$	КШ _{i}	$\hat{m}y_i$	КШ _{i}
1	0,725 (0,80)	0,180	4,165 (5,0)	1,17	88,88 (100)	34,28
2	0,496 (0,50)	0,110	3,098 (3,2)	0,64	85,854 (100)	19,04
3	0,496 (0,50)	0,120	3,029 (3,2)	0,79	85,854 (100)	21,38
4	0,496 (0,50)	0,140	3,242 (4,0)	1,04	83,915 (100)	26,94
5	0,496 (0,50)	0,090	2,868 (3,2)	0,39	85,854 (100)	19,34
6	0,496 (0,50)	0,140	2,956 (3,2)	0,54	83,915 (100)	16,79

Примечание. В скобках – КВ [24], круги i – см. методику проведения эксперимента

Таблица 5

Лингвистические и числовые входные переменные и их диапазоны

Входные параметры			Диапазон, мкм
Параметр		Лингвистические переменные	
R_{ali}	$\hat{y}_i$	Низкая (Н), средняя (С), высокая (В)	[0,496; 0,725]
	КШ _{i}	Низкая (Н), средняя (С), высокая (В)	[0,09; 0,18]
R_{maxli}	$\hat{y}_i$	Низкая (Н), средняя (С), высокая (В)	[2,868; 4,165]
	КШ _{i}	Низкая (Н), средняя (С), высокая (В)	[0,390; 1,170]
S_{mli}	$\hat{y}_i$	Низкая (Н), средняя (С), высокая (В)	[83,915; 88,880]
	КШ _{i}	Низкая (Н), средняя (С), высокая (В)	[16,790; 34,280]

лингвистических оценок качества шлифованных деталей (табл. 6).

На рис. 4 показана архитектура выбираемой модели типа МП с шестью входными и пятью выходными сигналами, в которой имеется два скрытых слоя. На каждом слое содержится десять скрытых элементов.

При непосредственном сопоставлении параметров шероховатости (R_a , R_{max} , S_m) и их квартильных широт для каждого ВПК $i = \overline{1;6}$ с выбранной моделью ИНС получены общие оценки и их уровни доверия (УД) (табл. 7).

Установлено, что самая высокая РС отдана ВПК ЛКВ50 В126 100 MV К27-КФ40 ($i = 5$), а самая низкая – ВПК СBN30 В126 100 LV К27-

КФ25 ($i = 1$). В группу с Х-оценкой входят три ВПК: $i = 3$ (УД = 0,99967), $i = 2$ (УД = 0,99958) и $i = 6$ (УД = 0,83163), расположенные в последовательности снижения уровня доверия, но по результатам моделирования в НС они признаны равнозначными по РС. ВПК СBN30 В126 100 LV К27-КФ25 ($i = 1$) и СBN30 В126 100 OV К27-КФ40 ($i = 4$), получившие соответственно ОП- и С-оценки не следует привлекать при шлифовании деталей ВТ20. Таким образом, при шлифовании сплава ВТ20 использование мелкого порообразующего КФ25 ($i = 1$) оказалось нецелесообразным. Сказанное в полной мере относится к ВПК ($i = 4$) с твердостью О (средней твердой).

Таблица 6

Структура лингвистических правил, используемых для моделирования

№ п/п	Структура правил						Общая оценка
	R_{ali}		$R_{\max li}$		S_{mli}		
	$\hat{y}_i$	КШ _{<i>i</i>}	$\hat{y}_i$	КШ _{<i>i</i>}	$\hat{y}_i$	КШ _{<i>i</i>}	
1	Н	Н	Н	Н	Н	Н	ОХ
2	Н	Н	Н	Н	Н	С	ОХ
3	Н	Н	Н	Н	Н	В	Х
...	...	...	...	...	...	...	...
727	В	В	В	В	В	Н	П
728	В	В	В	В	В	С	ОП
729	В	В	В	В	В	В	ОП

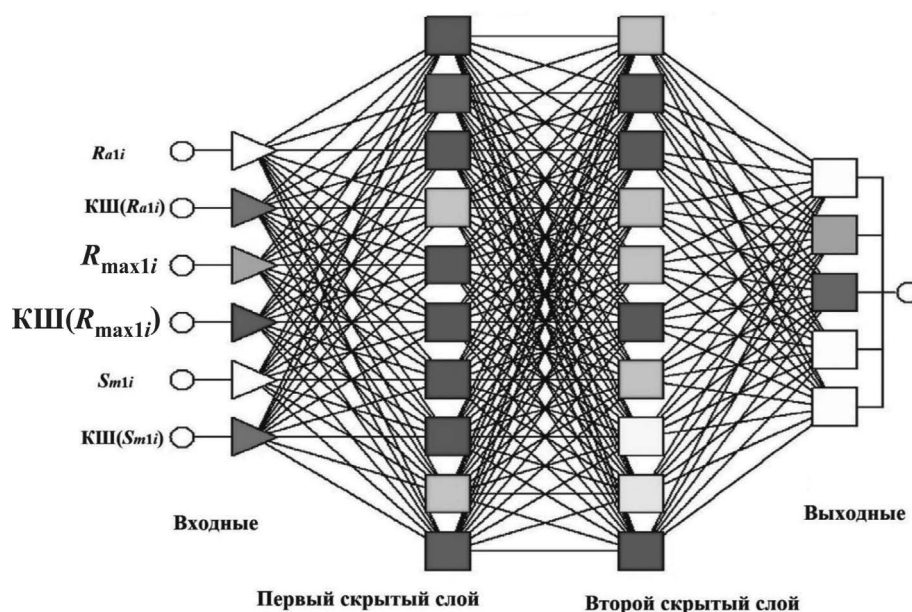


Рис. 4. Архитектура выбранной модели искусственной нейронной сети

Таблица 7

Общие и дифференциальные оценки РС нитридных ВПК по параметрам шероховатости

Круг $i = \overline{1;6}$	Общая лингвистическая оценка	Оценка ОХ	Оценка Х	Оценка С	Оценка П	Оценка ОП
1	ОП	0,00000	0,00002	0,00025	0,02784	0,97189
2	Х	0,00022	0,99958	0,00019	0,00001	0,00000
3	Х	0,00013	0,99967	0,00019	0,00001	0,00000
4	С	0,00063	0,30478	0,69266	0,00188	0,00005
5	ОХ	0,90622	0,09251	0,00121	0,00007	0,00000
6	Х	0,16607	0,83163	0,00219	0,00011	0,00000

Примечание. Круги i – см. методику

В пакете «*STATISTICA Neural Networks*» имеется возможность предсказания чувствительности сети к входными переменным, являющимся независимыми. Анализ чувствительности – это определение степени влияния отдельных входов НС на принятие решения. Чем чувствительнее сеть к данному входу, тем больше это отношение, которое может вызвать ухудшение качества поверхности детали. Как показано в табл. 8, чувствительность входных параметров к принятию решения характеризуется отношением, которое варьируется в узком интервале [294,9019; 298,1079]. Сказанное характеризует высокое влияние каждого из входных параметров на топографию поверхности. Дополнительно программа проставила ранги для каждого параметра от 1 до 6, возрастание которых характеризует снижение влияния входного параметра на топографию поверхности. Представленные результаты свидетельствуют, что на качество поверхности наибольшее влияние оказывают ожидаемые медианы $m\hat{R}_{ali}$, $m\hat{R}_{maxli}$. Затем идут меры рассеяния – КШ(R_{maxli}) и КШ(S_{mli}). Последние два места отданы КШ(R_{ali}) и $m\hat{S}_{mli}$.

Чувствительность сети к каждой входной величине является преимуществом ИНС перед НЛ, которой анализируются атрибуты, включающие совместно (3) и (6).

Выводы

Результаты тестирования (1) на однородность дисперсий и нормальность распределений выявили целесообразность использования непараметрического метода для статистической интерпретации экспериментальных данных.

1. Показано преимущество применения нейронных сетей для решения задачи комплексной оценки РС абразивных кругов по мерам положения и рассеяния.

2. По результатам моделирования (2), (5) в нейронной сети установлено, что ВПК ЛКВ50 В126 100 MV К27-КФ40 при шлифовании плоских деталей из ВТ20 обеспечивают наиболее высокое качество поверхности.

3. Выявлено, что ВТ20 лучше шлифуется ВПК при зернистости В126, высокой прочности зерен (50), пониженной твердости (L, M) и при наиболее крупном порообразователе (КФ40).

Таблица 8

Анализ чувствительности входных параметров к принятию решения

Критерии	Параметры					
	R_{al}	КШ(R_{al})	R_{maxl}	КШ(R_{maxl})	S_{ml}	КШ(S_{ml})
Отношение	298,1079	296,3523	297,8919	297,2753	294,9019	297,1554
Ранг	1,0000	5,0000	2,0000	3,0000	6,0000	4,0000



Список литературы

1. Носенко В.А., Носенко С.В. Технология шлифования металлов: монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 616 с. – ISBN 978-5-94178-373-1.
2. Саютин Г.И., Татаринцев И.П. Выбор материала круга при шлифовании титановых сплавов // Станки и инструмент. – 1985. – № 7. – С. 21–22.
3. Кремень З.И., Зубарев Ю.М., Лебедев А.И. Высокопористые круги из эльбора и их применение при шлифовании высокопластичных сплавов // Металлообработка. – 2009. – № 3 (51). – С. 2–5.
4. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшин И.С. Титановые сплавы: состав, структура, свойства: справочник. – М.: ВИС-МАТИ, 2009. – 520 с.
5. Нгуен Д.М. Комплексное исследование задачи классификации с применением нечетких моделей и распределенных вычислений: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. – Иркутск, 2014. – 142 с.
6. Солер Я.И., Нгуен М.Т. Поиск оптимальной зернистости нитридных кругов при плоском шлифовании деталей из стали 06Х14Н6Д2МВТ-Ш по микрорельефу поверхности в условиях моделирования нечеткой логики // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2015. – № 6. – С. 96–111. – doi: 10.18698/0236-3941-2015-6-96-111.
7. Koushal K., Gour S., Mitra T. Advanced applications of neural networks and artificial intelligence: a review // International Journal of Information Technology and Computer Science. – 2012. – N 6. – P. 57–68. – doi: 10.5815/ijitcs.2012.06.08.
8. Oludele A., Olawale J. Neural networks and its application in engineering // Proceedings of Informing Science & IT Education Conference (InSITE), Macon, GA, USA. – 2009. – P. 83–95.
9. Application of Artificial Neural Network (ANN) for the prediction of EL-AGAMY wastewater treatment plant performance-EGYPT / M.S. Nasr, M.A.E. Moustafa, H.E.S. Seif, G.E. Kobrosy // Alexandria Engineering Journal. – 2012. – Vol. 51, iss. 1. – P. 37–43. – doi: 10.1016/j.aej.2012.07.005.
10. Dadvandipour S. Experimental applications of artificial neural networks in engineering processing system // Analecta. – 2014. – Vol. 8, N 2. – P. 28–33.
11. G., Garcia-Romeu M.L., Ciurana J. Surface roughness monitoring application based on artificial neural networks for ball-end milling operations // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2011. – Vol. 22, iss. 4. – P. 607–617. – doi: 10.1007/s10845-009-0323-5.
12. Sick B. On-line and indirect tool wear monitoring in turning with artificial neural networks: a review of more than a decade of research // Mechanical Systems And Signal Processing. – 2002. – Vol. 16, iss. 4. – P. 487–546. – doi: 10.1006/mssp.2001.1460.
13. Caydas U., Hascalik A. A study on surface roughness in abrasive waterjet machining process using artificial neural networks and regression analysis method // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – Vol. 202, iss. 1–3. – P. 574–582. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.024.
14. Назарьева В.А. Сетевая модель выбора зернистости шлифовальных кругов с элементами использования систем искусственного интеллекта // СТИН. – 2016. – № 2. – С. 37–40.
15. ГОСТ 53923–2010. Круги алмазные и из кубического нитрида бора (эльбора) шлифовальные. Технические условия. – Введ. 2010–12–11. – М.: Стандартинформ, 2010. – 32 с.
16. ГОСТ 53922–2010. Порошки алмазные и из кубического нитрида бора (эльбора). Зернистость и зерновой состав шлифпорошков. Контроль зернового состава. – Введ. 2010–12–11. – М.: Стандартинформ, 2011. – 7 с.
17. ГОСТ 25142–82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. – Введ. 01.01.1983. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 22 с.
18. Hollander M., Wolfe D.A. Nonparametric statistical methods. – 2nd ed. – New York: Wiley-Interscience, 1999. – 816 p. – ISBN 0-4711-9045-4. – ISBN 978-0471190455.
19. Уилер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами: оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта: пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. – 409 с. – ISBN 978-5-9614-0832-4.
20. Васенков Д.В. Методы обучения искусственных нейронных сетей // Компьютерные инструменты в образовании. – 2007. – № 1. – С. 20–29.
21. Рудой Г.И. Выбор функции активации при прогнозировании нейронными сетями // Машинное обучение и анализ данных. – 2011. – Т. 1, № 1. – С. 16–39.
22. Чижков А.В. Обучение искусственных нейронных сетей [Электронный ресурс] // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2010. – № 1. – С. 3–7. – URL: <http://digital-mag.tti.sfedu.ru/lib/1/2-2010-1.pdf> (дата обращения: 20.05.2016).
23. Шарстнев В.Л., Вардомацкая Е.Ю. Анализ возможностей нейронных сетей для прогнозирования задач легкой промышленности [Электронный ресурс] // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2007. – № 09. – С. 3–7. – URL: <http://uecs.ru/uecs-09-92006/item/68-2011-03-21-07-11-44> (дата обращения: 20.05.2016).
24. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. – Взамен ГОСТ 2789–1959; введ. 1975–11–01. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 10 с.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (71), April – June 2016, Pages 28–40

An assessment of cutting abilities of boron nitride high porous wheels while pendulum grinding of elements made of titanium alloy VT20 using the artificial neural network

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

Mai D. S., Ph.D. student, e-mail: mdsmm07@gmail.com

Nguyen V.L., Ph.D. student, e-mail: nhadle007@gmail.com

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

Abstract

The high porous wheels (HPW) made of cubic boron nitride (CBN) are used to improve the grinding efficiency of titanium alloys. The high dimensional pores in these tools allow to reduce the blunting on the HPW working surfaces and to avoid appearance of the grinding burns and cracks on the ground surfaces. In this paper the cutting ability (CA) of six HPW from CBN was carried out while grinding parts from VT20 alloy. The studied HPW have the constant grain B126, but their other characteristics were varied: by the CBN marks - from CBN30 to LCV 50, by the wheel hardness - from L (medium soft) to O (medium hard) and by the pore-forming agent - from KF25 to KF40. The CA of the tools are measured by the high-rise indicator (R_a , R_{max}) and the stepping indicator of roughness (S_m) (GOST 25142-82). The analysis of the observations is leded using statistical approaches, because the grinding process has a stochastic character. The nonparametric statistical method is used on the basis of the experimental data results of testing on the homoscedasticity and the normality of distributions. In this case, the measure of position is the medians and the measures of dispersion are the quartile latitude (QL). For the complex assessment of the HPW's CA the simulation in the artificial neural network in «STATISTICA Neural Networks» package was carried out. By its results, it was established that the HPW LCV50 B126 100 MV K27-KF40 with a rating “very good” provides the highest surface quality in grinding flat parts of the VT20. Moreover it was found that the VT20 is ground better by the HPW made from the grain B126 with high grain strength 50, low hardness (L, M) and the most pore-forming (KF40). The «STATISTICA Neural Networks» package also has an option to predict the network sensitivity to input variables. In this case, the order of decreasing the influence on the quality assessment of the part surface are R_a , R_{max} , $QL(R_{max})$, $QL(S_m)$, $QL(R_a)$ and S_m .

Keywords

grinding, titanium alloy VT20, statistics, artificial neural network, sensitivity.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-28-40

References

1. Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiya shlifovaniya metallov* [The grinding technology of metals]. Staryi Oskol, TNT Publ., 2013. 616 p. ISBN 978-5-94178-373-1
2. Sayutin G.I., Tatarinov I.P. Vybora materiala kruga pri shlifovanii titanovykh splavov [The choice of material for grinding wheel titanium alloys]. *Stanki i instrument – Soviet Engineering Research*, 1985, no. 7, pp. 21–22. (In Russian)
3. Kremenj Z.I., Zubarev Yu.M., Lebedev A.I. Vysokoporistye krugi iz el'bora i ikh primeneniye pri shlifovanii vysokoplastichnykh splavov [High-porous CBN vitrified wheels and their application in grinding of high-ductile alloys]. *Metallrobrabotka – Metalworking*, 2009, no. 3 (51), pp. 2–5.
4. Il'in A.A., Kolachev B.A., Pol'kin I.S. *Titanovye splavy: sostav, struktura, svoystva: spravochnik* [Titanium alloys: composition, structure, properties. Reference book]. Moscow, VILS-MATI Publ., 2009. 520 p.
5. Nguyen D.M. *Kompleksnoe issledovanie zadachi klassifikatsii s primeneniem nechetkikh modelei i raspredelennykh vychislenii*. Diss. kand. tekhn. nauk [A comprehensive study of the classification problem using fuzzy models and distributed calculations. PhD eng. sci. diss.]. Irkutsk, 2014. 142 p.

6. Soler Ya.I., Nguyen M.T. Poisk optimal'noi zernistosti nitridborovykh krugov pri ploskom shlifovanii detalei iz stali 06Kh14N6D2MVT-Sh po mikrorel'efu poverkhnosti v usloviyakh modelirovaniya nechetkoi logiki [Search for optimal grain size of nitride-boron wheels during flat grinding of parts made of 06X14H6D2MBT-III steel on surface microrelief under conditions of fuzzy logic simulation]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya "Mashinostroenie"* – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series "Mechanical Engineering", 2015, no. 6, pp. 96–111. (In Russian). doi: 10.18698/0236-3941-2015-6-96-111
7. Koushal K., Gour S., Mitra T. Advanced applications of neural networks and artificial intelligence: a review. *International Journal Information Technology and Computer Science*, 2012, no. 6, pp. 57–68. doi: 10.5815/ijites.2012.06.08
8. Oludele A., Olawale J. Neural networks and its application in engineering. *Proceedings of Informing Science & IT Education Conference (InSITE)*, Macon, GA, USA, 2009, pp. 83–95.
9. Nasr M.S., Moustafa M.A.E., Seif H.E.S., Kobrosy G.E. Application of Artificial Neural Network (ANN) for the prediction of ELAGAMY wastewater treatment plant performance-EGYPT. *Alexandria Engineering Journal*, 2012, vol. 51, iss. 1, pp. 37–43. doi: 10.1016/j.aej.2012.07.005
10. Dadvandipour S. Experimental applications of artificial neural networks in engineering processing system. *Analecta*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 28–33.
11. Quintana G., Garcia-Romeu M.L., Ciurana J. Surface roughness monitoring application based on artificial neural networks for ball-end milling operations. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2011, vol. 22, iss. 4, pp. 607–617. doi: 10.1007/s10845-009-0323-5
12. Sick B. On-line and indirect tool wear monitoring in turning with artificial neural networks: a review of more than a decade of research. *Mechanical systems and signal processing*, 2002, vol. 16, iss. 4, pp. 487–546. doi: 10.1006/mssp.2001.1460
13. Caydas U., Hascalik A. A study on surface roughness in abrasive waterjet machining process using artificial neural networks and regression analysis method. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 202, iss. 1–3, pp. 574–582. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.024
14. Nazar'eva V.A. Setevaya model' vybora zernistosti shlifoval'nykh krugov s elementami ispol'zovaniya sistem iskusstvennogo intellekta [A network model of selection of grinding wheel grain with the elements of application of the artificial intelligence systems]. *STIN – Russian Engineering Research*, 2016, no. 2, pp. 37–40. (In Russian)
15. GOST 53923–2010. Krugi almaznye i iz kubicheskogo nitrída bora (el'bora) shlifoval'nye. Tekhnicheskie usloviya [State Standard 53923–2010. Diamond and cubic boron nitride (elbor) grinding wheels. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 32 p.
16. GOST 53922–2010. Poroshki almaznye i iz kubicheskogo nitrída bora (el'bora). Zernistost' i zernovoi sostav shlifporoshkov. Kontrol' zernovogo sostava [State Standard 53922–2010. Diamond and from cubic boron nitride (elbor) powders. Grain and grain size distribution of grinding powders. Test of grain size distribution]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 7 p.
17. GOST 25142–82. Sherokhovatost' poverkhnosti. Terminy i opredeleniya [State Standard 25142–82. Surface roughness. Terms and definitions]. Moscow, Standards Publ., 1982. 22 p.
18. Hollander M., Wolfe D.A. Nonparametric statistical methods. 2nd ed. New York, Wiley-Interscience, 1999. 816 p. ISBN-10: 0-4711-9045-4. ISBN-13: 978-0471190455
19. Wheeler D.J., Chambers D.S. *Understanding statistical process control*. Introduction by W. Edwards Deming. Knoxville, Tennessee, SPC Press, 1992 (Russ. ed.: Uiler D., Chambers D. *Statisticheskoe upravlenie protsessami: optimizatsiya biznesa s ispol'zovaniem kontrol'nykh kart Shukharta*. Translated from English. Moscow, Al'pina Biznes Buks Publ., 2009. 409 p. ISBN 978-5-9614-0832-4).
20. Vasenkov D.V. Metody obucheniya iskusstvennykh neironnykh setei [Methods for training of artificial neural networks]. *Komp'yuternye instrumenty v obrazovanii – Computer Tools in Education*, 2007, no. 1, pp. 20–29.
21. Rudoi G.I. Vybór funktsii aktivatsii pri prognozirovanii neironnymi setyami [Selection of the activation function in predicting neural networks]. *Mashinnoe obuchenie i analiz dannykh – Machine Learning and Data Analysis*, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 16–39.
22. Chizhkov A.V. Obuchenie iskusstvennykh neironnykh setei [Training of artificial neural networks]. *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie – Information, computer techniques and engineering education*, 2010, no. 1, pp. 3–7. Available at: <http://digital-mag.tti.sfedu.ru/lib/1/2-2010-1.pdf> (accessed 20.05.2016)
23. Sharstnev V.L., Vardomatskaya E.Yu. Analiz vozmozhnostei neironnykh setei dlya prognozirovaniya zadach legkoi promyshlennosti [Analysis of neural network capabilities for predicting light industry problems]. *Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektronnyi nauchnyi zhurnal – Management of economic systems. Scientific electronic*

journal, 2007, no. 9, pp. 3–7. Available at: <http://uecs.ru/uecs-09-92006/item/68-2011-03-21-07-11-44> (accessed 20.05.2016)

24. *GOST 2789–73. Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry, kharakteristiki i oboznacheniya* [State Standard 2789–73. Surface roughness. Parameters and characteristics]. Moscow, Standartinform Publ., 1973. 10 p.

Article history:

Received 2 April 2016

Revised 3 May 2016

Accepted 15 May 2016

МЕТОДИКА УРАВНОВЕШИВАНИЯ РОТОРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

*Ю.И. ПОДГОРНЫЙ^{1,2}, доктор техн. наук,
профессор*

Т.Г. МАРТЫНОВА¹, канд. техн. наук, доцент

В.Ю. СКИБА¹, канд. техн. наук, доцент

Д.В. ЛОБАНОВ³, доктор техн. наук, профессор

А.А. ЖИРОВА¹, магистрант

А.Н. БРЕДИХИНА¹, студентка

А.С. КОСИЛОВ¹, студент

Н.С. ПЕЧОРКИНА¹, студентка

(¹НГТУ, г. Новосибирск,

²НТИ (филиал) «МГУДТ», г. Новосибирск,

³БрГУ, г. Братск)

Поступила 4 марта 2016

Рецензирование 5 апреля 2016

Принята к печати 15 мая 2016

Мартынова Т.Г. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: tatyana martynova1511@gmail.com

Роторы технологических машин, в том числе и тихоходные, имеющие значительную протяженность, нуждаются в уравнивании. В связи с этим основная задача работы состоит в разработке методики определения значений корректирующих дисбалансов, уравнивающих роторы технологических машин. В работе представлена методика уравнивания ротора технологической машины на примере рабочих органов двухвального смесителя непрерывного действия. В системе трехмерного моделирования были получены значения инерционно-массовых характеристик элементов ротора, на основании которых построена расчетная модель ротора в виде пространственной системы дисбалансов. На базе разработанной модели получены планы дисбалансов, приведенных к двум плоским системам. Определены значения величин корректирующих дисбалансов. Предлагаемая методика позволила определить условия полной балансировки ротора; получить графические и аналитические зависимости максимальных и минимальных отклонений значений корректирующих дисбалансов от номинальных в процентном соотношении при различной точности изготовления элементов рабочего вала с величиной достоверности аппроксимации от 0,95 до 0,99. В результате проведенных исследований выявлено, что со снижением точности изготовления элементов рабочего вала величина ожидаемых отклонений корректирующих дисбалансов возрастает и может достичь 75 %. Кроме того, определены качества точности изготовления месильных лопаток для различных угловых скоростей вращения рабочего вала.

Ключевые слова: уравнивание ротора, расчетная модель, корректирующий дисбаланс, плоскость приведения, балансировка.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-41-50

Введение

При работе технологических машин часто возникают динамические нагрузки, обусловленные переменными параметрами движения кинематического характера, которые приводят к воз-

никновению дополнительных колебаний и, как следствие, к вибрациям и шуму. В случае, если вибрации возникают от внутренних свойств механизма, его можно считать виброактивным. Такие вибрации не наносят особого вреда, так как обусловлены требованиями технологического

процесса. Внешняя виброактивность обусловливается изменением положения элементов механизма или всей конструкции в процессе эксплуатации. Следовательно, все быстровращающиеся и длинные валы с расположенными на них элементами нуждаются в уравнивании [1–8].

В связи с тем что роторы могут представлять собой сложные изделия, состоящие из большого числа деталей, то от их распределения по окружности будет зависеть положение оси инерции. В конкретных конструкциях, особенно в тех, где детали изготовлены методом литья или методом объемной штамповки, добиться равномерного распределения масс не представляется возможным.

При наличии дисбаланса увеличиваются силы, действующие на опоры. Изменение знака действующих сил приводит к увеличению нагрузок на подшипники и, как следствие, на сам корпус, и далее на несущую конструкцию и фундамент.

В некоторых технологических машинах роторы (в том числе и рабочие валы) имеют значительную протяженность (до двух метров и более). Их балансировка осложняется наличием расположенных на них деталей или сборочных единиц. Особенно остро проблема балансировки стоит в том случае, когда детали выходят из строя по различным причинам, в том числе связанным с технологией изготовления продукта. Здесь имеется в виду воздействие больших нагрузок от внешних механических воздействий и агрессивной среды, в результате чего происходит интенсивное снижение эксплуатационных характеристик роторов.

Тогда ставится задача замены вышедших из строя деталей. А это значит, что необходимо выбрать метод их изготовления. К таким методам можно отнести получение деталей литьем или резанием. Первый случай является наиболее прогрессивным, но менее точным, второй – более точным, но дорогим. Можно применить комбинированный метод, когда заготовку получают литьем, а затем дорабатывают резанием. Но и в этом случае необходимо знать, какую точность требуется обеспечить при изготовлении деталей. Как известно, от выбранного метода будет зависеть и разность их масс. Если таких деталей несколько на одном рабочем валу, то распределенная масса будет влиять и на положение центра

масс всей сборки, и, как следствие, на положение оси инерции.

Положение оси инерции в такой конструкции зависит от количества, точности изготовления, инерционно-массовых характеристик деталей, входящих в сборку, а также от расположения их на валу. В таком случае балансировка будет заключаться в совмещении осей инерции и осей вращения общей сборки [8–16]. Определение моментов инерции и положения центра масс сборки в этом случае можно осуществлять с помощью построения объемных моделей с использованием пакета прикладных CAD-программ.

Низкая точность выполнения элементов ротора исполнительного механизма приводит к изменению инерционно-массовых параметров ротора и может оказать значительное влияние на его уравниваемость. Таким образом, необходима динамическая балансировка и разработка рекомендаций по точности изготовления элементов рабочего органа.

Так как демонтаж рабочего вала для балансировки при замене одной или нескольких месильных лопаток нецелесообразен, необходима методика, позволяющая определить отклонения величин корректирующих дисбалансов от их номинальных значений при различной точности изготовления элементов рабочего вала.

В связи с этим цель данной работы заключается в разработке методики определения значений корректирующих дисбалансов, уравнивающих роторы технологических машин на примере смесителя непрерывного действия.

В процессе работы были определены условия полной уравниваемости ротора при номинальных инерционно-массовых характеристиках его элементов, минимальные и максимальные значения дисбалансов неуравновешенных масс в зависимости от точности изготовления элементов ротора, ожидаемые отклонения значений корректирующих дисбалансов при различной точности изготовления месильных лопаток от номинальных значений, качества точности изготовления лопаток для различных угловых скоростей вращения рабочего вала.

Теория и методика

Предлагаемая оригинальная методика определения инерционно-массовых характеристик элементов, входящих в сборку, в зависимости

от качества точности их изготовления предусматривает построение 3D-моделей. Процесс балансировки проходит в два этапа: на первом этапе предполагается, что все детали изготовлены в номинальных значениях; на втором – с разной точностью.

Длина рабочего органа (ротора) двухвального смесителя составляет 2300 мм вдоль оси вращения, а диаметр – 70 мм ($l/D = 32,9$), в связи с чем возникает необходимость его уравновешивания [17, 18].

Ротор двухвального смесителя непрерывного действия представляет собой рабочий вал и расположенные на нем две скребковые и тридцать месильных лопаток, вращающихся как единое целое (рис. 1). С помощью системы трехмерного твердотельного моделирования Компас 3D были получены значения масс элементов ротора (месильных лопаток) $m_1 = m_2 = \dots = m_{30} = 762,501$ г и расстояния до центров масс $S_1, S_2, \dots, S_{30}e_1 = e_2 = \dots = e_{30} = 88,077$ мм.

Зная расстояния от плоскости приведения A до центров масс $a_1 = 70$ мм, $a_2 = 140$ мм, ...,

$a_{30} = 2100$ мм и углы между осью OY и радиусами-векторами $\varphi_1, \varphi_5 = \dots = \varphi_{29} = 0^\circ$, $\varphi_2, \varphi_6 = \dots = \varphi_{30} = 90^\circ$, $\varphi_3, \varphi_7 = \dots = \varphi_{27} = 180^\circ$, $\varphi_4, \varphi_8 = \dots = \varphi_{28} = 270^\circ$, были получены значения дисбалансов неуравновешенных масс по формуле

$$\bar{D}_i = \bar{e}_i \cdot m_i, \quad (1)$$

где $\bar{e}_i$ – радиус-вектор центров масс элементов месильного вала (ротора) $D_1 = D_2 = \dots = D_{30} = 67\,159$ мм·г.

В системе ротора происходит частичное взаимное уравновешивание дисбалансов, поэтому нет необходимости каждой неуравновешенной массе противопоставлять свою корректирующую массу.

Для уравновешивания ротора были назначены две плоскости приведения [19] A и B , перпендикулярные оси вращения z (рис. 1). В этих плоскостях находятся центры масс скребковых лопаток (S_{cA}, S_{cB}). Массы скребковых лопаток $m_{cA} = m_{cB} = 2727,984$ г, расстояние до центров масс $e_{cA} = e_{cB} = 29,666$ мм, тогда в соответствии с формулой (1) $D_{cA} = D_{cB} = 80928,373$ мм·г.

Расстояние между плоскостями $l = 2170$ мм.

Дисбалансы $\bar{D}_1, \bar{D}_2, \dots, \bar{D}_{30}$ всех неуравновешенных масс были приведены к плоскостям A и B , т. е. каждый вектор дисбаланса был заменен двумя, параллельными этому вектору и расположенными в плоскостях приведения A и B .

Векторы дисбалансов, приведенных к плоскостям A и B , определялись в соответствии с выражениями

$$\bar{D}_{iA} = \frac{\bar{D}_i \cdot b_i}{l}, \quad (2)$$

$$\bar{D}_{iB} = \frac{\bar{D}_i \cdot b_i}{l} \quad (3)$$

по схеме рабочего вала двухвального смесителя, которая показана на рис. 1, были получены результаты, приведенные в табл. 1.

В результате приведения пространственная система дисбалансов $\bar{D}_1, \bar{D}_2, \dots, \bar{D}_{30}$ (см. рис. 1) получилась замененной двумя плоскими системами (рис. 2).

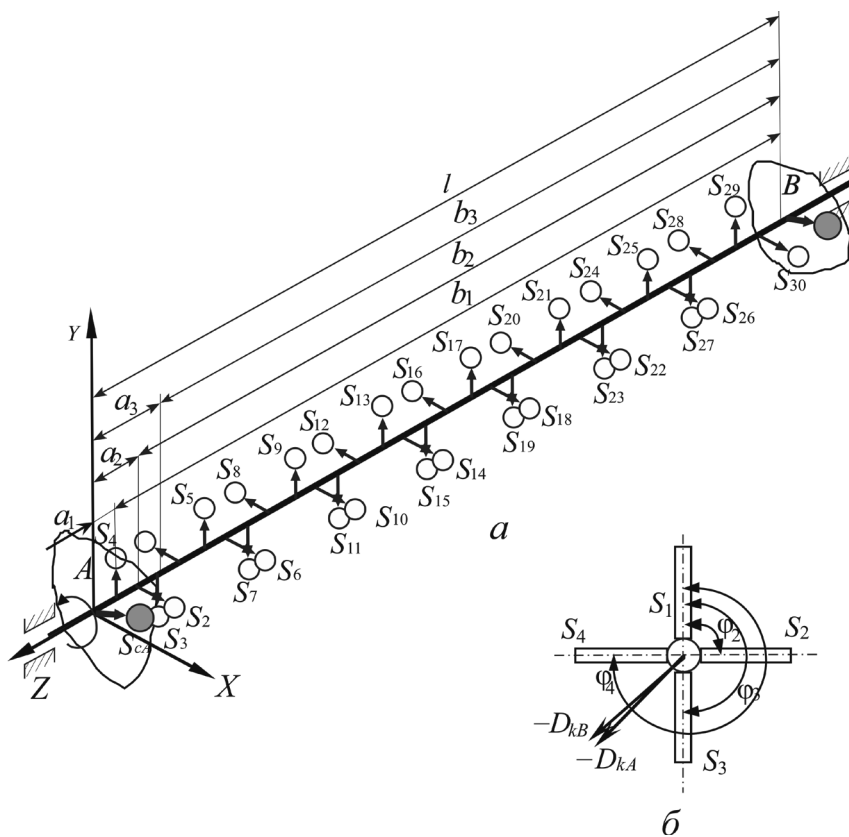


Рис. 1. Расчетная модель рабочего органа (ротора) двухвального смесителя непрерывного действия автоматической линии Braibanti: а – пространственная система дисбалансов; б – схема расположения векторов корректирующих дисбалансов

Таблица 1

Значения дисбалансов, приведенных
к плоскостям *A* и *B*

№ п/п	D_{iA} , г·мм	D_{iB} , г·мм
1	64 992	2166
2	62 826	4333
3	60 660	6499
4	58 493	8666
5	56 327	10 832
6	54 160	12 998
7	51 994	15 165
8	49 827	17 331
9	47 661	19 498
10	45 495	21 664
11	43 328	23 831
12	41 162	25 997
13	38 995	28 163
14	36 829	30 330
15	34 663	32 496
16	32 496	34 663
17	30 330	36 829
18	28 163	38 995
19	25 997	41 162
20	23 831	43 328
21	21 664	45 495
22	19 498	47 661
23	17 331	49 827
24	15 165	51 994
25	12 998	54 160
26	10 832	56 327
27	8666	58 493
28	6499	60 660
29	4333	62 826
30	2166	64 992

Сложив дисбалансы, расположенные в каждой из плоскостей, получили:

$$\bar{D}_A = \sum \bar{D}_{iA}, \quad (4)$$

$$\bar{D}_B = \sum \bar{D}_{iB}, \quad (5)$$

причем $D_A = D_B = 47516,9$ мм·г.

Таким образом, неуравновешенность заданного ротора можно представить двумя скрещивающимися векторами дисбалансов $\bar{D}_A$ и $\bar{D}_B$,

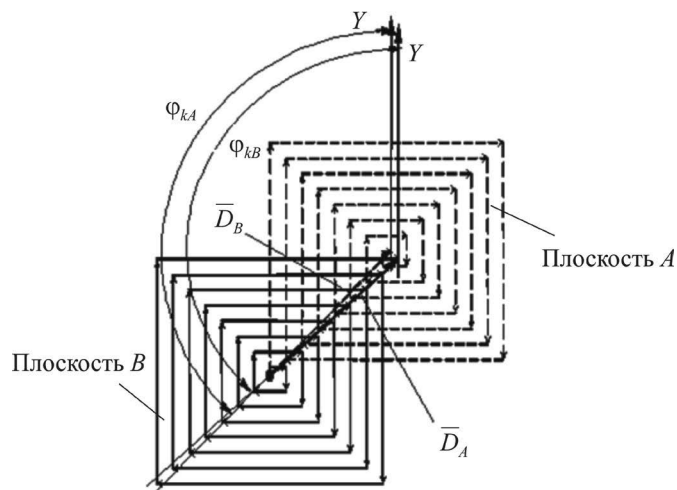


Рис. 2. План дисбалансов (при номинальных размерах элементов месильного вала)

расположенными в плоскостях приведения *A* (верхний многоугольник на рис. 2) и *B* (нижний многоугольник на рис. 2). Тогда они будут одновременно и плоскостями коррекции.

Условиями полной балансировки будут:

$$\bar{D}_{kA} = -\bar{D}_A, \quad (6)$$

$$\bar{D}_{kB} = -\bar{D}_B. \quad (7)$$

Эти векторы показаны на рис. 1, б, их угловые координаты $\varphi_{kA} = 137^\circ$ и $\varphi_{kB} = 134^\circ$ были взяты с планов дисбалансов (рис. 2).

С помощью трехмерного твердотельного моделирования были построены объемные модели рабочего вала смесителя непрерывного действия с месильными лопатками, выполненными с различной точностью в соответствии с квалитетами с IT6 по IT18, а затем получены значения дисбалансов с учетом точности изготовления месильных лопаток, которые приведены в табл. 2.

Методом математического моделирования уравнивания рабочего вала при различной точности изготовления его элементов были получены численные значения и угловые координаты корректирующих векторов D'_{kA} и D'_{kB} , причем с увеличением квалитета увеличивались их отклонения от D_{kA} и D_{kB} , полученных при номинальных размерах. При этом расположение лопаток было выбрано с помощью нормального ряда случайных чисел в пределах каждого квалитета. Из полученных результатов были выбраны наибольшие значения реакций в опорах по каждому квалитету [20]. В связи с тем что в работе приво-

Таблица 2

Значения дисбалансов неуравновешенных масс элементов рабочего вала в зависимости от точности их изготовления

Квалитеты	Значения дисбалансов D_p , г·мм
Номинальные размеры	67070,72
IT 6	67062,74
IT 7	67036,52
IT 8	67010,80
IT 9	66949,36
IT 10	66853,16
IT 11	66695,38
IT 12	66369,54
IT 13	66064,36
IT 14	65438,07
IT 15	64409,04
IT 16	63288,31
IT 17	59230,83
IT 18	50822,26

дятся результаты исследований по большому количеству квалитетов, на рис. 3 показана типовая схема, отражающая примерную картину отклонения корректирующих векторов при пониженной точности изготовления элементов рабочего вала от номинальных значений.

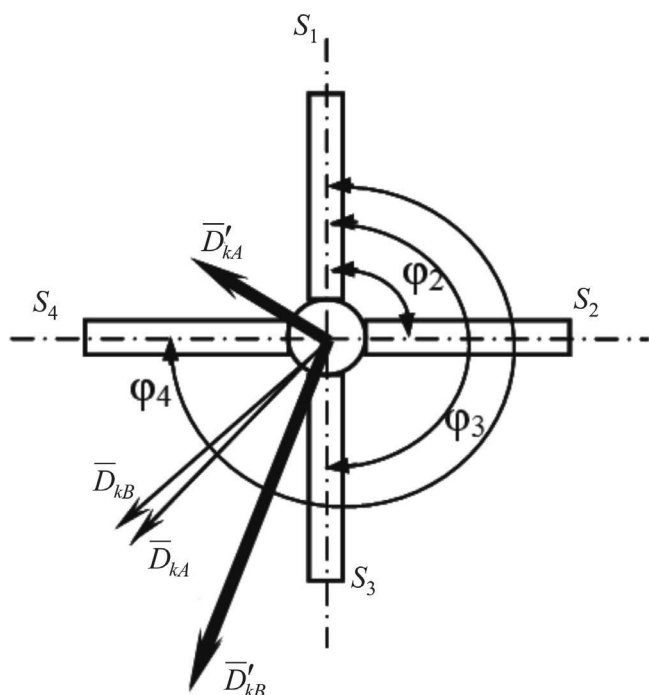


Рис. 3. Типовые корректирующие векторы дисбалансов при пониженной точности изготовления элементов месильного вала

Отклонения от номинальных значений корректирующих векторов до десятого квалитета были незначительными (0,05...0,50 %), в связи с чем в дальнейшем рассматривались только лопатки, выполненные с более низкой точностью, охватывающей диапазон значений квалитетов от IT 10 до IT 18. По результатам анализа данных были получены наибольшие и наименьшие отклонения значений корректирующих дисбалансов от номинальных в процентном соотношении.

Результаты и обсуждение

Результаты исследований были обработаны с помощью специализированного пакета обработки статистических данных TableCurve 2D и приведены на графике (рис. 4). По оси x обозначены номера квалитетов, по оси y – отклонения значений корректирующих дисбалансов от номинальных значений в процентном соотношении. На графиках видно, что со снижением точности изготовления лопаток рабочего вала величина ожидаемых отклонений корректирующих дисбалансов возрастает, причем график, отражающий максимальные отклонения от номинальных значений возрастает более резко, чем отражающий минимальные отклонения.

Кроме того, при обработке экспериментальных данных получены аналитические зависимости максимальных и минимальных отклонений значений дисбалансов от номинальных с величиной достоверности аппроксимации от 0,95 до 0,99. Следовательно, для определения уравновешенности валов с более низкой и более высокой точностью изготовления их элементов можно воспользоваться полученными аналитическими зависимостями, которые с высокой степенью точности позволят определять их значения.

В случае если элементы ротора имеют номинальные инерционно-массовые параметры, то ротор находится в абсолютно уравновешенном состоянии (6), (7), т. е. $e\omega = 0$. Поскольку элементы ротора выполнены с точностью, соответствующей определенному квалитету, то будет некоторая разбалансировка, которая должна соответствовать требованиям стандарта.

По ГОСТ 22061–76 [21] для роторов машин общего назначения балансировка проводится по четвертому классу точности, для которого выполняется следующее условие:

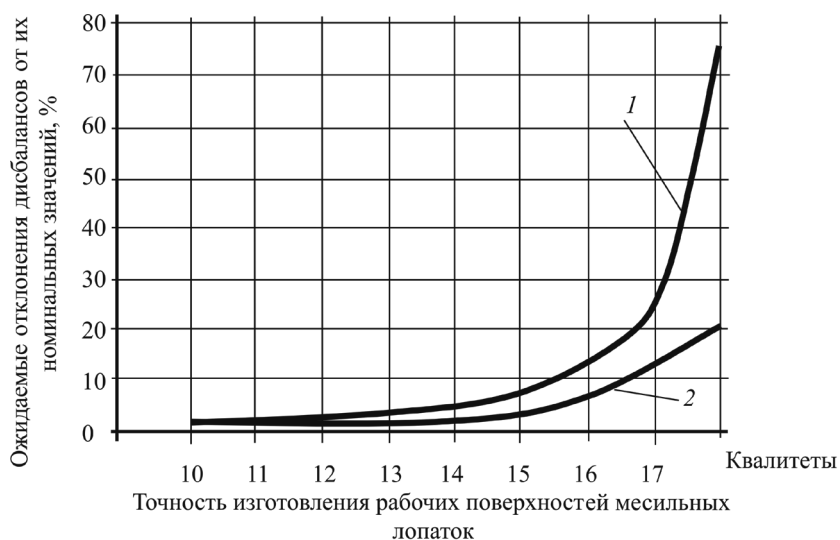


Рис. 4. Зависимость отклонений величин корректирующих дисбалансов от точности изготовления рабочих поверхностей месильных лопаток:

1 — максимальное отклонение от номинальных значений, %; 2 — минимальное отклонение от номинальных значений, %

$$e\omega \leq 6,3 \text{ мм/с}, \quad (8)$$

где e — удельный дисбаланс, мм; ω — максимальная угловая скорость ротора, с^{-1} .

Скребок лопатки испытывают меньшие нагрузки и реже выходят из строя, а наиболее частой замене подвергаются месильные лопатки. Следовательно, необходимо определить, какая точность их изготовления не приведет к разбалансировке рабочего вала, выходящей за пределы, рекомендуемые ГОСТом.

Поскольку к разбалансировке может привести только отклонение в большую сторону [21],

то отклонение в меньшую сторону далее рассматриваться не будет.

Удельный дисбаланс определялся исходя из выражения (8) в соответствии с угловой скоростью рабочего вала. Полученное значение удельного дисбаланса является допустимым отклонением от существующего расстояния до центра масс скребковой лопатки в большую сторону. Результаты расчетов изменения расстояния до центра масс скребковой лопатки приведены в табл. 2.

Ожидаемые максимальные значения скалярных величин векторов корректирующих дисбалансов (табл. 3) определялись по графической зависимости, приведенной на рис. 4, для каждого квалитета.

Скребок лопатка, установленная в двухвальном смесителе непрерывного действия, имеет массу 29944,964 г, а расстояние до центра масс — 16,135 мм (значения получены в программе КОМПАС 3D).

При известных параметрах скребковой лопатки и значениях максимально допустимых отклонений расстояний до центра масс определялись максимально допустимые значения корректирующих дисбалансов, а по табл. 3 и 4 определялся квалитет точности изготовления месильных лопаток, который позволит получить необходимое значение корректирующего дисбаланса.

Таблица 3

Значения корректирующих дисбалансов при различной точности изготовления ротора

Квалитеты	Ожидаемые отклонения от номинального дисбаланса, %	Численное значение корректирующего дисбаланса с учетом отклонения, г·мм	$e\omega$ [5] для четвертого класса точности балансировки
0	0	47 517	6,3
IT 10	0,9	47 945	6,3
IT 11	1,1	48 040	6,3
IT 12	1,4	48 182	6,3
IT 13	2,8	48 847	6,3
IT 14	4,7	49 750	6,3
IT 15	8,2	51 413	6,3
IT 16	12,1	53 267	6,3
IT 17	25,1	59 447	6,3
IT 18	75,0	83 157	6,3

Рекомендуемая точность изготовления элементов ротора в зависимости от его скоростных характеристик

Параметры	Скоростные характеристики ротора (частота вращения), мин ⁻¹				
	74,6	80	90	100	120
Угловая скорость ротора ω , с ⁻¹	7,808	8,373	9,420	10,467	12,560
Удельный дисбаланс e , мм	0,808	0,752	0,669	0,602	0,502
Максимально допустимое расстояние до центра масс корректирующих дисбалансов (скребковых лопаток), мм	16,943	16,887	16,804	16,737	16,637
Предельно допустимые значения корректирующих дисбалансов (соответствующие ГОСТ 22061-76), г·мм	До 49 897	До 49 732	До 49 487	До 49 290	До 48 996
Рекомендуемая точность выполнения лопаток (квалитет) в соответствии с табл. 3	IT 14	IT 13	IT 13	IT 13	IT 13

В случае выхода из строя и замены всего рабочего вала необходимо изготовить его элементы и занести их геометрические характеристики в паспорт деталей. В соответствии с этими данными и с помощью 3D-моделирования в программном продукте Компас определить инерционно-массовые характеристики проектируемой конструкции (масса и расстояние до центра масс). Затем в соответствии с предлагаемой выше методикой и фактическими значениями характеристик элементов вала выбираются две плоскости приведения и определяются величины и направления векторов корректирующих дисбалансов с помощью графического метода построения моментных многоугольников. В качестве корректирующих дисбалансов используются скребковые лопатки. Используя уравнение положения центров масс

$$R = \frac{\sum m_i r_i}{\sum m_i}, \quad (9)$$

где m_i – масса i -го элемента скребковой лопатки; r_i – радиус-вектор, задающий положение центра масс i -го элемента скребковой лопатки, получили значение инерционно-массовых характеристик для скребковой лопатки как конструкции, состоящей из двух элементов. В системе Компас 3D моделируется каждый из этих элементов в отдельности и вся лопатка в целом в зависимости от полученных расчетных данных для достижения необходимых значений корректирующих дисбалансов.

Выводы

1. Установлено, что для полной уравновешенности рабочего вала смесителя при номинальных значениях инерционно-массовых характеристик его элементов (масса и расстояние до центра масс) необходимо установить углы разворота скребковых лопаток относительно оси у на углы $\varphi_{kA} = 137^\circ$ и $\varphi_{kB} = 134^\circ$ соответственно, а геометрические и инерционно-массовые характеристики изменить таким образом, что $D_{cA} = D_{cB} = D_{kA} = D_{kB} = 47516,9$ мм·г.

2. Получены минимальные и максимальные значения дисбалансов неуравновешенных масс в соответствии с квалитетами. Так, при IT6 минимальное значение составляет 67062,74 г·мм, максимальное – 67122,40 г·мм, а при IT18 минимальное значение – 50822,26 г·мм, максимальное – 83362,88 г·мм.

3. Получены графики ожидаемых отклонений значений корректирующих дисбалансов от их номинальных значений в зависимости от точности изготовления элементов месильного вала. При низкой точности изготовления элементов рабочего вала (IT 18) ожидаемые отклонения корректирующих дисбалансов от номинальных значений могут достигать 75 %.

4. Определены квалитеты точности изготовления месильных лопаток для различных угловых скоростей вращения рабочего вала: при угловой скорости вращения $\omega = 7,808$ с⁻¹ – квалитет IT 14; от $\omega = 8,373$ с⁻¹ до $\omega = 12,560$ с⁻¹ – квалитет IT 13.

Список литературы

1. Balancing a high-speed rotor on a balancing machine / Yu.M. Grekov, I.I. Radchik, E.S. Trunin, O.V. Bol'shakov // *Power Technology and Engineering*. – 2015. – Vol. 49, iss. 1. – P. 57–60. – doi: 10.1007/s10749-015-0574-6.
2. Darlow M.S. Balancing of high-speed machinery. – New York: Springer-Verlag, 1989. – 185 p. – ISBN 978-1-4612-8194-8. – doi: 10.1007/978-1-4612-3656-6.
3. Определение основных параметров технологического оборудования / Ю.И. Подгорный, Т.Г. Мартынова, В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, Н.В. Вахрушев, Д.Ю. Корнев, Е.К. Зайцев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2013. – № 3 (60). – С. 68–73.
4. Dynamics of rotating machines / M.I. Friswell, J.E.T. Penny, S.D. Garvey, A.W. Lees. – Cambridge: Cambridge University Press, 2010. – 544 p. – ISBN 978-0-5218-5016-2.
5. Wang Q., Wang F. A new vibration mechanism of balancing machine for satellite-borne spinning rotors // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2014. – Vol. 27, iss. 5. – P. 1318–1326. – doi: 10.1016/j.cja.2014.08.001.
6. Balancing of machinery with a flexible variable-speed rotor / F. Sève, M.A. Andrianoely, A. Berlioz, R. Dufour, M. Charreyron // *Journal of Sound and Vibration*. – 2003. – Vol. 264, iss. 2. – P. 287–302. – doi: 10.1016/S0022-460X(02)01173-2.
7. Actual problems and decisions in machine building / ed. by V.Yu. Skeebea. – Pfaffikon: Trans Tech Publ., 2015. – 344 p. – (Applied Mechanics and Materials; vol. 788). – ISBN 978-3-03835-551-9. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.
8. Актуальные проблемы в машиностроении / под ред. В.Ю. Скибы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 588 с. – ISBN 978-5-7782-2410-0.
9. Proceedings of the 9th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics / ed. by P. Pennacchi. – Cham: Springer International Publ., 2015. – 2294 p. – (Mechanisms and Machine Science; vol. 21). – ISBN 978-3-319-06589-2. – doi: 10.1007/978-3-319-06590-8_2.
10. Ключников А.В. Способ контроля качества функционирования стенда для определения характеристик асимметрии масс осесимметричных роторов // *Труды международного симпозиума Надежность и качество*. – 2010. – Т. 2. – С. 12–14.
11. Румянцев В.В., Сидоров А.А., Шабанов А.Ю. Динамика двигателей. – СПб.: Изд-во СПбПУ, 2012. – 247 с. – ISBN 978-5-7422-3580-4.
12. Выбор конструктивных параметров несущих систем машин с учетом технологической нагрузки / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, О.В. Максимчук, Д.В. Лобанов, В.Р. Глейм, А.К. Жигулев, О.В. Саха // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2015. – № 4 (69). – С. 51–60. – doi: 10.17212/1994-6309-2015-4-51-60.
13. Моделирование несущих систем технологических машин / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2014. – № 2 (63). – С. 91–99.
14. Уравновешивание роторов технологических машин / Ю.И. Подгорный, Т.Г. Мартынова, А.Н. Бредихина, А.С. Косилов, Н.С. Печоркина // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2015. – № 2. – С. 256–262.
15. Li X., Zheng L., Liu Z. Balancing of flexible rotors without trial weights based on finite element modal analysis // *Journal of Vibration and Control*. – 2013. – Vol. 19, iss. 3. – P. 461–470. – doi: 10.1177/1077546311433916.
16. Khulief Y.A., Mohiuddin M.A., El-Gebeily M. A new method for field-balancing of high-speed flexible rotors without trial weights // *International Journal of Rotating Machinery*. – 2014. – Vol. 2014, art. 603241. – 11 p. – doi: 10.1155/2014/603241.
17. Гусаров А.А. Балансировка роторов машин. В 2 кн. Кн. 1 / Ин-т машиноведения им. А.А. Благоворова. – М.: Наука, 2004. – 267 с.
18. Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г., Войнова Е.В. Уравновешивание рабочего вала смесителя непрерывного действия // *Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 8-й Всероссийской научно-технической конференции*. – Новосибирск, 2010. – С. 127–129.
19. Kellenberger W. Should a flexible rotor be balanced in N or (N + 2) planes? // *Journal of Engineering for Industry*. – 1972. – Vol. 94, iss. 2. – P. 548–560.
20. Подгорный Ю.И. Влияние точности изготовления месильных лопаток на уравновешенность рабочего вала смесителя непрерывного действия / Ю.И. Подгорный, Т.Г. Мартынова // *Научный вестник НГТУ*. – 2010. – № 3 (40). – С. 119–126.
21. ГОСТ 22061–76. Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. – М.: Стандартиформ, 1993. – 22 с.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (71), April – June 2016, Pages 41–50

The methods of technological machines' rotors balance

Podgornyy Yu. I.^{1,2}, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: pjui@mail.ru**Martynova T.G.**¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: tatyana martynova1511@gmail.com**Skeeba V. Yu.**¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru**Lobanov D. V.**³, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mf_nauka@brstu.ru**Zhirova A.A.**¹, Master's Degree student, e-mail: zhirova.nastasya@mail.ru**Bredikhina A.N.**¹, Student, e-mail: nyura.bredikhina@yandex.ru**Kosilov A.S.**¹, Student, e-mail: kosilov_sanya@mail.ru**Pechorkina N.S.**¹, Student, e-mail: pechorkina94@yandex.ru¹Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation²Novosibirsk Technological Institute (branch) Moscow State University of Design and Technology, 35 Krasny prospect (5 Potaninskaya st.), Novosibirsk, 630099, Russian Federation³Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

Abstract

Purpose: The rotors of technological machines, including low-speed ones, which are fairly long, need to be balanced. In this regard, the main task of the study is to develop a method for determining the values of correction imbalances, adjusting the rotors of technological machines. **Methods:** A method of balancing the rotor of the technological machine in the case of the actuating device of the two-shaft continuous mixer is presented. Within the system of three-dimensional modeling the values of the mass/inertia data of the rotor elements are obtained upon which the simulation model is built in the form of a rotor imbalance three dimensional system. On the basis of the developed model the obtained imbalance plans are reduced to two flat systems. The values of the correction imbalances are determined. The proposed method allows to determine the conditions of complete rotor balancing; obtain graphical and analytical percent dependence of the maximum and minimum variations of correction imbalances at various manufacturing accuracy of the main shaft elements with approximation reliability of 0,95 to 0,99.

Results: According to these data and using computer modeling it is recommended to determine the inertial mass characteristics of the designed structure. Then, in accordance with the proposed methodology and the actual figures of the shaft elements it is necessary to choose two reference planes in order to determine the vector values and directions of two-plane imbalance by means of a graphic method for torque polygon construction. Blade scrapers are used as correction imbalances.

Conclusions: The studies have revealed that when reducing manufacturing accuracy of the main shaft elements the expected deviation of correction imbalances increases and may reach 75 %. The grade of manufacturing accuracy of kneading blades for various angular shaft speeds.

Keywords

rotor balance, simulation model, adjusting disbalance, datum plane, balance

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-41-50

References

1. Grekov Yu.M., Radchik I.I., Trunin E.S., Bol'shakov O.V. Balancing a high-speed rotor on a balancing machine. *Power Technology and Engineering*, 2015, vol. 49, iss. 1, pp. 57–60. doi: 10.1007/s10749-015-0574-6
2. Darlow M.S. *Balancing of high-speed machinery*. New York, Springer-Verlag, 1989. 185 p. ISBN 978-1-4612-8194-8. doi: 10.1007/978-1-4612-3656-6
3. Podgornyy Yu.I., Martynova T.G., Skeeba V.Yu., Pushnin V.N., Vakhrushev N.V., Kornev D.Yu., Zaitsev E.K. Opredelenie osnovnykh parametrov tekhnologicheskogo oborudovaniya [Determination of the main parameters of the processing equipment]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 3 (60), pp. 68–73.
4. Friswell M.I., Penny J.E.T., Garvey S.D., Lees A.W. *Dynamics of rotating machines*. Cambridge, Cambridge University Press, 2010. 544 p. ISBN 978-0-5218-5016-2

5. Wang Q., Wang F. A new vibration mechanism of balancing machine for satellite-borne spinning rotors. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, vol. 27, iss. 5, pp. 1318–1326. doi: 10.1016/j.cja.2014.08.001
6. Sève F., Andrianoely M.A., Berlioze A., Dufour R., Charreyron M. Balancing of machinery with a flexible variable-speed rotor. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, vol. 264, iss. 2, pp. 287–302. doi: 10.1016/S0022-460X(02)01173-2
7. Skeebe V.Yu., ed. *Actual problems and decisions in machine building. Applied mechanics and materials*. Vol. 788. Pfaffikon, Trans Tech Publ., 2015. 344 p. ISBN 978-3-03835-551-9. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788
8. Skeebe V.Yu., ed. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii* [Actual problems in machine building]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2014. 588 p. ISBN 978-5-7782-2410-0.
9. Pennacchi P., ed. *Proceedings of the 9th IFTOMM International Conference on Rotor Dynamics. Mechanisms and Machine Science*. Vol. 21. Cham, Springer International Publ., 2015. 2294 p. ISBN 978-3-319-06589-2. doi: 10.1007/978-3-319-06590-8_2
10. Klyuchnikov A.V. Sposob kontrolya kachestva funktsionirovaniya stenda dlya opredeleniya kharakteristik asimmetrii mass osesimmetrichnykh rotorov [Quality control method for the operation of the stand characterization mass axisymmetric rotor asymmetry]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo – Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*, 2010, vol. 2, pp. 12–14.
11. Rummyantsev V.V., Sidorov A.A., Shabanov A.Yu. *Dinamika dvigatelei* [Engine dynamics]. St. Petersburg, SPbSTU Publ., 2012. 247 p. ISBN 978-5-7422-3580-4
12. Podgornyy Yu.I., Skeebe V.Yu., Kirillov A.V., Maksimchuk O.V., Lobanov D.V., Gleim V.R., Zhigulev A.K., Sakha O.V. Vybor konstruktivnykh parametrov nesushchikh sistem mashin s uchetom tekhnologicheskoi nagruzki [Selection of form factors of machine carrying systems in reliance on the process duty]. *Obrabotka metall-ov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2015, no. 4 (69), pp. 51–60. doi: 10.17212/1994-6309-2015-4-51-60
13. Podgornyy Yu.I., Skeebe V.Yu., Kirillov A.V., Pushnin V.N., Erohin I.A., Kornev D.Yu. Modelirovanie nesushchikh sistem tekhnologicheskikh mashin [Modeling of the technological machines support systems]. *Obrabotka metall-ov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 2 (63), pp. 91–99.
14. Podgornyy Yu.I., Martynova T.G., Bredikhina A.N., Kosilov A.S., Pechorkina N.S. Uravnoveshivanie rotorov tekhnologicheskikh mashin [Balancing of technological machine rotors]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2015, no. 2, pp. 256–262.
15. Li X., Zheng L., Liu Z. Balancing of flexible rotors without trial weights based on finite element modal analysis. *Journal of Vibration and Control*, 2013, vol. 19, iss. 3, pp. 461–470. doi: 10.1177/1077546311433916
16. Khulief Y.A., Mohiuddin M.A., El-Gebeily M. A new method for field-balancing of high-speed flexible rotors without trial weights. *International Journal of Rotating Machinery*, 2014, vol. 2014, art. 603241. 11 p. doi: 10.1155/2014/603241
17. Gusarov A.A. *Balansirovka rotorov mashin*. V 2 kn. Kn. 1 [Balancing rotors of machines. In 2 bk. Bk. 1]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 267 p.
18. Podgornyy Yu.I., Martynova T.G., Voinova E.V. [Balancing of working shaft continuous mixer]. *Materialy 8-i vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Problemy povysheniya effektivnosti metalloobrabotki v promyshlennosti na sovremennom etape”* [Proceedings of the 8th All-Russian scientific and practical conference “Problems of increasing the efficiency in the metalworking industry at the present stage”]. Novosibirsk, 2010, pp. 127–129. (In Russian)
19. Kellenberger W. Should a flexible rotor be balanced in N or (N + 2) planes? *Journal of Engineering for Industry*, 1972, vol. 94, iss. 2, pp. 548–560.
20. Podgornyy Yu.I., Martynova T.G. Vliyanie tochnosti izgotovleniya mesil'nykh lopatok na uravnoveshennost' rabocheho vala smesitelya nepreryvnogo deistviya [Influence of accuracy of manufacturing kneading shovels on steadiness of a working shaft of the amalgamator of continuous action]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 3 (40), pp. 119–126.
21. GOST 22061–76. *Mashiny i tekhnologicheskoe oborudovanie. Sistema klassov tochnosti balansirovki* [State Standard 22061–76. Machines and technological equipment. Balance quality grade system. General]. Moscow, Standartinform Publ., 1993. 22 p.

Article history:

Received 4 March 2016

Revised 5 April 2016

Accepted 15 May 2016

ОСОБЕННОСТИ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СПЕКАНИИ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ЯЧЕИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ Fe-Cr-Al

*В.Г. ГИЛЕВ, канд. техн. наук
И.Н. БАРЫШНИКОВ, аспирант
(ПНИПУ, г. Пермь)*

Поступила 10 августа 2015
Рецензирование 29 апреля 2016
Принята к печати 15 мая 2016

Гилев В.Г. – 6140990, г. Пермь – ГСП, Комсомольский проспект, 29
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
e-mail: Xray@pm.pstu.ac.ru

Высокопористый проницаемый ячеистый материал (ВПЯМ) на хромалевой основе перспективен в качестве носителя катализаторов глубокого окисления метана. Использование в качестве основы материала жаростойких сплавов Fe-Cr-Al позволяет применять такие носители катализаторов при температурах до 900 °С на воздухе в среде газообразных продуктов сгорания. ВПЯМ-хромаль – основа для получения катализаторов беспламенного горения метана для экологически безопасных теплогенераторов. Высокопористый ячеистый материал на хромалевой основе получают методами порошковой металлургии путем репликации пространственной структуры полимерного ячеистого материала. Материал получали из шликера на основе смеси порошков карбонильного железа и лигатуры состава (вес.%) 20 % Fe – 60 % Cr – 20 % Al с добавкой 1,5 % дисперсного порошка Co. Технология включает помол лигатуры, смешивание шихты, приготовление и нанесение на полимерный каркас шликера, предварительный отжиг в водороде со ступенчатым нагревом до 700 °С для деструкции и удаления полимера и окончательное спекание в вакууме при 1270 °С.

Приведены результаты исследования фазового состава на различных стадиях получения ВПЯМ. После промежуточного отжига фиксируются три ОЦК-фазы, отличающиеся параметрами решетки. После окончательного спекания остается только одна ОЦК-фаза твердого раствора хрома и алюминия в железе и присутствует примесь карбида хрома Cr_7C_3 .

Ключевые слова: высокопористые ячеистые материалы, хромаль, Fe-Cr-Al, беспламенное горение метана.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-51-58

Введение

Высокопористый ячеистый материал (ВПЯМ) на основе хромали используется для создания энергетического каталитического реактора – парогенератора, работающего на газе, с блочным инфракрасным каталитическим тепловыделяющим элементом для производства тепла. Пластины из ВПЯМ-хромали при этом используются как теплоэнергетический элемент: каталитический реактор-парогенератор, позволяющий проводить беспламенное глубокое окисление топли-

ва при температурах в реакторе ниже 1000 °С, что практически полностью исключает образование оксидов азота NO_x , а также CO [1, 2]. ВПЯМ-хромаль является альтернативой керамических ячеистых материалов [3].

Другим перспективным применением ВПЯМ системы Fe-Cr-Al являются структурированные носители катализаторов для превращения природного газа и биотоплива в сингаз и водород [4] и глубокого окисления метана [5, 6]. Рабочие температуры ВПЯМ-хромали при этом лежат в среднем интервале температур (600...800 °С),

где они могут конкурировать с материалами аналогичной структуры на основе керамик [7].

Для высоких температур эксплуатации до 1000 °С и для совместимости с каталитическими покрытиями необходимы специальные составы сплава и предварительная обработка материала. Сплавы NiFeCrAl и FeCrAl являются перспективными кандидатами в отношении устойчивости к окислению из-за того, что в них содержится алюминий, что позволяет сформировать слой оксида алюминия, который и обеспечивает сопротивление долгосрочному окислению при температурах больше 950 °С [8, 9].

Материалы системы Fe-Cr-Al интенсивно исследуются в компактном состоянии в виде напыленных защитных покрытий, а также в виде пористых проницаемых материалов. Большое внимание уделяется изучению процесса окисления, поиску легирующих элементов, повышающих стойкость к окислению, исследованиям состава и структуры оксидных пленок [10–15]. Так, для высокопористого материала из волокон FeCrAl показано, что малое количество добавки Si ведет к значительному улучшению стойкости к окислению [16]. Для ВПЯМ Fe-Cr-Al, получаемых методом порошковой металлургии, стойкость к окислению возрастает с уменьшением пористости стенок перемычек [9]. Поэтому получение более плотной структуры в элементах каркаса ВПЯМ благоприятно не только для достижения более высоких механических свойств, но и для достижения лучшей стойкости к окислению. Наличие тех или иных фаз на той или иной стадии спекания может оказывать влияние на процесс уплотнения.

Технология получения ВПЯМ-хромаль разработана недавно [17, 18] и требует дальнейшего совершенствования. Закономерности и рекомендации по составу, найденные для компактных и пористых волокнистых материалов, требуют уточнения при получении ВПЯМ методами шликерной порошковой технологии. Это обусловлено специфическими требованиями: 1) достижением некоторого уровня прочности после предварительного отжига, необходимого для перемещения ВПЯМ из печи в печь; 2) достижением удовлетворительной плотности структуры перемычек после окончательного спекания; 3) достижением экономической эффективности за счет использования доступных порошков.

Цель настоящей работы – изучение закономерностей фазо- и структурообразования в процессе подготовки шихты и на стадиях термообработки.

Методика проведения исследований

Для получения образцов ВПЯМ-хромаль использовали порошки карбонильного железа Р-20, лигатуры Fe₂₀Cr₆₀Al₂₀ и добавка высокодисперсного порошка кобальта в соотношении для получения состава Fe – 18 % Cr – 6 % Al – 1,5 % Co. Порошок лигатуры подвергали помолу в атмосфере аргона в вибромельнице MB0,005 в течение 32 ч при навеске 1,5 кг и соотношении порошок/шары = 1/10. После смешивания в шихту вводили раствор ПВС для получения шликера. Полиуретановую ячеистую структуру готовили из вспененного полиуретана по стандартной методике [19]. Затем проводили пропитку полиуретановой ячеистой структуры шликером с последующим обжатием на валках для удаления избытка шликера. Термообработку проводили при температурах до 700 °С в водороде в течение 0,5 ч с промежуточными выдержками: при 350 °С – 3 ч и при 550 °С – 2 ч. Окончательное спекание проводили в вакууме с изотермической выдержкой при 1270 °С – 2 ч. Скорость охлаждения после окончательного спекания до 500 °С составляла величину 2,5 °/мин.

Съемку для рентгеноструктурного анализа осуществляли на дифрактометре XRD-6000 фирмы SHIMADZU с использованием Cu K α -излучения в режиме сканирования при скорости 2 град/мин. Обработка рентгенограмм включает в себя:

- качественный фазовый анализ – в программе Crystallographica Search-Match (CSM) с использованием файлов PDF, картотеки the International Centre for Diffraction Data (ICDD);

- количественный анализ, который включал определение процентного содержания в образце различных кристаллических фаз, определение параметров кристаллических решеток фаз, определение величины размеров блоков и напряжений по ширине рентгеновских линий – в программе PowderCell 2.4. с использованием аппроксимирующей функции Pseudo-Voigt 1.

Для рентгеносъемки образцы ВПЯМ после предварительного спекания при 700 °С перево-

дили в порошок при минимуме деформации, а образцы ВПЯМ после окончательного спекания при 1270 °С сминали под прессом.

Для исследования микроструктуры перемычек ВПЯМ пустоты в материале заполняли эпоксидным клеем с использованием вакуумной пропитки. Структуру на шлифах исследовали на оптическом микроскопе Axiovert 40 MAT фирмы Карс Цейс. Для выявления микроструктуры использовали 5 %-й водный раствор азотной кислоты.

Результаты исследований и обсуждение

Рентгенограмма от исходной шихты включала линии от двух ОЦК-фаз с отличающимися параметрами решетки, которые соответствуют исходным порошкам железа и лигатуры (рис. 1). Ширина линий соответствует исходной структуре порошков, отличающейся высоким уровнем напряжений и малому размеру областей когерентного рассеяния (ОКР) (табл. 1). Детальный анализ фазового состава лигатуры, однако, показал, что кроме твердого раствора на основе ОЦК-фазы в сплаве присутствует в небольших количествах фаза $AlCr_2$, может присутствовать фаза Fe_3Al , линии которой накладываются на линии основной фазы. Неоднородное многофазное состояние материала лигатуры, состоящего из близких по структуре фаз, вносит искажения в результаты определения параметров решетки, размеров ОКР и микронапряжений. Это можно продемонстрировать строчкой 2* в табл. 2. В отличие от строчки 2 анализ проводился в пред-

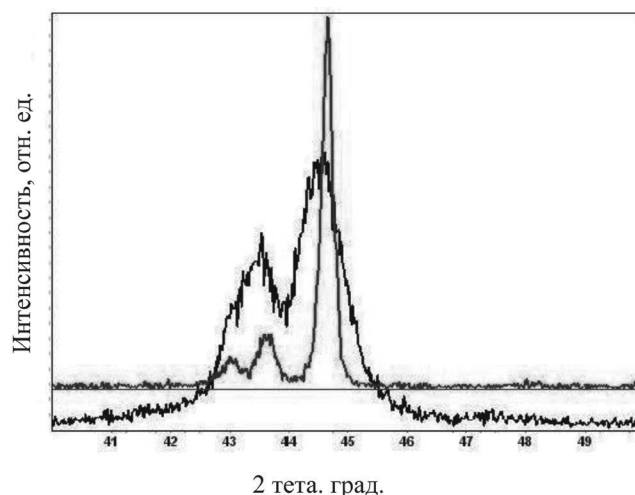


Рис. 1. Фрагменты дифрактограмм от исходной шихты и от материала ВПЯМ-хромаль после спекания при 700 °С

положении, что материал состоит из трех фаз: твердого раствора на основе фазы ОЦК, $FeAl$ и $AlCr_2$. Параметры решетки ОЦК в строчках 2 и 2* и размеры ОКР близки, а размер микронапряжений значительно уменьшился.

После стадии удаления полиуретановой подложки и предварительного спекания в водороде при температуре 700 °С вид рентгенограмм претерпевает значительные изменения. Прежде всего можно отметить уменьшение ширины линий фазы, соответствующей исходному порошку железа, что соответствует снятию напряжений и увеличению величины ОКР вследствие рекристаллизации. Вместо широкой линии, соответствующей исходному порошку лигатуры, расположены две линии двух ОКР-фаз.

Таким образом, после предварительного спекания фиксируется существование трех ОЦК-

Таблица 1

Состав и подготовка образцов

Номер образца	Состав образца, состояние	Стадия обработки
1	Исходный порошок карбонильного железа Р-20	Состояние поставки
2	Исходный порошок лигатуры FX6020A	Помол в мельнице, в течение 24 ч
3	Шихта исходная для получения ВПЯМ хромаль	Смешивание
4	ВПЯМ-хромаль, состояние после отжига в водороде при 700 °С, разрушение структуры ВПЯМ	Пиролиз полиуретановой подложки и отжиг ВПЯМ в водороде при 730 °С – 1 ч
5	ВПЯМ, спеченный в вакууме при 1270 °С	Спекание в вакууме при 1270 °С

Таблица 2

Структурное состояние образцов

Номер образца	Fe				Fe-Cr-Al -2				Fe-Cr-Al				FeAl	AlCr ₂
	Доля фазы, об. %	a, Å	ОКР, нм	Δa/a, %	Доля фазы, об. %	a, Å	ОКР, нм	Δa/a, %	Доля фазы, об. %	a, Å	ОКР, нм	Δa/a, %	Доля фазы, об. %	Доля фазы, об. %
1	100	2,865	19	0,56										
2									100	2,955	21	0,48		
2*									48,6	2,954	22	0,15	44,6	6,8
3	52	2,881	26	0,7					48	2,957	64	0,8		
4	66,3	2,867	91	0,044	19,4	2,928	14	0,25	14,3	2,957	25	0,15		
5		2,8919	43	0,067										

фаз, отличающихся параметрами решетки вследствие различий в химическом составе.

После окончательного спекания в вакууме при 1270 °С линия основной фазы сдвигается влево, исчезает линия от ОЦК-фазы промежуточного состава (рис. 2), что соответствует растворению легирующих из порошка лигатуры в железе и выравниванию концентрационных неоднородностей в структуре спеченного материала и образованию почти во всем объеме однородного твердого раствора.

Однако материал остается не полностью однородным, судя по наличию слабых линий карбида хрома (рис. 3).

Слабые линии, видимые на рентгенограмме образца, спеченного при 1270 °С (рис. 3), относятся к линиям карбида хрома Cr₇C₃, что следует из сопоставления данных экспериментальной рентгенограммы с данными картотеки

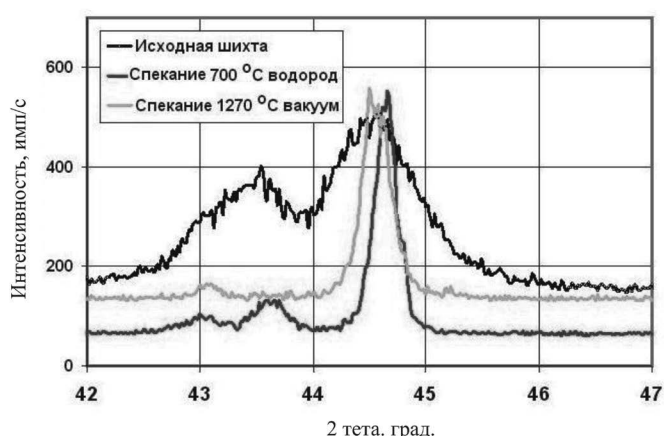


Рис. 2. Фрагменты дифрактограмм от исходной шихты и от материала ВПЯМ-хромаль в районе наиболее интенсивной первой линии ОЦК-фаз после предварительного и окончательного спекания

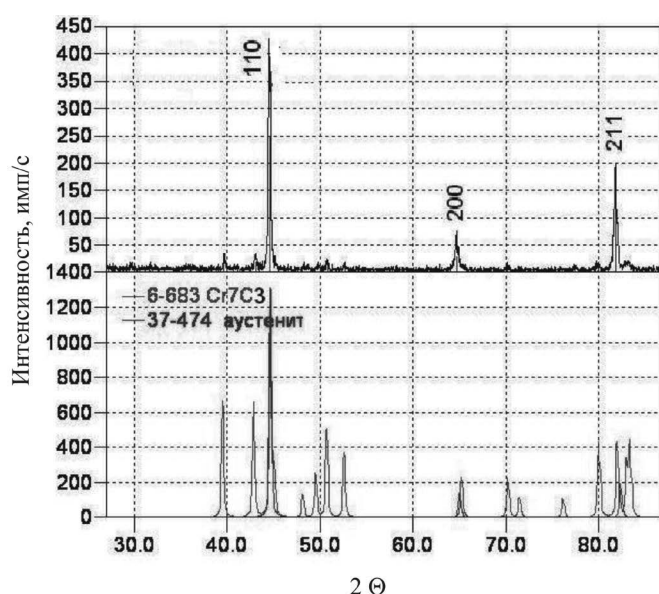


Рис. 3. Дифрактограмма от ВПЯМ-хромаль после окончательного спекания

PDF 6-683, табл. 3. В микроструктуре материала перемычек, остаются поры (рис. 4).

Очевидно, что единственным источником углерода, необходимого для образования карбида хрома, является углерод, имеющийся в исходной полиуретановой подложке. Во время нагрева шликерной заготовки происходит пиролиз полиуретана. Часть материала полиуретана удаляется в виде летучих углеводородов и водорода. Часть углерода в условиях эксперимента, по-видимому, остается в рентгеноаморфном виде после промежуточных выдержек при 350 и 550 °С и может служить помехой для уплотнения на стадии перепакровки частиц, препятствовать контакту между частицами разного химического состава, диффузии и выравниванию химического состава при более высоких температурах спекания в вакууме.

Расшифровка рентгенограммы от образца ВПЯМ-хромаль, после окончательного спекания при 1270 °С

Номер образца	ВПЯМ-хромаль 1270 °С			Fe ГЦК-фаза			Cr ₇ C ₃ PDF 6-683		
	2 Θ	d, Å°	I	d, Å°	I	hkl	d, Å°	I	hkl
1	39,64	2,27	7,042				2,2800	50	—
2	43,06	2,10	7,277				2,1100	50	—
3	44,5	2,04	100,000	2,0280	100	110	2,0300	100	—
4	50,72	1,80	5,164				1,8000	40	—
5	64,64	1,44	15,493	1,4340	12	200			—
6	79,78	1,20	2,347				1,1990	40	—
7	81,75	1,18	43,192	1,1708	18	211	1,1750	40	—
8	83,08	1,16	2,347				1,1630	30	—
9	98,07	1,02	11,502	1,0139	5	220			—

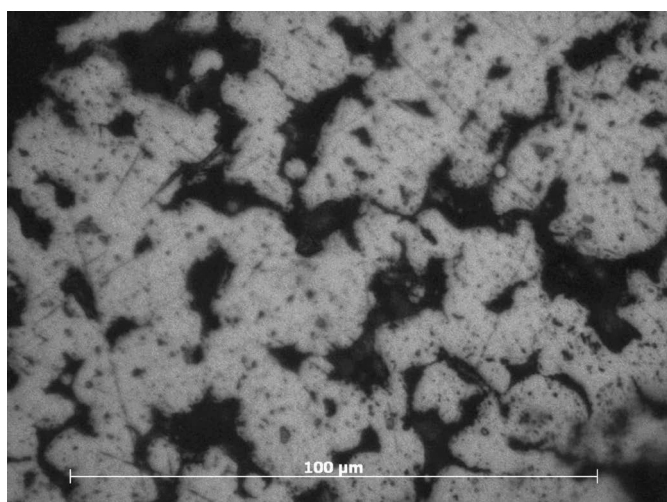


Рис. 4. Микроструктура ВПЯМ-хромаль после окончательного спекания

Механизмом удаления углерода на первой стадии спекания (в водороде) может быть взаимодействие твердого углерода с газообразным водородом с образованием метана в присутствии катализатора – железа [20, 21]. Можно предположить, что выдержка 0,5 ч при 700 °С в водороде недостаточна для полного удаления углерода из заготовки.

Выводы

Проведено рентгенографическое исследование исходных порошков, шихты и материала ВПЯМ-хромаль Fe-Cr-Al после промежуточного при 700 °С и окончательного при 1270 °С спекания. Исходные порошки и спеченный материал состоят в основном из фаз с ОЦК-решеткой на

основе железа и хрома. Обнаружено, что на промежуточной стадии образуется еще одна фаза с ОЦК-решеткой, по-видимому, промежуточного состава. На окончательно спеченном образце кроме ОЦК-фазы твердого раствора на основе железа фиксируются следы присутствия фазы, карбида хрома Cr₇C₃, что говорит о неполном удалении углерода на стадии пиролиза полиуретана и предварительного спекания в водороде.

Список литературы

1. Высокопористые проницаемые ячеистые материалы для экологически безопасных теплогенераторов / В.Н. Анциферов, В.Д. Храмцов, А.И. Поливода, Э.П. Волков, Г.А. Цой, А.П. Бевз // Перспективные материалы. – 2008. – № 6. – С. 5–10.
2. Тепловыделяющие каталитические блоки беспламенного горения на основе жаростойкого сплава / В.Н. Анциферов, Г.А. Цой, А.П. Бевз, А.И. Поливода // Технология металлов. – 2010. – № 8. – С. 25–32.
3. Tierney C., Harris A.T. Materials design and selection issues in ultra-lean porous burners // Journal of the Australian Ceramic Society. – 2009. – Vol. 45 (2). – P. 20–29.
4. Sadykov V.A. Structured nanocomposite catalysts of biofuels transformation into syngas and hydrogen: design and performance // Second International Conference Catalysis for renewable sources: fuel, energy, chemicals CRS-2: abstracts, Lund, Sweden, 22–28 July 2013. – Novosibirsk, 2013. – P. 12–13.
5. Catalytic partial oxidation of methane over nano-sized Rh supported on Fecralloy foams / E. Verlato, S. Barison, S. Cimino, F. Dergal, L. Lisi, G. Mancino, M. Musiani, L. Vazquez-Gomez // International Jour-

nal of Hydrogen Energy. – 2014. – Vol. 39, iss. 22. – P. 11473–11485. – doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.076.

6. Солнышков И.В., Порозова С.Е. Каталитическая активность высокопористого материала на основе сплава хромаль в реакции глубокого окисления метана // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 105.

7. Высокопористые ячеистые керамические материалы / В.Н. Анциферов, В.И. Овчинникова, С.Е. Порозова, И.В. Федорова // Стекло и керамика. – 1986. – № 9. – С. 19.

8. A new PM Process for manufacturing of alloyed foams for high temperature applications / G. Walther, B. Klöden, B. Kieback, R. Poss, Y. Bienvenu, J.-D. Bartout // World PM2010 Proceedings. – Shrewsbury, UK, 2010. – Vol. 4. – P. 109–116.

9. Open cell metal foams – application-oriented structure and material selection / P. Quadbeck, K. Kümmel, R. Hauser, G. Standke, J. Adler, G. Stephani // CELLMAT 2010. Proceedings of the International Conference on Cellular Materials, Dresden, Germany, 27–29 October 2010. – Dresden, 2010. – P. 279–288.

10. Effect of trace amounts of carbon and nitrogen on the high temperature oxidation resistance of high purity FeCrAl alloys / D. Naumenko, J. Le-Coze, E. Wessel, W. Fischer, W.J. Quadackers // Materials Transactions. – 2002. – Vol. 43, N 2. – P. 168–172.

11. Engkvist J. Characterization of oxide scales formed on FeCrAl alloys at high temperatures: doctoral thesis. – Göteborg: Chalmers University of Technology, 2009. – 53 p. – ISBN 978-91-7385-310-1.

12. High temperature oxidation of FeCrAl-alloys – influence of Al-concentration on oxide layer characteristics / J. Engkvist, U. Bexell, M. Grehk, M. Olsson // Materials and Corrosion. – 2009. – Vol. 60, iss 11. – P. 876–881. – doi: 10.1002/maco.200805186.

13. Oxidation of FeCrAl alloys at 500–900 °C in dry O₂ / H. Josefsson, F. Liu, J.-E. Svensson, M. Halvarsson, L.-G. Johansson // Materials and Corrosion. – 2005. – Vol. 56, iss. 1. – P. 801–805. – doi: 10.1002/maco.200503882.

14. Fireside corrosion degradation of HVOF thermal sprayed FeCrAl coating at 700–800 °C / T. Hussain, N.J. Simms, J.R. Nicholls, J.E. Oakey // Surface & Coatings Technology. – 2015. – Vol. 268. – P. 165–172. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2015.01.074.

15. Characterization of alumina scale formed on Fe-CrAl steel / K. Reszka, J. Morgiel, Z. Żurek, A. Jaroń // Archives of Metallurgy and Materials. – 2014. – Vol. 59, N 1. – P. 73–81. – doi: 10.2478/amm-2014-0013.

16. Advanced porous structures made from intermetallic and superalloy fibers / O. Andersen, C. Kostmann, G. Stephani, G. Korb // Proceedings of the 1st International Conference on Materials Processing for Properties and Performance “MP3 2002”, Singapore, 1–3 August 2002. – Singapore, 2002. – P. 214–221.

17. Анциферов В.Н., Баширцев Г.В. Исследование процессов формирования жаростойкого ВПЯМ сплава хромаль, как носителя нанодисперсного катализатора в кластерной теплоэнергетике // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2010. – Т. 12, № 1. – С. 7–16.

18. Баширцев Г.В., Храмцов В.Д. Активация процессов гомогенизации и спекания высокопористых проницаемых ячеистых материалов на основе жаростойких сплавов введением нанопорошков // Третья Всероссийская конференция по наноматериалам НАНО 2009, Екатеринбург, 20–24 апреля 2009 г.: тезисы докладов. – Екатеринбург, 2009. – С. 813–814.

19. Анциферов В.Н., Храмцов В.Д. Способы получения и свойства высокопористых проницаемых ячеистых металлов и сплавов // Перспективные материалы. – 2000. – № 5. – С. 56–60.

20. Взаимодействие алмаза с ультрадисперсным порошком железа, полученным различными способами / А.И. Чепуров, В.М. Сонин, А.А. Чепуров, Е.И. Жимулев, Б.П. Толочко, В.С. Елисеев // Неорганические материалы. – 2011. – Т. 47, № 8. – С. 957–961.

21. Анциферов В.Н., Гилев В.Г., Костилов В.И. Взаимодействие фуллерена C₆₀ с порошковым железом // Перспективные материалы. – 1998. – № 3. – С. 5–10.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (71), April – June 2016, Pages 51–58

Special features of the phase formation during sintering of high porous cellular materials of the Fe-Cr-Al system

Gilev V.G., Ph.D. (Engineering), Senior researcher, e-mail: Xray@pm.pstu.ac.ru

Baryshnikov I.N., Scientific associate, Post-graduate Student, e-mail: ivanbin@mail.ru

Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation

Abstract

The highly permeable cellular material (HPCM) based on chromal is promising as a carrier of deep methane oxidation catalysts. Using HPCM as a base material of heat-resistant Fe-Cr-Al alloys allows to apply such catalysts at temperatures up to 900 °C in the air and in the combustion gas atmosphere. HPCM-chromal is the basis for flameless combustion of methane catalysts for environmental friendly heat generators. HPCM based on Fe-Cr-Al is used as the heat and power unit the catalytic reactor-steam generator, allowing performing deep flameless oxidation of the fuel in the reactor at temperatures below 1000 °C, which virtually eliminates the formation of oxides of nitrogen NO_x and CO. HPCM based on Fe-Cr-Al is obtained by powder metallurgy by replicating the spatial structure of polymeric cellular material.

The materials are prepared from the slurry based on the mixture of carbonyl iron powder and master alloy (wt.%) 20 % Fe-60 % Cr-20 % Al with the addition of 1.5% Co fine powder. Technique involves ligature milling, powders mixing, preparation and application to polymer backbone slurry, preliminary annealing in hydrogen, with a step by heating to 700°C for decomposition and removal of the polymer and the final sintering in vacuum at 1270 °C.

The results of X-ray study highly porous cellular material of Fe-Cr-Al are showed. The data on the phase composition, the lattice parameters and the fine structure of the starting powder and the charge is showed. Material is investigated after intermediate annealing at 700 °C and after sintering at 1270 °C. After intermediate annealing at 700° material consists of 3 bcc phases with differing parameters. After the final sintering material consists of a bcc phase and impurities of chromium carbide Cr₇C₃.

Keywords

highly porous cellular materials, Fe-Cr-Al, flameless combustion of methane

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-51-58

References

1. Antsiferov V.N., Khramtsov V.D., Polivoda A.I., Volkov E.P., Tsoi G.A., Bevz A.P. Vysokoporistye pronitsaemye yacheistye materialy dlya ekologicheskikh bezopasnykh teplogeneratorov [The highly porous breathable cellular material for environmentally friendly heat generators]. *Perspektivnye materialy – Journal of Advanced Materials*, 2008, no. 6, pp. 5–10. (In Russian)
2. Antsiferov V.N., Tsoi G.A., Bevz A.P., Polivoda A.I. Teplovyye yacheistye kataliticheskiye bloki besplamennogo goreniya na osnove zharostoikogo splava [The fuel catalyst units for flameless combustion based on heat-resistant alloy]. *Tekhnologiya metallov – Metal Technology*, 2010, no. 8, pp. 25–32.
3. Tierney C., Harris A.T. Materials design and selection issues in ultra-lean porous burners. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2009, vol. 45 (2), pp. 20–29.
4. Sadykov V.A. Structured nanocomposite catalysts of biofuels transformation into syngas and hydrogen: design and performance. *Second International Conference “Catalysis for renewable sources: fuel, energy, chemicals” CRS-2: abstracts*, Lund, Sweden, 22–28 July 2013, pp. 12–13.
5. Verlato E., Barison S., Cimino S., Dergal F., Lisi L., Mancino G., Musiani M., Vazquez-Gomez L. Catalytic partial oxidation of methane over nanosized Rh supported on FeCrAl alloy foams. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, iss. 22, pp. 11473–11485. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.076
6. Solnyshkov I.V., Porozova S.E. Kataliticheskaya aktivnost' vysokoporistogo materiala na osnove splava khromal' v reaktsii glubokogo okisleniya metana [Catalytic activity highly porous material based on an Fe-Cr-Al alloy in deep oxidation of methane]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2014, no. 6, p. 105.
7. Antsiferov V.N., Ovchinnikova V.I., Porozova S.E., Fedorova I.V. Vysokoporistye yacheistye keramicheskiye materialy [Highly porous cellular ceramic materials]. *Steklo i keramika – Glass and Ceramics*, 1986, no. 9, p. 19. (In Russian)
8. Walther G., Klöden B., Kieback B., Poss R., Bienvenu Y., Bartout J.-D. A new PM process for manufacturing of alloyed foams for high temperature applications. *World PM2010 Proceedings*, 2010, vol. 4, pp. 109–116.
9. Quadbeck P., Kümmel K., Hauser R., Standke G., Adler J., Stephani G. Open cell metal foams – application-oriented structure and material selection. *Proceedings of the International Conference on Cellular Materials “CELL-MAT 2010”*, Dresden, Germany, 27–29 October 2010, pp. 279–288.
10. Naumenko D., Le-Coze J., Wessel E., Fischer W., Quadackers W.J. Effect of trace amounts of carbon and nitrogen on the high temperature oxidation resistance of high purity FeCrAl alloys. *Materials Transactions*, 2002, vol. 43, no. 2, pp. 168–172.

11. Engkvist J. *Characterization of oxide scales formed on FeCrAl alloys at high temperatures*. Doctoral thesis. Göteborg, Chalmers University of Technology, 2009. 53 p. ISBN 978-91-7385-310-1
12. Engkvist J., Bexell U., Grehk M., Olsson M. High temperature oxidation of FeCrAl-alloys – influence of Al-concentration on oxide layer characteristics. *Materials and Corrosion*, 2009, vol. 60, iss. 11, pp. 876–881. doi: 10.1002/maco.200805186
13. Josefsson H., Liu F., Svensson J.-E., Halvarsson M., Johansson L.-G. Oxidation of FeCrAl alloys at 500–900 °C in dry O₂. *Materials and Corrosion*, 2005, vol. 56, iss. 1, pp. 801–805. doi: 10.1002/maco.200503882
14. Hussain T., Simms N.J., Nicholls J.R., Oakey J.E. Fireside corrosion degradation of HVOF thermal sprayed FeCrAl coating at 700–800 °C. *Surface & Coatings Technology*, 2015, vol. 268, pp. 165–172. doi: 10.1016/j.surfcoat.2015.01.074
15. Reszka K., Morgiel J., Żurek Z., Jaroń A. Characterization of alumina scale formed on FeCrAl steel. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2014, vol. 59, no. 1, pp. 73–81. doi: 10.2478/amm-2014-0013
16. Andersen O., Kostmann C., Stephani G., Korb G. Advanced porous structures made from intermetallic and superalloy fibers. *Proceedings of the 1st International Conference on Materials Processing for Properties and Performance “MP3 2002”*, Singapore, 2002, pp. 214–221
17. Antsiferov V.N., Bashkirtsev G.V. *Issledovanie protsessov formirovaniya zharostoikogo VPYaM splava khromal', kak nositelya nanodispersnogo katalizatora v klasternoi teploenergetike* [The study of the formation of heat-resistant high porous cellular alloy Fe-Cr-Al as nanosized catalyst carrier in a clustered power system]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie – Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2010, vol. 12, no. 1, pp. 7–16.
18. Bashkirtsev G.V., Khramtsov V.D. [Activation of homogenization and sintering of highly permeable cellular materials based on heat-resistant alloys by introduction of nano powders]. *Tezisy докладov Tret'ei Vserossiiskoi konferentsii po nanomaterialam “NANO-2009”* [Proceedings of the 3rd All-Russia Conference on Nanomaterials “NANO-2009”]. Ekaterinburg, 2009, pp. 813–814. (In Russian)
19. Antsiferov V.N., Khramtsov V.D. *Sposoby polucheniya i svoistva vysokoporistykh pronitsaemykh yacheistykh metallov i spлавov* [Methods for the preparation and properties of highly permeable cellular metals and alloys]. *Perspektivnye materialy – Journal of Advanced Materials*, 2000, no. 5, pp. 56–60. (In Russian)
20. Chepurov A.I., Sonin V.M., Chepurov A.A., Zhimulev E.I., Tolochko B.P., Eliseev V.S. *Vzaimodeistvie al'maza s ul'tradispersnym poroshkom zheleza, poluchennym razlichnymi sposobami* [Interaction of diamond with ultra-fine Fe powders prepared by different procedures]. *Neorganicheskie materialy – Inorganic Materials*, 2011, vol. 47, no. 8, pp. 957–961. (In Russian)
21. Antsiferov V.N., Gilev V.G., Kostikov V.I. *Vzaimodeistvie fullerena C₆₀ s poroshkovym zhelezom* [The interaction of the C₆₀ fullerene with powder iron]. *Perspektivnye materialy – Journal of Advanced Materials*, 1998, no. 3, pp. 5–10. (In Russian)

Article history:

Received 10 August 2015

Revised 29 April 2016

Accepted 15 May 2016

КИНЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ НА БАЗЕ КАРБИДА ТИТАНА, НАНЕСЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ДИФфуЗИОННОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ИЗ СРЕДЫ ЛЕГКОПЛАВКИХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ, НА СПЛАВАХ ТИПА ТК И ВК

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

Поступила 18 января 2016
Рецензирование 11 марта 2016
Принята к печати 20 апреля 2016

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

Приведены результаты исследований процесса диффузионного титанирования твердых сплавов типа ТК и ВК из среды легкоплавких жидкометаллических растворов. Описана технология, обеспечивающая формирование на твердых сплавах качественных работоспособных износостойких титановых покрытий. Толщина получаемого покрытия варьируется в зависимости от температуры и времени выдержки и составляет от 2,6 до 5,6 мкм на сплавах типа ТК; от 2 до 5,4 мкм на сплавах типа ВК. Твердость получаемых покрытий зависит от температуры нанесения покрытия и режимов предварительной цементации и составляет от 24 100 до 30 000 МПа для сплавов типа ТК; от 21 580 до 24 750 МПа для сплавов типа ВК. Исследована кинетика формирования диффузионных титановых покрытий на твердых сплавах. Исследована микроструктура получаемых покрытий, при этом выявлено, что покрытия состоят из двух слоев: само покрытие и переходная зона, величина и твердость которой зависят от режимов предварительной цементации и режимов нанесения покрытия. Исследована зависимость толщины получаемых покрытий от времени выдержки пластин в расплаве, от температуры нанесения покрытий, от состава покрываемого твердого сплава. Выявлено, что покрытия, формирующиеся на сплавах типа ТК, обладают большей толщиной и твердостью.

Ключевые слова: диффузионные титановые покрытия, твердые сплавы, свойства покрытий, кинетика формирования покрытий, предварительная цементация, стойкость инструмента.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-59-69

Введение

При производстве деталей машин значительную часть технологического процесса занимают операции механической обработки. Наиболее распространен инструмент, изготовленный из твердых сплавов и обладающий высокой твердостью, износостойкостью, теплостойкостью. Однако несмотря на все достоинства твердосплавного инструмента, интенсификация производства, автоматизация процесса обработки,

необходимость в обработке труднообрабатываемых материалов предъявляют все более высокие требования к эксплуатационным свойствам режущего инструмента.

Эксплуатационные свойства режущих инструментов могут быть существенно улучшены нанесением на их поверхность покрытий. Для нанесения покрытий на твердосплавный инструмент в настоящее время наиболее широко используются три способа: первый – это метод

химического осаждения покрытий, второй – метод физического осаждения, третий – химико-термическая обработка [1–3].

Метод химического осаждения покрытий CVD (Chemical Vapor Deposition) основан на получении различного рода покрытий вследствие гетерогенных химических реакций в парогазовой среде, окружающей покрываемый инструмент. Основным элементом покрытия восстанавливается из галогенидов металла водородом в присутствии других компонентов газовой смеси (аммиак, окись углерода и т. д.). Наибольшее распространение при использовании CVD нашли следующие соединения: TiC, TiCN, TiN, Al₂O₃. Общими недостатками CVD-технологий являются сложность оборудования, необходимость использования ядовитых и взрывоопасных газов и соединений [4, 5].

Метод физического осаждения покрытий PVD (Physical Vapor Deposition) основан на осаждении с предварительной ионизацией элементов покрытия в парообразном агрегатном состоянии на твердой подложке. Недостатками технологий формирования PVD являются: сложность технологического оборудования, требующая использования вакуумной техники, ограниченная по форме номенклатура покрываемых изделий, малая толщина покрытий и необходимость нанесения многослойных покрытий [5, 6].

Одним из самых распространенных методов улучшения эксплуатационных характеристик режущего инструмента является химико-термическая обработка (ХТО). Сущность ХТО заключается в нагреве и выдержке при заданной температуре изделий в активных твердых, жидких или газовых средах, в результате чего вследствие диффузионных процессов в поверхностных слоях изделий изменяется элементный и структурно-фазовый состав, а следовательно, и свойства этих поверхностных слоев (поверхностное легирование) [5, 7, 8]. Среди методов ХТО наибольшее распространение получили: цементация, азотирование, нитроцементация, цианирование, алитирование, борирование и т. д. Наиболее эффективной технологией ХТО применительно к твердым сплавам является разработанный нами способ диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов [9].

Существует большое количество работ, в которых затрагиваются вопросы формирова-

ния различных покрытий на твердых сплавах [10–14]. Однако большинство из них посвящены кинетике формирования покрытий, нанесенных методами PVD и CVD. Количество исследований, описывающих кинетику формирования покрытий на твердых сплавах, полученных методами диффузионной металлизации, незначительно [14, 15]. В настоящий момент изучена кинетика формирования диффузионных покрытий на основе титана, наносимых в среде четыреххлористого углерода [15, 16]. Для данного способа характерна одновременная адсорбция из насыщающей среды титана и углерода, что приводит к образованию на поверхности изделия слоя карбида титана, диффузионно не связанного с основным материалом покрываемого изделия, что снижает прочность сцепления покрытия с основой. При этом само покрытие обладает высокой твердостью и хрупкостью. Данных недостатков лишены покрытия, нанесенные по технологии диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов. Однако для разработки оптимальных режимов диффузионного титанирования из среды легкоплавких жидкометаллических растворов необходимо изучение кинетики формирования диффузионных титановых покрытий на твердых сплавах в зависимости от режимов их нанесения. На данный момент остаются неисследованными следующие вопросы: зависимость толщины покрытия от режимов диффузионного насыщения, зависимость микротвердости титановых покрытий от режимов нанесения покрытия и состава покрываемого твердого сплава, зависимость стойкости режущих пластин, имеющих диффузионное титановое покрытие от режимов нанесения покрытия и состава покрываемого сплава.

Целью данной работы является анализ кинетики формирования титановых покрытий, нанесенных на твердосплавной инструмент по технологии диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов.

Методика

Покрытие наносилось путем диффузионной металлизации с применением разработанной нами технологии [9] посредством погружения твердосплавных пластин в ампулу с легкоплавким расплавом и их выдержки в изотермическом

режиме в среде инертных газов. Использовались твердосплавные шестигранные пластины WNUM-080404, пятигранные пластины PNUM-110408 из сплавов BK8, T5K10, T15K6. В качестве легкоплавкого расплава, осуществляющего доставку элемента к поверхности покрываемого изделия, использовался расплав эвтектического состава свинец-висмут-литий, в который в заданном количестве вводился титан.

Перед нанесением покрытия пластины были подвергнуты кратковременной высокотемпературной цементации. Цементация служит для насыщения поверхности инструмента углеродом, за счет которого впоследствии формируется покрытие. Цементация проводилась с применением технологии вакуумной цементации в среде пропан-бутановой смеси.

Нанесение покрытия проводилось в разработанной нами установке для диффузионной металлизации в среде легкоплавких жидкометаллических растворов [17]. Данная установка обеспечивает возможность нанесения покрытий в открытой жидкометаллической ванне в циклическом режиме и совмещения процесса диффузионной металлизации с термической обработкой материала покрываемого изделия.

Исследования по оценке влияния диффузионных титановых покрытий на стойкость режущего инструмента проводились путем натурных испытаний при токарной обработке резанием. Токарная обработка осуществлялась проходными резцами с механическим креплением пластин. Использовались твердосплавные пятигранные пластины из сплавов BK8, BK12, T15K6, T5K10 без покрытия и с титановыми диффузионными покрытиями, нанесенными по предлагаемой технологии. Характеристики стойкости инструмента определялись при точении прутков, изготовленных из стали У10 после закалки и среднего отпуска, твердостью 43...45 HRC, и из серого чугуна СЧ20, твердостью 200...240 HB.

Токарная обработка стали проводилась при скорости резания 130 м/мин, подачей 0,8 мм/об, глубиной резания 1 мм. Чугун обрабатывался при скорости резания 100 м/мин, подачей 0,052 мм/об, глубиной резания 1 мм. За период стойкости принималось время, за которое инструмент терял режущие свойства.

Твердость пластин проверялась по методу Роквелла и методу микроВиккерса. Твердость

по Роквеллу определялась на твердомере ТК-2М по стандартной методике по шкале «А». Металлографические исследования проводились на микрошлифах, подготовленных по стандартной методике. Исследования по определению толщины покрытий, их структуры и микротвердости осуществлялись на микротвердомере ПМТ-3.

Для выявления структуры покрытия применялся метод термического травления, заключающийся в нагреве образцов в течение 10...15 мин при температуре 450...500 °С в воздушной среде. При этом структурные составляющие основы и покрытия окрашиваются в разные цвета в зависимости от скорости их окисления.

Анализ результатов исследований

В ходе исследований было установлено, что при диффузионном насыщении твердосплавного инструмента из среды легкоплавких жидкометаллических растворов титаном на его поверхности формируется покрытие величиной 4...6 мкм. Микрофотография сплава T15K6 с нанесенным диффузионным титановым покрытием представлена на рис. 1.

В ходе испытаний, проводимых по вышеописанной методике, установлено, что стойкость инструмента зависит от таких свойств сформированного на его поверхности покрытия, как

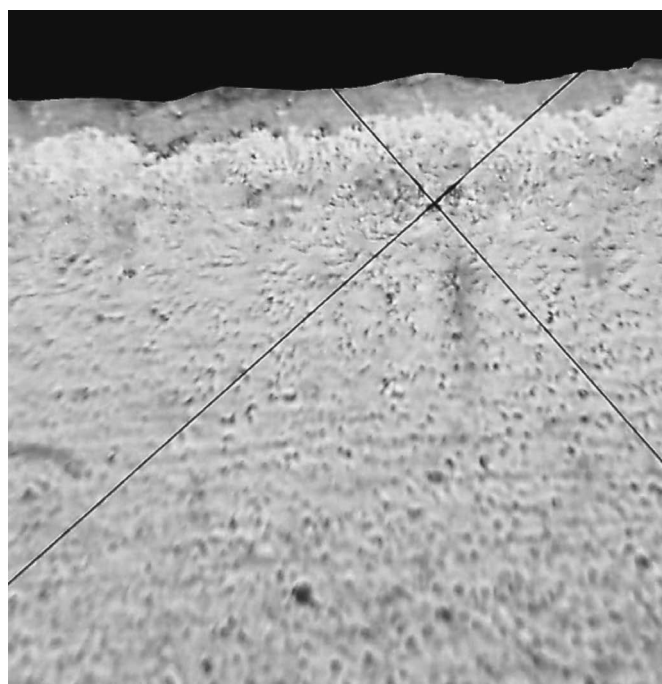
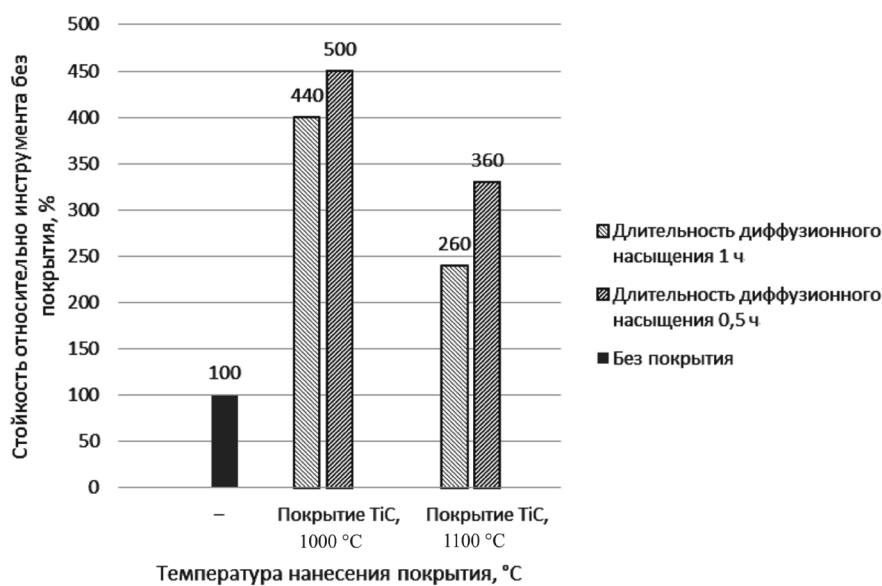


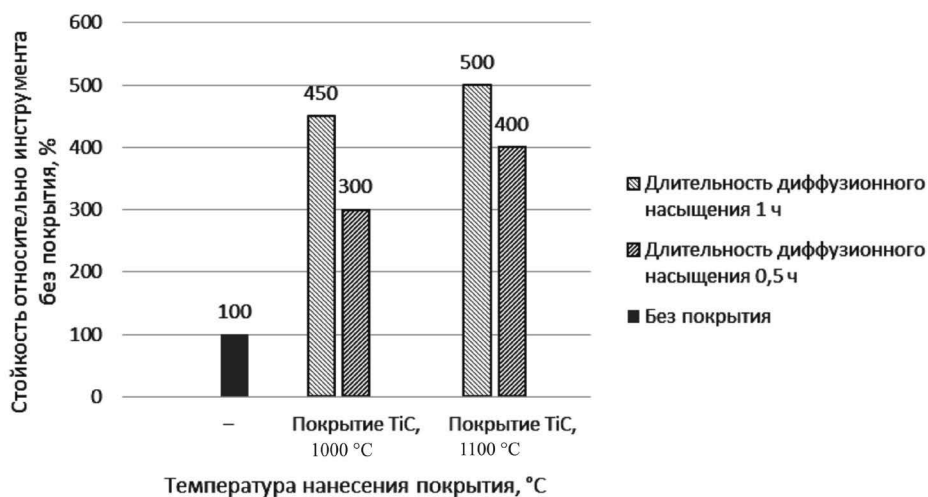
Рис. 1. Микроструктура твердого сплава T15K6 с диффузионным титановым покрытием, $\times 500$

толщина, твердость и др. Покрyтия наносились по различным технологическим режимам. Варьировались температура диффузионного насыщения и время выдержки пластин в расплаве. Диффузионное насыщение проходило при температурах 1000...1100 °С длительностью 30...60 мин. Выбор данного диапазона температур обусловлен тем, что во время нанесения покрытий при температурах ниже 1000 °С оно содержит большое количество карбида титана, обладающего высокой твердостью и хрупкостью,

что отрицательно сказывается на стойкости инструмента. При нанесении покрытия при температурах 1000...1100 °С в покрытие увеличивается содержание α -Ti, выполняющего роль связки и увеличивающий вязкость покрытия, что влечет за собой увеличение стойкости инструмента [8]. Так, при нанесении покрытия на режущий инструмент при температуре 1000 °С с выдержкой 30 мин, изготовленный из твердого сплава марки T15K6, его стойкость увеличивается в пять раз (рис. 2, а). Аналогичное повышение стойкости



а



б

Рис. 2. Зависимость стойкости режущих пластин от режима нанесения покрытия:

а – пластин, изготовленных из твердого сплава марки T15K6; б – пластин, изготовленных из твердого сплава марки VK8

в пять раз наблюдается также и при нанесении покрытия на режущий инструмент, изготовленный из твердого сплава ВК8, но уже при температуре 1100 °С и длительности выдержки 60 мин (рис. 2, б). Стойкость непокрытых пластин была принята за 100 %.

Получаемые по данной технологии покрытия состоят из двух слоев – поверхностного и переходного. Поверхностный слой, формирующийся вследствие диффузии углерода к титану, наблюдается на поверхности твердого сплава даже без травления (см. рис.1).

Поверхностный слой характеризуется высокой твердостью, которая в 1,3...1,5 раз превышает твердость покрываемого твердого сплава и зависит от режимов предварительной цементации, процесса металлизации – температуры и длительности, а также от состава покрываемого сплава. Так, микротвердость поверхностных слоев покрытий, получаемых при оптимальных с точки зрения стойкости режимах диффузионного насыщения, на твердом сплаве Т15К6 при температуре 1000 °С длительностью 30 мин составляет 24 100 МПа, что в 1,3 раза выше твердости основы, а на сплаве ВК8 при температуре 1100 °С длительностью 60 мин составляет 24 750 МПа, что в 1,4 раза выше твердости основы (рис. 4).

Между поверхностным слоем и материалом основы формируется переходный слой. Переходный слой характеризуется наличием в нем карбидов титана и элементов покрываемого материала, что свидетельствует о том, что формирование данного слоя осуществляется за счет гетеродиффузии между элементами покрытия и элементами покрываемого материала. Переходный слой обладает большей твердостью, чем твердость основы, но меньшей, чем твердость покрытия. При этом твердость переходного слоя переменна по его сечению и постепенно снижается от поверхностного слоя к матрице (см. рис.4). Толщина и твердость переходного слоя покрытия, так же как и поверхностного, зависит от режимов предварительной цементации,

процесса металлизации, а также от состава покрываемого сплава. Как показывают результаты исследований, большое влияние на состав и свойства переходного и поверхностного слоев оказывает концентрация углерода в поверхностных слоях покрываемого твердого сплава, получаемая предварительной цементацией.

Выбор режима предварительной цементации существенно влияет на твердость покрытия и, как следствие, на стойкость режущего твердосплавного инструмента. Установлено, что повышение стойкости режущего инструмента наблюдается как при относительно низких (950 °С), так и при высоких (1150 °С) температурах цементации. При этом повышение температуры цементации приводит к росту концентрации углерода в цементованном слое, что связано с увеличением растворимости углерода в кобальтовой связке при росте температуры предварительной цементации. Так, при увеличении температуры, вследствие насыщения поверхностных слоев углеродом, наблюдается возрастание твердости пластин. Это происходит за счет использования при формировании покрытия углерода, полученного при цементации, вместо углерода материала-основы. Нанесение покрытий без предварительной цементации приводит к снижению твердости инструмента. Диффузионное титанирование проводилось при температуре 1000 °С, при этом падение твердости инструмента составляет три единицы по шкале HRA (рис. 3). Однако увеличение концентрации углерода в покрываемом материале влечет

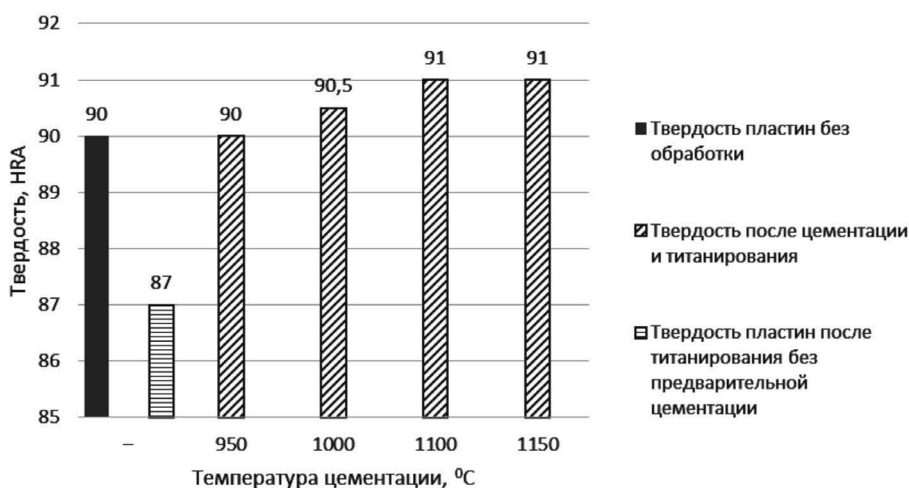


Рис. 3. Влияние предварительной цементации на твердость твердосплавного инструмента

за собой снижение стойкости покрытого инструмента за счет увеличения хрупкости покрытия.

Определяющее влияние на кинетику формирования покрытий на твердых сплавах при титанировании оказывают температуры процесса, время выдержки покрываемых изделий в расплаве, состав твердого сплава (рис. 5). Температура нанесения покрытий оказывает влияние

как на микротвердость покрытий и структуру переходной зоны, так и на их толщину. Так, при нанесении титанового покрытия на сплав Т15К6 при температуре 1100 °С его твердость составляет 30 000 МПа, а при нанесении покрытия при температуре 1000 °С твердость покрытия составляет 24 100 МПа (рис. 4, а). Кроме высокой твердости самих покрытий переходная зона получаемых при более высоких температурах

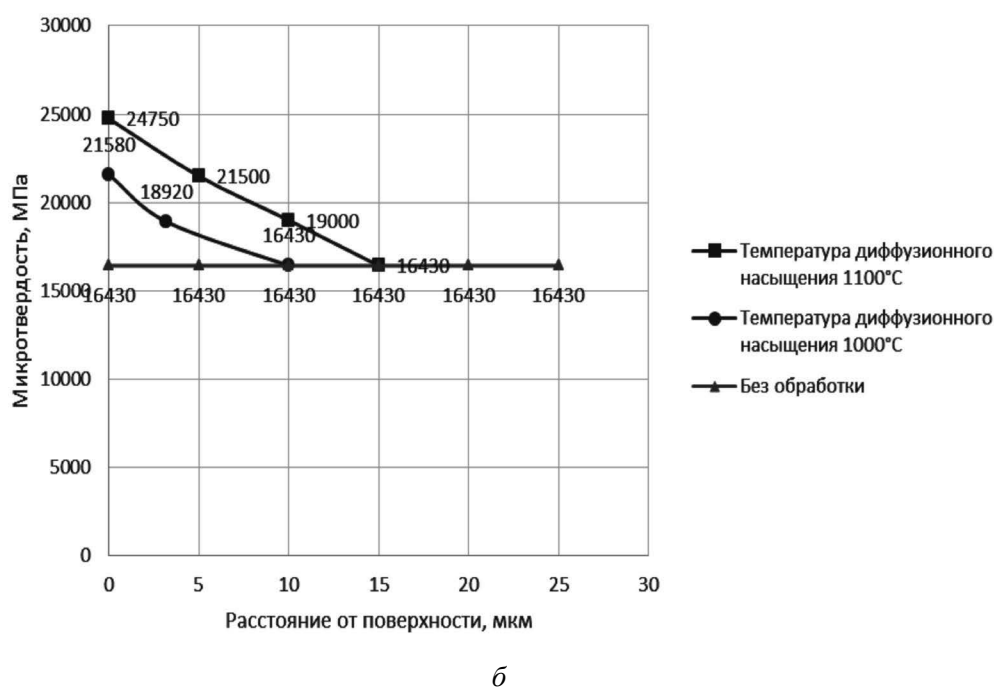
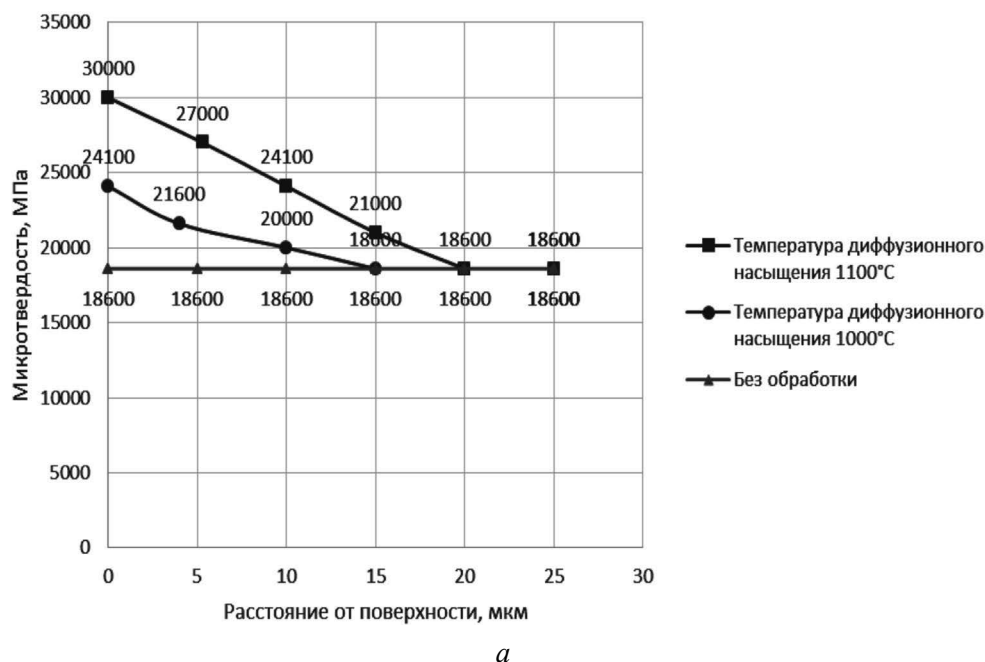


Рис. 4. Микротвердость пластин, подвергнутых диффузионному насыщению титаном из среды легкоплавких жидкометаллических растворов:

а – Т15К6; б – ВК8

покрытий также имеет повышенную твердость и протяженность. При нанесении покрытия на сплав Т15К6 твердость его переходной зоны меняется от 27 000 до 18 600 МПа (твердость основы), переходная зона имеет протяженность 14,7 мкм (рис. 4, *а* и 5, *а*). При нанесении покрытия на тот же сплав, но при температуре 1000 °С, твердость переходной зоны меняется от 21 600 до 18 600 МПа (твердость основы), ее толщина составляет 11 мкм (см. рис. 4, *а* и 5, *а*). Аналогично влияние температуры проявляется и на сплавах группы ВК (рис. 4, *б* и 5, *б*).

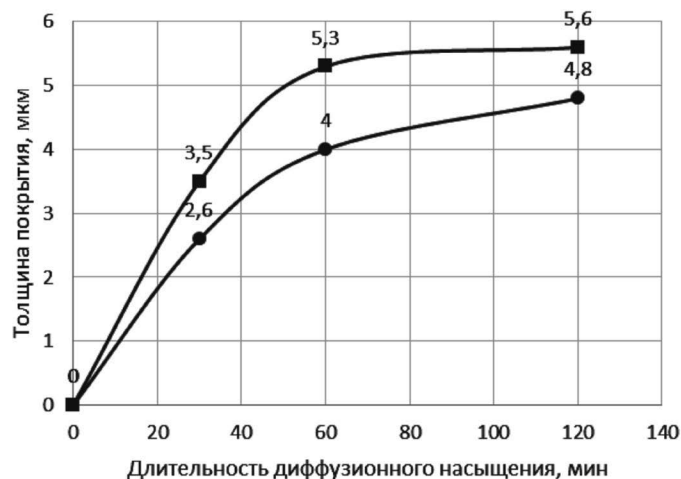
Повышение температуры процесса нанесения покрытия оказывает существенное влияние на кинетику его формирования. При повышении температуры интенсифицируется процесс роста покрытий (рис. 5). Так, при температуре 1100 °С

и длительности выдержки в расплаве 60 мин на поверхности пластин, изготовленных из твердого сплава марки Т15К6, образуется диффузионное покрытие толщиной 5,3 мкм (рис. 5, *а*). При использовании аналогичных режимов для нанесения покрытий на пластины, изготовленные из сплава ВК8, на их поверхности формируется покрытие толщиной 5 мкм (рис. 5, *б*). Увеличение толщины покрытий при увеличении температуры их нанесения объясняется интенсификацией адсорбционных и диффузионных процессов при повышении температуры, что ведет к образованию покрытия большей толщины при высоких температурах, чем при низких, при одинаковой длительности процесса (см. рис. 4).

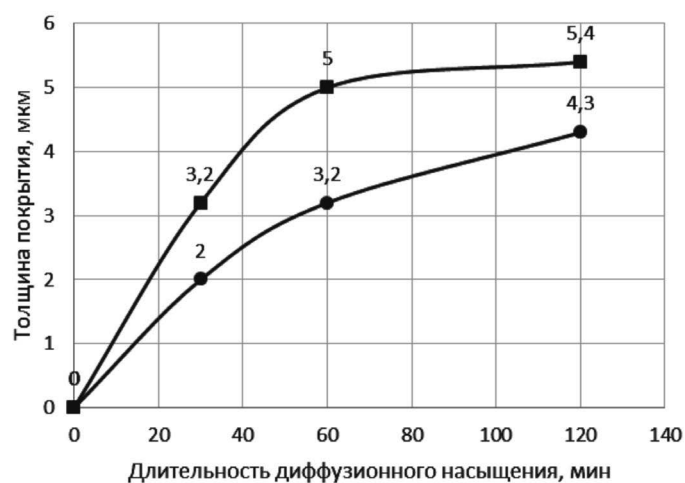
Время выдержки изделий в расплаве также играет значительную роль при формировании покрытий. Так, при выдержке в легкоплавком расплаве пластин из сплава ВК8 при температуре 1100 °С в течение 60 мин приводит к формированию покрытия толщиной 5 мкм, а при выдержке 30 мин – толщиной 3,2 мкм (рис. 5, *б*). Однако при диффузионном насыщении твердых сплавов карбидообразующими элементами нецелесообразно применение длительной выдержки покрываемого изделия в расплаве, так как покрытия формируются за счет диффузии углерода к покрытию и блокировки диффузии карбидообразующих элементов в глубь покрываемого изделия, что приводит к снижению интенсивности формирования покрытия и торможению его роста [8].

Немаловажное влияние на процесс формирования покрытия также оказывает состав покрываемого твердого сплава. Сравнение кинетики формирования покрытий на сплавах типа ТК и ВК показывает, что температурные режимы, при которых формируется покрытие, по-разному влияют на кинетику формирования покрытия (рис. 4, 5 и 6).

При температуре процесса 1000 °С и времени выдержки 30 мин различие в кинетике роста покрытий наиболее высоко, оно составляет 1,6 мкм (рис. 6, *а*). С увеличением темпера-



а



б

Рис. 5. Зависимость толщины покрытий от температуры диффузионного насыщения и времени выдержки пластин в расплаве, формирующихся на твердом сплаве:

а – марки Т15К6; *б* – марки ВК8

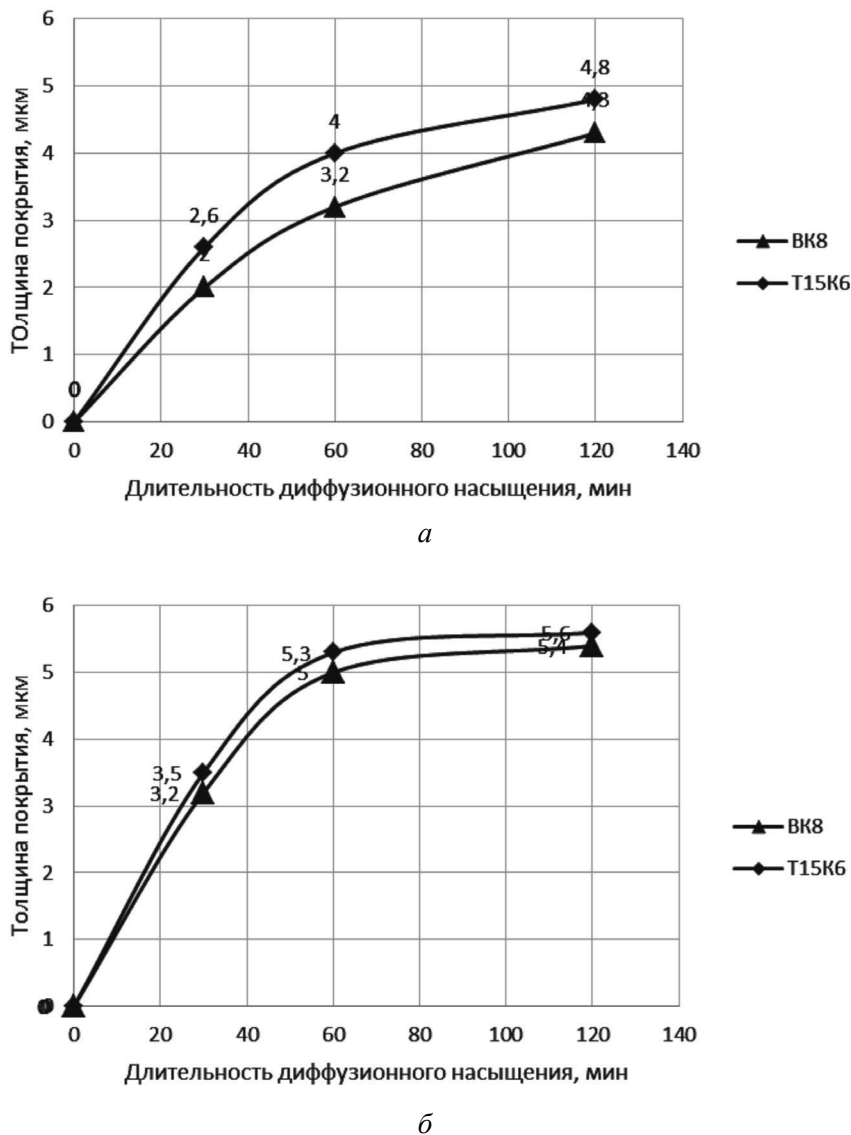


Рис. 6. Зависимость толщины покрытий от времени выдержки пластин T15K и VK8 в расплаве при температурах:

a – 1000 °C; *б* – 1100 °C

туры увеличивается скорость роста толщины покрытия. Однако при увеличении длительности процесса титанирования наблюдается затухание процесса роста толщины покрытия, при этом график, характеризующий рост покрытия, приобретает форму экспоненты (см. рис. 5 и 6). Снижение интенсивности роста толщины покрытия объясняется блокирующим действием карбидов титана на диффузию элементов в глубь покрываемого материала [8]. Кроме того, можно выделить более низкую твердость покрытий и переходной зоны, меньшую протяженность переходной зоны покрытий на сплавах ВК по сравнению с покрытиями, нанесенными на сплавы ТК в аналогичных режимах.

Различие в кинетике формирования покрытия можно объяснить тем, что в сплаве ВК8 большая концентрация вольфрама и кобальта, чем в сплаве T15K6. При цементации твердого сплава элементом, который можно насытить углеродом, является кобальт. Однако при увеличении концентрации углерода в кобальте эффект блокирования диффузии элементов покрытия в глубь основного материала усиливается, что приводит к меньшей интенсивности роста покрытия [8].

Таким образом, нанесение диффузионных титановых покрытий из среды легкоплавких жидкометаллических растворов на сплавы типа ТК и ВК может эффективно использоваться для повышения эксплуатационных свойств твердосплавного режущего инструмента. Так, период стойкости инструментов, изготовленных из твердых сплавов, возрастает в 5 раз. При этом стойкость титанированного твердосплавного инструмента во многом определяется режимами технологического процесса и составом твердого сплава.

Выводы

1. Покрытия, образующиеся на твердых сплавах вследствие их диффузионного насыщения титаном из среды легкоплавких жидкометаллических растворов, состоят из двух слоев: поверхностного и переходного. Поверхностный слой характеризуется высокой твердостью, которая в 1,3...1,5 раз превышает твердость покрываемого твердого сплава. Переходный слой характеризуется наличием в нем карбидов титана и элементов покрываемого материала, что свидетельствует о том, что формирование данного слоя осуществляется за счет гетеродиффузии между элементами покрытия и элементами покрываемого материала.

2. Выбор режима предварительной цементации существенно влияет на твердость и, как следствие, на стойкость режущего твердосплавного инструмента, имеющего титановое покрытие.



тие. С увеличением температуры и длительности предварительной цементации происходит увеличение твердости покрытия. Однако содержание большого количества углерода в покрываемом материале влечет за собой уменьшение стойкости покрытого инструмента за счет увеличения хрупкости покрытия.

3. С увеличением температуры диффузионной металлизации и времени выдержки изделий в расплаве увеличивается твердость покрытия и переходной зоны, а также их толщина. Однако применение длительных выдержек нецелесообразно из-за блокировки диффузии карбидообразующих элементов в глубь покрываемого изделия.

4. Элементный состав покрываемого твердого сплава оказывает значительное влияние на кинетику формирования покрытий. Так, наиболее интенсивный рост покрытий, наибольшая величина переходной зоны, наибольшая твердость покрытий наблюдаются на твердых сплавах с меньшей концентрацией кобальта.

Список литературы

1. Ильин А.А., Строганов Г.Б., Скворцова С.В. Покрытия различного назначения для металлических материалов: учебное пособие. – М.: Альфа-М: ИНФРА-М, 2013. – 144 с.
2. Козырева Л.В. Химическое газофазное осаждение как метод получения наноструктурных материалов // Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: материалы 12-й Международной научно-практической конференции, 13–16 апреля 2010 г. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – Ч. 2. – С. 174–179.
3. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов: учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
4. DeBenedetti B., Grassini S., Maffia L. Comparison between eco-profiles of innovative PA-CVD and traditional galvanic coatings // Proceedings of International Conference on Materials for Advanced Technologies “ICMAT 2005”. – Singapore, 2005. – P. 1–4.
5. Вережачка А.С., Третьяков И.П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
6. Mattox D.M. Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing: film formation, adhesion, surface preparation and contamination control. – Westwood, NJ: Noyes Publications, 1998. – 917 p. – ISBN 0-8155-1422-0. – eISBN 1-5912-4079-4.
7. Chaevsky M. Comparison of methods of formation of protective coating from high-temperature liquid media // Metal Science and Heat Treatment. – 2001. – Vol. 43, iss. 11–12. – P. 446–466. – doi: 10.1023/A:1014888619804.
8. 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.
9. Патент 2451108 Российская Федерация, МПК С23 С 10/26 (2006.01). Способ обработки инструмента из стали или твердого сплава / А.Г. Соколов, Мансиа С. – Заявл. 04.10.2010; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14.
10. Изучение роста износостойких слоев из карбида титана на твердых сплавах / Г.Л. Платонов, В.Н. Аникин, А.И. Аникеев, Н.Н. Золоторева, М.Н. Налимова, Р.Ф. Чебураева, К.Ф. Кузнецова, В.С. Торопченков // Порошковая металлургия. – 1980. – № 8. – С. 48–52.
11. Sandgren J.-E. Structure and properties of TiN coatings // Thin Solid Films. – 1985. – Vol. 128, N 1–2. – P. 21–44. – doi: 10.1016/0040-6090(85)90333-5.
12. Структура, свойства и получение твердых нанокристаллических покрытий, осаждаемых несколькими методами / В.М. Береснев, А.Д. Погребняк, Н.А. Азаренков, Г.В. Кирик, Н.К. Ердубаева, В.В. Понарядов // Успехи физики металлов. – 2007. – Т. 8, вып. 3. – С. 171–246. – doi: 10.1234/Usp.Fiz. Met.08.171.
13. Исследование многослойных вакуумно-дуговых износостойких покрытий, подвергнутых термообработке / А.А. Андреев, В.В. Кунченко, В.М. Шулаев, К.М. Китаевский, А.Н. Челомбитко // Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Пленки–2002». – М.: МИРЭА, 2002. – С. 206–209.
14. Соколов А.Г., Мансиа С. Механизм и особенности формирования диффузионных никель-медных покрытий из среды легкоплавких жидкометаллических растворов на твердых сплавах // Технология металлов. – 2012. – № 2. – С. 38–43.
15. Диффузионные карбидные покрытия / В.Ф. Лоскутов, В.Г. Хижняк, Ю.А. Куницкий, М.В. Киндрачук. – Киев: Техника, 1991. – 168 с.
16. А. с. 1145051 СССР. Способ получения диффузионных покрытий / А.Т. Рева, В.Г. Горбач, Н.А. Кулыба, А.В. Бильченко. – Заявл. 06.04.1982; опубл. 15.03.1985, Бюл. № 10.
17. Патент 2521187 Россия Федерация, МПК С 23 С 10/18; С 23 С 2/04 (2006.01). Устройство для диффузионной металлизации в среде легкоплавких жидкометаллических растворов / А.Г. Соколов. – Заявл. 25.10.2012; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (71), April – June 2016, Pages 59–69

The kinetics of formation of coatings based on titanium carbide during diffusion metallization from the fusible liquid metal solutions, on the hard alloys

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 Moskovskaya st., Krasnodar, 350072, Russian Federation

Abstract

The analysis of the strengths and weaknesses of existing technologies to improve the performance properties of carbide cutting tool is given. The results of studies of the diffusion metallization process by titanium of hard alloys from the fusible liquid-metal solutions are given. The influence of titanium diffusion coatings on the durability of carbide tools is investigated. A method of providing formation on hard alloys for wear-resistant titanium high-quality functional coatings is described. The thickness of the coating varies depending on the temperature and exposure time, and ranges from 2.6 to 5.6 μm in the alloys of type TC; from 2 to 5.4 μm on alloys of the type VK. The hardness of the coatings obtained depends on the temperature of the coating and modes of pre-carburizing, and varies from 24100 to 30000 MPa for alloys of type TK; 21580 up to 24750 MPa for alloys of the type VK. The kinetics of formation of diffusion coatings on titanium carbide is investigated. The microstructure of the coatings is investigated. The coating consists of two layers: the coating and the transition zone, which size and hardness depends on the conditions of pre-carburization and modes of application of the coating. The dependence of the thickness of the coatings from the exposure time of the plates in the melt, the temperature of coating composition from the coated hard alloy is investigated. It is revealed that the coatings formed on the TK-type alloy have greater thickness and hardness, then coatings on the VK-type alloys.

Keywords

titanium diffusion coatings, hard metals, properties of the coatings, kinetics of coating formation, pre-carburization, tool life.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-59-69

References

1. Il'in A.A., Stroganov G.B., Skvortsova S.V. *Pokrytiya razlichnogo naznacheniya dlya metallicheskih materialov* [Coatings of various purposes for metallic materials]. Moscow, Al'fa-M Publ., INFRA-M Publ., 2013. 144 p.
2. Kozyreva L.V. [Chemical vapor deposition as a method of obtaining of nanostructured materials]. *Materialy 12 Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Resursosberegayushchie tekhnologii remonta, 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"]. St. Petersburg, 2010, pt. 2, pp. 174–178. (In Russian)
3. Lakhtin Yu.M., Arzamasov B.N. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov* [Chemical heat treatment of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 256 p.
4. DeBenedetti B., Grassini S., Maffia L. Comparison between eco-profiles of innovative PA-CVD and traditional galvanic coatings. *Proceedings of International Conference on Materials for Advanced Technologies "IC-MAT 2005"*, Singapore, 2005, pp. 1–4.
5. Vereshchaka A.S., Tret'yakov I.P. *Rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta s iznosostoikimi pokrytiyami* [Performance of cutting tool with wear-resistant coatings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 336 p.
6. Mattox D.M. *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing: film formation, adhesion, surface preparation and contamination control*. Westwood, NJ, Noyes Publ., 1998. 917 p. ISBN 0-8155-1422-0. eISBN 1-5912-4079-4

7. M.I. Comparison of methods of formation of protective coating from high-temperature liquid media. *Metal Science and Heat Treatment*, 2001, vol. 43, iss. 11–12, pp. 446–466. doi: 10.1023/A:1014888619804
8. 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 bases of improving the stability of cutting and die tools at the expense of diffusive metallization from the environment fusible liquid metal solutions. Dr. eng. sci. diss.]. Krasnodar, 2008. 369 p.
9. Sokolov A.G., Mansia S. *Sposob obrabotki instrumenta iz stali ili tverdogo splava* [The method of processing of tool steel or hard alloy]. Patent RF, no. 2451108, 2012.
10. Platonov G.L., Anikin V.N., Anikeev A.I., Zolotareva N.N., Nalimova M.N., Cheburaeva R.F., Kuznetsova K.F., Toropchenov V.S. Izucheniye 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)
11. Sandgren J.-E. Structure and properties of TiN coatings. *Thin Solid Films*, 1985, vol. 128, no. 1–2, pp. 21–44. doi: 10.1016/0040-6090(85)90333-5
12. Beresnev V.M., Pogrebnyak A.D., Azarenkov N.A., Kirik G.V., Erdybaeva N.K., Ponaryadov V.V. Struktura, svoystva i poluchenie tverdykh nanokristallicheskikh pokrytii, osazhdaemykh neskol'kimi metodami [Structure, properties and fabrication of the solid nanocrystalline coatings deposited in several ways]. *Uspehi fiziki metallov – Progress in Physics of Metals*, 2007, vol. 8, iss. 3, pp. 171–246. doi: 10.1234/Usp.Fiz.Met.08.171
13. Andreev A.A., Kunchenko V.V., Shulaev V.M., Kitaevskii K.M., Chelombit'ko A.N. [Investigation of multilayer vacuum-arc abrasion resistant coatings subjected to thermal treatment]. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Plenki-2002"* [Proceedings of the International scientific-technical conference "Film 2002"]. Moscow, 2002, pp. 206–209. (In Russian)
14. Sokolov A.G., Mansia S. Mekhanizm i osobennosti formirovaniya diffuzionnykh nikel'-mednykh pokrytii iz sredy legkoplavkikh zhidkometallicheskikh rastvorov na tverdykh splavakh [The mechanism and features of the diffusion formation of Nickel-copper coating from the environment of fusible liquid-metal solutions on hard alloys]. *Tekhnologiya metallov – Metal Technology*, 2012, no. 2, pp. 38–43.
15. Loskutov V.F., Khizhnyak V.G., Kunitskii Yu.A., Kindrachuk M.V. *Diffuzionnye karbidnye pokrytiya* [Diffusion carbide coating]. Kiev, Tekhnika Publ., 1991. 168 p.
16. Reva A.T., Gorbach V.G., Kulyba N.A., Bil'chenko A.V. *Sposob polucheniya diffuzionnykh pokrytii* [Method of obtaining diffusion coatings]. Inventor's Certificate USSR, no. 1145051, 1985.
17. Sokolov A.G. *Ustroistvo dlya diffuzionnoi metallizatsii v srede legkoplavkikh zhidkometallicheskikh rastvorov* [A device for the diffusion metallization in the environment of the fusible liquid metal solutions]. Patent RF, no. 2521187, 2014.

Article history:

Received 18 January 2016

Revised 11 March 2016

Accepted 20 April 2016

ПОЛУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ БЕЙНИТА РЕГУЛИРУЕМОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ СТАЛИ 20ГФЛ

Е.О. ЧЕРТОВСКИХ¹, инженер-технолог
А. В. ГАБЕЦ¹, канд. техн. наук, директор
по развитию
Д.А. ГАБЕЦ², аспирант
А.М. МАРКОВ², доктор техн. наук, профессор
Г.А. ОКОЛОВИЧ², доктор техн. наук, профессор
П.Н. КОМАРОВ³, аспирант
(¹АлтГТУ, г. Барнаул,
²ООО «АСЛЗ», г. Барнаул, ³НГТУ)

Поступила 22 февраля 2016
 Рецензирование 29 апреля 2016
 Принята к печати 15 мая 2016

Чертовских Е.О. - 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
 Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
 e-mail: chertovskih13@gmail.com

Рассмотрены недостатки существующего режима нормализации с отжигом 1-го рода крупногабаритных железнодорожных деталей из стали 20ГФЛ. Получено повышение ударной вязкости путем регулируемой закалки воздухом на бейнитную структуру с применением ортогональной матрицы планирования по 15 режимам. Определен интервал допустимой твердости для обеспечения значения ударной вязкости не менее 20 Дж/см². Рассчитаны регрессионные уравнения – полиномы 2-й степени для определения ударной вязкости KCV⁻⁶⁰, твердости, микротвердости структурных составляющих в виде феррита, легированного феррита, перлита. Предложен сложный цикл термической обработки для массивных железнодорожных деталей с сохранением внутренней энергии отливки для рекристаллизации.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, ферритно-перлитная структура, бейнит, ударная вязкость, микротвердость.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-70-79

Введение

Применяемый способ термообработки стали 20ГФЛ для деталей тележки грузового вагона остается постоянным на протяжении 50 лет, при этом в последнее время отмечена тенденция роста требований к хладостойкости стали из-за изломов ходовых частей (рис. 1). Детали грузовой тележки – рама боковая и балка наддрессорная – испытывают воздействие статических и динамических нагрузок с частотой 2 Гц при тензорном напряжении в продольном направлении 150 МПа и в поперечном 200 МПа. Температура эксплуа-

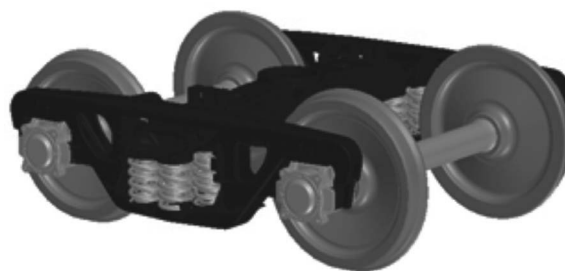


Рис. 1. Тележка грузового вагона

тации изменяется от –60 до +50 °С. Воздействие интенсивных нагрузок и температуры приводит к формированию быстро развивающихся уста-

лостных трещин, провоцирующих разрушение детали и сход состава (рис. 2).

Хладостойкость деталей рам боковых и балок надрессорных оценивается ударной вязкостью [1, 2]. С 2013 года в ГОСТ 32 400 введен показатель ударной вязкости KCV^{60} не менее 20 Дж/см². Для

получения требуемого значения ударной вязкости ужесточены требования к выплавке металла и его термической обработке. Введена обязательная продувка жидкого металла в ковше инертным газом. Термическая обработка включает в себя нормализацию с отжигом 1-го рода.

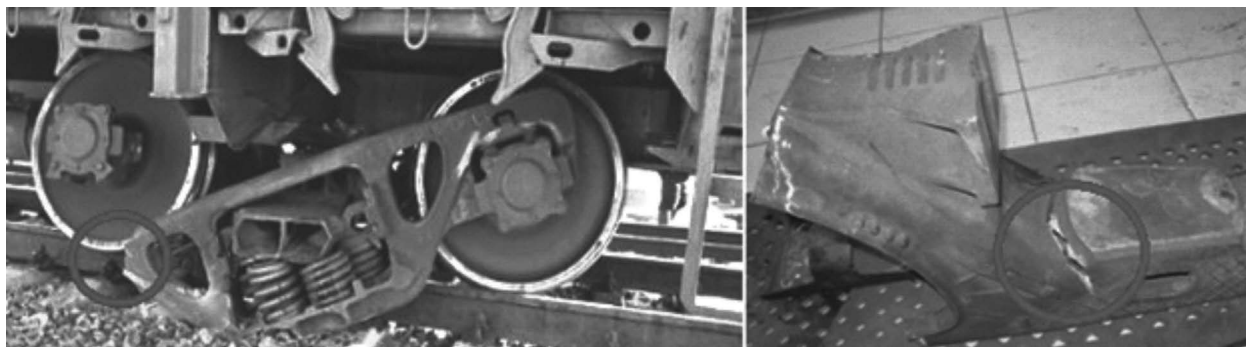


Рис. 2. Излом боковой рамы

Существующий режим нормализации с отжигом 1-го рода отливок весом по 500 кг приводит к медленному охлаждению со скоростью менее 0,12 °С/с. При таком охлаждении формируется ферритно-перлитная структура с пределом текучести не более 400 МПа и ударной вязкости зачастую не более 18 Дж/см². Известно, что при использовании регулируемого охлаждения в области промежуточного превращения формируется структура бейнита [3–6]. В свою очередь, бейнитная структура повышает предел текучести низкоуглеродистой стали до 900 МПа. Необходимо отметить, что при непрерывной скорости охлаждения в отличие от превращений в изотермических условиях конечная структура представляет собой смесь продуктов превращения различной морфологии: феррит, легированный феррит, перлит, верхний бейнит, нижний бейнит [5, 7–9].

Прочность стали, в структуре которой присутствует бейнит, зависит от его объемной доли и прочности самого бейнита. Прочность бейнита определяется величиной бейнитной рейки, плотностью дислокаций и размером карбидов. Размер бейнитной рейки зависит от расстояния между барьерами скольжения в соответствии с уравнением Холла–Петча, а также от плотности дислокаций. Вместе с тем длина бейнитной рейки зависит от диаметра исходного зерна аустенита. Сужение ширины рейки происходит при понижении температуры превращения, что повышает

плотность дислокаций. Сгруппированные в пакеты малоугловые границы между рейками бейнита препятствуют движению дислокаций, но не тормозят распространение хрупких трещин, барьером для которых служит высокоугловая граница бейнитного пакета или исходного аустенитного зерна. Поэтому для низкоуглеродистой стали перегрев при термической обработке недопустим. Также стоит отметить, что при равном размере ферритно-перлитных зерен с бейнитной оторочкой в перлите структура легированного феррита полигональной или игольчатой формы оказывает существенное влияние на порог хладноломкости с разницей в 100 °С, при этом форма легированного феррита не влияет на предел текучести [4]. Таким образом, научный интерес представляет проведение исследований температуры и продолжительности термической обработки с дальнейшим охлаждением в промежуточной области для выявления влияния твердости, микротвердости на ударную вязкость при отрицательных температурах с V-образным концентратором. В связи с этим актуальным будет проведение исследований режимов регулируемого охлаждения при термической обработке. Целью термической обработки является получение однородного распределения ферритно-перлитных составляющих с формированием дополнительной структуры в виде бейнита, что обеспечит повышение ударной вязкости KCV^{60} в стали 20ГФЛ.

Оборудование и методика исследования

С целью достижения повторяемости результатов ударной вязкости при термической обработке в лабораторных и производственных условиях на предприятии ООО «АСЛЗ» разработана методика № АСЛЗ.00.003-ОМ «Управляемая термообработка низкоуглеродистой стали». Главным достоинством разработанной методики является стабильность полученных экспериментальных данных при дальнейшем внедрении их на производстве. Согласно приведенной методике в лабораторных условиях устанавливаются режимы термической обработки по матрице планирования. Критические точки охлаждения Ag_1 и Ag_2 определяются по термограммам. Полученные результаты термограмм в дальнейшем используются для выбора режима охлаждения отливок различных масс и размеров путем установки датчиков контроля температуры на протяжении всего цикла термообработки. В связи с тем что на интервал превращения аустенита влияет температура нагрева, время выдержки и скорость охлаждающего потока воздуха, при внедрении режима термообработки на производстве осуществляется корректировка времени выдержки и скорости охлаждения массивного изделия с целью достижения заданного интервала промежуточного превращения. После термической обработки лабораторных образцов и отливок выполняется оценка значений ударной вязкости KCV^{60} , полученных в лабораторных и цеховых условиях [10, 11].

В соответствии с ГОСТ 9454–78 образцы ударной вязкости с размерами $10 \times 10 \times 55$ мм разрушали на маятниковом копре Metrocom с максимальным значением энергии удара 300 Дж. Концентратором разрушения является V-образный надрез. Измерение площади сечения и качество надреза определяли на микроскопе Nikon MM 400 с точностью 0,01 мм.

Металлографические исследования образцов были проведены на микроскопах Carl Zeiss Axio Observer A1m и Carl Zeiss Axio Observer Z1m. Съёмка изображений осуществлялась с увеличением до $\times 1000$ крат. Объектом исследования является металлографический шлиф, подготовленный с применением прессы Buehler Simpli Met 1000 и шлифовально-полироваль-

ных установок Struers Labo Pol-5 и Buehler Auto Met 300. Шлифование и полирование металлографических шлифов выполняли поэтапно, повышая дисперсность абразивных материалов. Химическое травление шлифов производили путем смачивания исследуемой поверхности реактивом 4 %-м раствором пикриновой кислоты и 4 %-м раствором азотной кислоты в этаноле.

Определение твердости выполняли на приборе ПШ-2 по методу Бринелля по ГОСТ 9012–59, диаметр шарика $D = 5$ мм, испытательная нагрузка 750 кгс. Оценку микротвердости структурных составляющих стали осуществляли по методу Виккерса в соответствии с требованиями ГОСТ 9450–76 на микротвердомере Wolpert Group 402 MVD. Индентор представляет четырёхгранную алмазную пирамиду с углом между противоположными гранями 136° . Нагрузка на индентор составляет 0,098...1,96 Н. Расстояние между отпечатками не менее $3d$, где d – размер диагонали отпечатка. Каждую структурную составляющую измеряли не менее трех раз при разбросах 3...5 % и по десять раз при разбросе более 5 %.

Описание эксперимента

Экспериментальную плавку металла производили на сталеплавильной печи ДСП-6М. Химический состав стали 20ГФЛ приведен в табл. 1. Трефовидные свидетели плавки выполнены по ГОСТ 977–88. Заготовки образцов ударной вязкости в количестве 45 шт. изготовлены из нижних частей тревовидных свидетелей плавки.

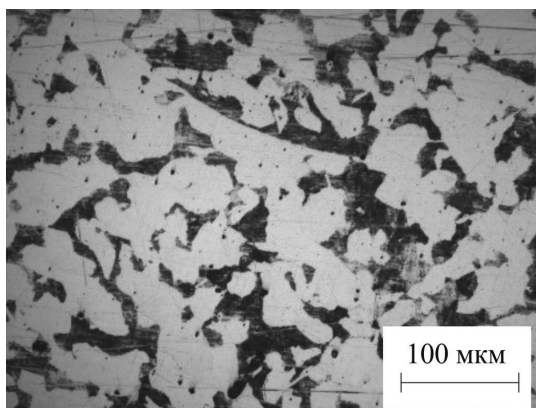
Бездиффузионный механизм превращения при образовании видманштеттового феррита (рис. 3) в отношении элементов замещения с диффузией углерода в остаточный аустенит приводит к твердости в литом состоянии до 160 НВ.

Влияние факторов температуры нагрева, времени выдержки и скорости охлаждающего потока воздуха на ударную вязкость, твердость и микротвердость оценивали матрицей ортогонального центрального композиционного плана, включающей 15 режимов термической обработки, приведенных в табл. 2. В матрице исследованы интервалы промежуточного превращения выделения бейнита в стали 20ГФЛ при температурах от 850 до 950 °С, времени выдержки в печи от 25 до 65 мин, скоростях охлаждаемого

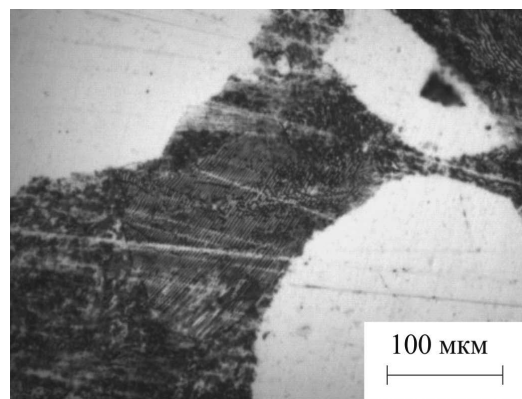
Таблица 1

Химический состав стали 20ГФЛ

Массовая доля содержания элементов, % вес.									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Al
ОСТ 32.183-2001 п. 3.3.2, 3.3.3, ТТ ЦВ-32-695-2006 п. 1.1 сталь 20ГФЛ									
0,17–0,25	0,3–0,5	0,9–1,4	≤0,04	≤0,04	≤0,3	≤0,3	≤0,6	0,07–0,13	0,04–0,06
0,19	0,42	1,15	0,01	0,01	0,08	0,05	0,1	0,06	0,03



а



б

Рис. 3. Литая видманшеттова структура стали 20ГФЛ до термообработки, балл 3, 160 НВ

Таблица 2

Режимы термообработки ортогональной матрицы планирования

Номер режима	T, °C	t, мин	V _{возд} , м/с	Ar3	Ar1	Микротвердости структурообразующих по ГОСТ 9450, НВ			Твердость по Бринеллю, НВ	KCV-60, Дж/см ²
						Феррит	Легированный феррит	Перлит		
1	940	60	8	651	492	115	120	194	184	11,1
2	940	60	3	796	615	167	194	197	168	16,7
3	940	30	8	766	555	161	190	259	175	12,5
4	940	30	3	698	304	112	126	159	176	30,8
5	860	60	8	834	451	105	118	153	173	23,6
6	860	60	3	743	451	126	139	201	176	38,5
7	860	30	8	750	409	170	177	284	179	35,8
8	860	30	3	785	414	156	153	210	176	28,2
9	860	45	5,5	701	453	136	180	223	163	51,4
10	950	45	5,5	790	477	177	197	219	163	26,4
11	900	25	5,5	765	442	139	151	336	170	36,4
12	900	65	5,5	818	363	185	194	259	143	26,9
13	900	45	2,5	805	381	158	198	265	170	27,9
14	900	45	8,5	766	336	173	194	237	156	27,3
15	900	45	5,5	849	430	104	167	194	156	18,3

потока воздуха от 2,5 до 8,5 м/с. После закалки воздухом выполняли отпуск 600 °С, 30 мин.

Применение регулируемого охлаждения включает в себя контролируемую изотермическую закалку с самоотпуском, где перенос области перлитных превращений в интервал более низких температур обеспечивает достижения максимальной степени измельчения зерна и получения структурной составляющей в виде бейнита до 3 % в ферритно-перлитной структуре.

На основании статистических данных и серий экспериментальных термообработок определен оптимальный интервал твердости 165...180 НВ, обеспечивающий требуемые характеристики ударной вязкости (рис. 4).

Бейнитная структура характеризуется формой в виде пластин или реек с высокой плотностью дислокации. Структура видманштеттова феррита имеет более низкую плотность дислокаций в сравнении с легированным ферритом.

По режимам № 1 и 3 феррит имеет форму хлопьев или колониевидных включений (рис. 5, а). Микротвердость феррита изменяется таким образом, что при увеличении времени выдержки с 30 до 60 мин наблюдается снижение микротвердости легированного феррита от 190 до 120 НВ. По режиму № 6 (рис. 5, в) ферритные и перлитные зерна претерпевают различные превращения (феррит пластически деформируется и рекристаллизуется), а перлит деформируется и превращается в плохо травящиеся белые зерна. Установлено, что механизм образования последних связан с быстрым разогревом и последующим быстрым распределением тепла в металле. В результате в образце образуется структура закалки с высокой твердостью [12–14]. Повышение микротвердости феррита и перлита объясняется появлением большого количества двойников и реализацией механизма множественного скольжения между

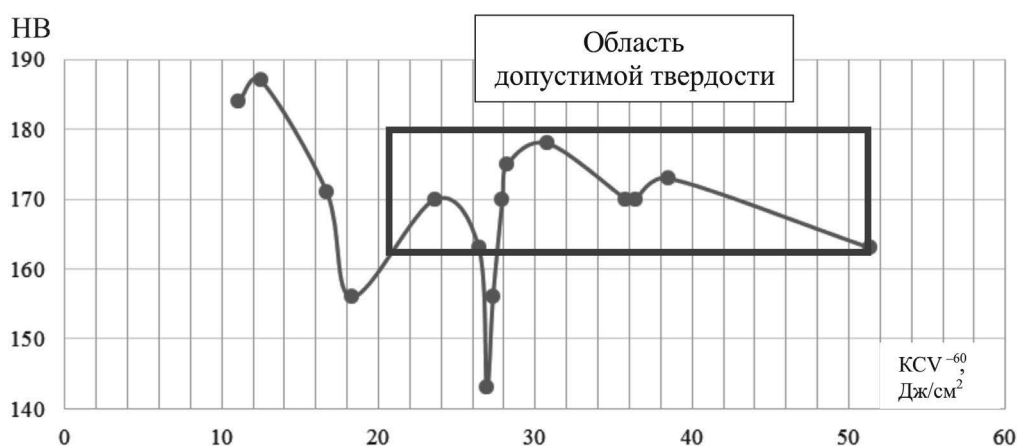


Рис. 4. График зависимости твердости НВ от ударной вязкости KCV^{-60}

ними, причем легированный феррит упрочняется больше, чем перлит.

Кодированные регрессионные уравнения расчета твердости феррита Φ_{HB} , легированного феррита $Л\Phi_{HB}$, перлита Π_{HB} с применением центрального композиционного плана ортогональной матрицы планирования имеют следующий вид:

$$HB = 149,6 + 2,9T - 4,1t - 0,3V + 10,1T^2 + 5,7t^2 + 10,1V^2 - Tt + 3,7TV + 0,7tV; \quad (1)$$

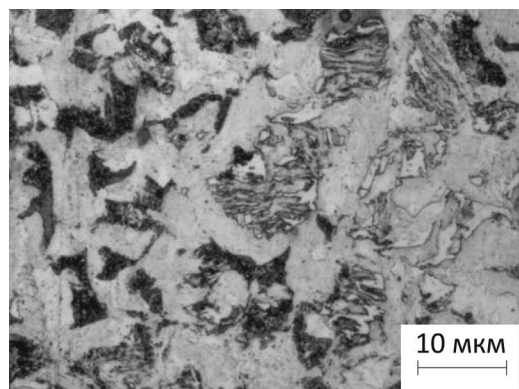
$$\Phi_{HB} = 148 + 4,4T - 2,7t + 0,7V - 4,4T^2 - 0,6t^2 + 1,7V^2 + 13Tt + 0,5TV - 17tV; \quad (2)$$

$$Л\Phi_{HB} = 195,1 + 5,8T - 2,1t - 1,1V - 11,1T^2 - 22t^2 - 6,1V^2 + 8,9t - 1,6TV - 22,9tV; \quad (3)$$

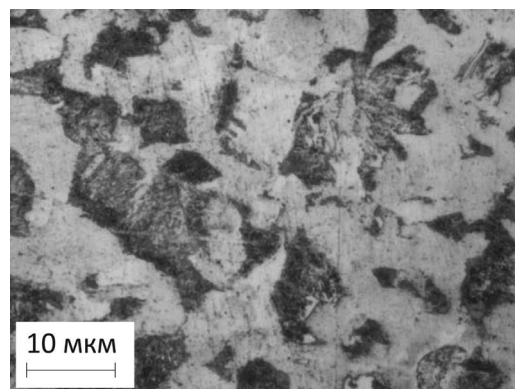
$$\Pi_{HB} = 255,3 - 4T - 23,8t + 8,1V - 37,4T^2 + 14,4t^2 - 17V^2 + 14,1Tt + 8,9TV - 28,1tV; \quad (4)$$

$$KCV^{-60} = 30,74 - 7,79T - 2,64t - 2,93V + 2,7T^2 - 2,25t^2 - 4,97V^2 - 1,7Tt - 2,08TV - 1,24tV, \quad (5)$$

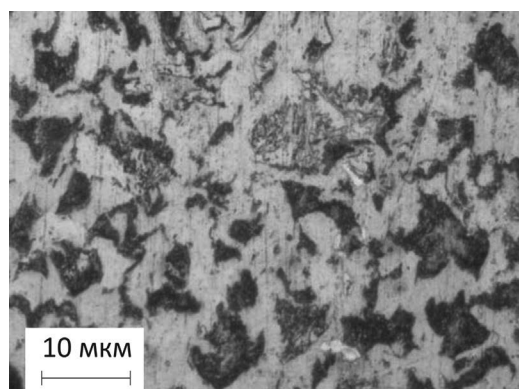
где T – кодированное значение температуры; t – кодированное значение времени выдержки при температуре T ; V – кодированное значение скорости потока воздуха.



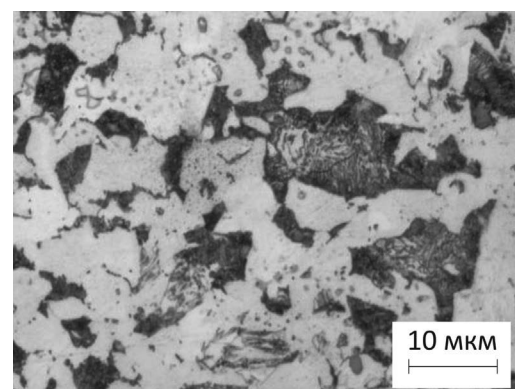
а



б



в



г

Рис. 5. Микроструктура стали 20ГФЛ после регулируемой термообработки (без отпуска):

а – режим № 3, $T = 940\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 30\text{ мин}$, $V_{\text{в}} = 8\text{ м/с}$, $V_{\text{ср}} = 6\text{ }^{\circ}\text{C/с}$, $\text{KCV}^{-60} = 12,5\text{ Дж/см}^2$, 8 балл; б – режим № 4, $T = 940\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 30\text{ мин}$, $V_{\text{в}} = 3\text{ м/с}$, $V_{\text{ср}} = 4,5\text{ }^{\circ}\text{C/с}$, $\text{KCV}^{-60} = 30,8\text{ Дж/см}^2$, 8 балл; в – режим № 5, $T = 860\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 60\text{ мин}$, $V_{\text{в}} = 8\text{ м/с}$, $V_{\text{ср}} = 7\text{ }^{\circ}\text{C/с}$, $\text{KCV}^{-60} = 23,6\text{ Дж/см}^2$, 10 балл; г – режим № 6, $T = 860\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 60\text{ мин}$, $V_{\text{в}} = 3\text{ м/с}$, $V_{\text{ср}} = 3,5\text{ }^{\circ}\text{C/с}$, $\text{KCV}^{-60} = 38,5\text{ Дж/см}^2$, 9 балл

На рост твердости, как следует из уравнения (1), наибольшее влияние оказывает температура термообработки и скорость охлаждающего потока воздуха.

Микротвердость структурообразующих составляющих изменяется в следующих пределах: феррит – 104...185 НВ, для легированного феррита – 120...198 НВ, для перлита 153...336 НВ. На микротвердость феррита в наибольшей степени оказывает влияние сочетание факторов: температуры термообработки и времени выдержки в сторону повышения твердости, а также сочетание факторов времени выдержки и скорости потока воздуха ведет к снижению твердости, что отражено в формуле (2). На микротвердость легированного феррита в наибольшей степени оказывает влияние фактор времени выдержки, а также сочетание факторов времени выдержки и скорости потока воздуха, что снижает твердость по формуле (3). На микротвердость пер-

лита в наибольшей степени оказывает влияние температура термообработки, а также сочетание факторов времени выдержки и скорости потока воздуха, что снижает твердость по формуле (4).

В результате наибольший интерес представляет оценка сочетания факторов времени выдержки и скорости потока воздуха, где в формулах (2)–(4) наблюдается общая закономерность их влияния на снижение твердости. При этом по отдельности они не снижают твердость в значительной степени.

На снижение KCV^{-60} влияет температура термообработки и скорость потока воздуха, а также сочетание всех факторов, при этом нижние границы температуры нагрева способствуют повышению ударной вязкости в случае увеличения времени выдержки и применения скорости потока 5,5 м/с в соответствии с уравнением (5).

При более низких температурах превращения схема роста феррита становится явно ани-

зотропной, а конечная его форма – иррегулярной и часто имеет зазубренные границы (рис. 5, а). Этот феррит иррегулярной формы называют квазипolygonальным. Температура начала превращения квазипolygonального феррита несколько ниже типичной для polygonального феррита, и формирование обеих форм феррита продолжается до температуры B_s .

Образование квазипolygonального феррита начинается на существующем polygonальном феррите на границах аустенитных зерен при снижении температуры. Феррит (α_w) формируется путем анизотропного (бокового) роста от феррита на границах зерен аустенита (рис. 5, б). Феррит (α'_w), напротив, зарождается непосредственно на границах аустенитных зерен (рис. 5, в). Игольчатая форма α_w и α'_w кристаллов, которая минимизирует поверхностную энергию, в процессе превращения отличает эти формы феррита от polygonального и квазипolygonального феррита. Известно, что прочность повышается в зависимости от снижения температуры превращения. Вязкость связана с размером эффективного зерна, определяемого характером границ продуктов превращения и структурным состоянием исходного аустенита. Упрочнение твердого раствора углеродом и увеличение плотности дислокаций в результате сочетания изменения объема и превращения по сдвиговому типу будут приводить к более высокой прочности стали при снижении температуры превращения [4, 8].

Металлографические исследования показали, что аллотропические превращения сопровождаются значительным измельчением зерен (см. рис. 5) по мере повышения скорости охлаждения аустенита. Форма образовавшихся из аустенита кристаллов легированного феррита с увеличением скорости охлаждения постепенно меняется от равновесной до игольчатой, что приводит к снижению ударной вязкости до 11,1 Дж/см² (табл. 2, режимы № 1 и 3, рис. 5, а). Снижение температуры до 850 °С, 45 мин, $V_B = 5,5$ м/с (режим № 9) обеспечивает появление polygonального феррита и нижнего

бейнита, повышающего ударную вязкость до 51,4 Дж/см².

Механизм упрочнения стали 20ГФЛ связан с дисперсионным упрочнением. Выделение частиц (карбонитридных фаз) определяется диффузией не только углерода, но и легирующих элементов. Получение дисперсной структуры бейнита с высокими характеристиками сопротивления разрушения возможно в случае применения регулируемой термообработки при температуре ниже остановки рекристаллизации [15].

На основе анализа полученных данных разработана технология регулируемой термообработки стали 20ГФЛ (рис. 6), обеспечивающая формирование дополнительной структурной составляющей в виде нижнего бейнита с повышением ударной вязкости KCV⁻⁶⁰ не менее 30 Дж/см². Для массивных деталей формирование нижнего бейнита происходит за счет принудительного охлаждения до температуры 400...450 °С с дальнейшим самоотпуском на спокойном воздухе.

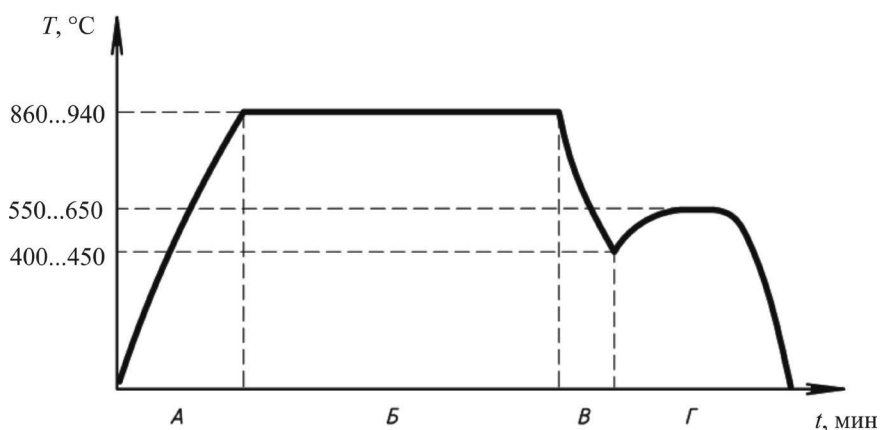


Рис. 6. Диаграмма регулируемой термообработки:
А, Б, В, Г – временной интервал, устанавливаемый экспериментальным путем в зависимости от конфигурации и массы изделия

Выводы

1. Выявленная перлитная оторочка, охрупчивающая сталь, отмечается на литой структуре с подобной конфигурацией, а также после термообработки с отпуском. Глубокое травление приводит к формированию структуры ячеистого перлита. Отмечено, что в образце с ударной вязкостью более 50 Дж/см² KCV⁻⁶⁰ имеются следы предположительно ячеистого перлита при твердости 180 НВ. В то же время детали боковых

рам, преждевременно вышедшие из строя по причине появления усталостных трещин, имели перлитную оторочку с ударной вязкостью не более 10 Дж/см^2 , что ниже установленных технических требований в два раза. Несмотря на то что ГОСТ 32400–2013 допускается перлитная оторочка, рекомендуется использовать такие режимы термообработки, которые устраняют сегрегацию химических элементов, дабы повысить эксплуатационные свойства материала.

2. Определены критические точки Ag_3 , Ag_1 охлаждения стали 20ГФЛ при термической обработке по 15 режимам, в результате установлены изменения интервалов диффузионного и сдвигового механизма превращения в зависимости от времени выдержки образцов в печи и температуры охлаждения.

3. Полученные новые механические свойства стали 20ГФЛ связаны с формированием дополнительной структурообразующей в виде нижнего бейнита, расположенного по границам перлитных областей.

4. Установлено, что твердость по Бринеллю ГОСТ 9012 по режимам № 1–8 соответствует 168...184 НВ, в случае 168 НВ – $11,1 \text{ Дж/см}^2$, 184 НВ – $16,7 \text{ Дж/см}^2$, 176 НВ – $30,8...38,5 \text{ Дж/см}^2$. По режимам № 9–15 изменялась и составляла 143...170 НВ, при этом минимальные значения твердости 143...156 соответствовали ударной вязкости $22...25,9 \text{ Дж/см}^2$.

5. Интервал образования бейнитной составляющей отмечен в точке 450°C при скорости охлаждения $2,2^\circ\text{C/с}$, что обеспечивает повышение ударной вязкости из-за изменения формы карбида с прямолинейной на глобулярную.

6. Разработанная технология регулируемой термообработки делает возможным формирование равновесной ферритно-перлитной структуры с включениями нижнего бейнита за счет принудительного охлаждения до температуры $400...450^\circ\text{C}$ с дальнейшим самоотпуском на спокойном воздухе, что ведет к повышению в стали 20ГФЛ ударной вязкости KCV^{60} не менее 30 Дж/см^2 .

7. Регулируемая термообработка создает условия для протекания произвольного охлаждения $550...600^\circ\text{C}$ по сложному циклу, ведущему к снижению внутренних напряжений, рекристаллизации и повышению механических свойств материала за счет самоотпуска массивной дета-

ли, что позволяет производить термообработку с наименьшими затратами.

8. Разработанная технология регулируемой термической обработки стали 20ГФЛ рекомендована для внедрения на предприятии ООО «АСЛЗ».

Список литературы

1. Одесский П.Д., Ведяков И.И. Ударная вязкость сталей для металлических конструкций. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 231 с. – ISBN 5895940919.
2. Пастухов М.И. Оценка несущей способности литых деталей тележек грузовых вагонов после длительной эксплуатации // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2005. – № 12. – С. 160–163.
3. Регулируемая термообработка для литых деталей тележки грузового вагона / Е.О. Чертовских, Д.А. Габец, А.М. Марков, А.В. Габец // Актуальные вопросы современной науки: сборник научных трудов. – Новосибирск: ЦРНС, 2015. – № 44/1. – С. 153–161.
4. Иванов И.И. Продукты превращений аустенита при непрерывном охлаждении [Электронный ресурс] // Все о металлургии: web-сайт. – URL: <http://metal-archive.ru/metallurgiya/761-produkty-prevrascheniya-austenita-pri-nepreryvnom-ohlazhdenii.html> (дата обращения: 25.05.2016).
5. Bhadeshia H.K.D.H. Nanostructured bainite // Proceedings of the Royal Society A. – 2010. – Vol. 466. – P. 3–18. – doi: 10.1098/rspa.2009.0407.
6. Gabarello F.G., Miller M.K., Garcia-Mateo C. Opening previously impossible avenues for phase transformation in innovative steels by atom probe tomography // Materials Science and Technology. – 2014. – Vol. 30, iss. 9. – P. 1034–1039. – doi: 10.1179/1743284714Y.00000000512.
7. Ahaneku I.E., Kamal A.R., Ogunjirin O.A. Effects of heat treatment in the properties of mild steel using different quenchants // Frontiers in Science. – 2012. – Vol. 2, N 6. – P. 153–158. – doi: 10.5923/j.fs.20120206.04.
8. Microstructures of mild steel spring after heat treatment / O.R. Adetunji, S.I. Kuye, M.J. Alao, B.M. Eng // The Pacific Journal of Science and Technology. – 2013. – Vol. 14, iss. 2. – P. 11–15.
9. Естифеев А.Д., Груздков А.А., Петров Ю.В. Зависимость перегиба скорости от температуры // Журнал технической физики. – 2013. – № (7). – С. 59–63.
10. Методика регулируемой термообработки литых деталей [Электронный ресурс] / Е.О. Чертовских, Д.А. Габец, А.М. Марков, А.В. Габец // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 3, № 4. – С. 48–52. – URL: <http://indust-engineering.ru/issues/2015/2015-4-8.pdf> (дата обращения: 25.05.2016).

11. Волченков Н.В., Мусеенков В.П., Сургаева Е.С. Стальное литье и методы повышения качества [Электронный ресурс] // Металлоснабжение и сбыт. – URL: <http://www.metalinfo.ru/ru/news/49443> (дата обращения: 20.05.2016).

12. Триботехнические свойства специального чугуна ЧМН-35М / Е.О. Чертовских, Д.А. Габец, В.В. Каргин, А.М. Марков, А.В. Габец // Инновации в машиностроении (ИнМаш–2015): VII Международная научно-практическая конференция: сборник трудов / Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева и др.; под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово, 2015. – С. 268–273.

13. Zur festigkeit niedriglegierter stähle mit erhöhtem kohlenstoffgehalt gegen abrasiven verschleiß / O. Hesse, J. Merker, M. Brykov, V. Efremenko // Tribologie und Schmierungstechnik. – 2013. – Vol. 60, N 6. – P. 37–43.

14. Effect of base metal composition on the toughness in the heat affected zone of DSAW-welded largediameter linepipes / C. Stallybrass, O. Dmitrieva, J. Schroder, A. Liessem // Proceedings of the 6th International Pipeline Technology Conference. – Ostend, 2013. – P. 26–29.

15. Габец А.В., Филиппов Г.А., Чертовских Е.О. Влияние режимов термообработки на кинетику превращения и ударную вязкость стали 20ГФЛ // Сталь. – 2015. – № 8. – С. 67–70.

OBRAHOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (71), April – June 2016, Pages 70–79

The formation of the bainite structure during heat treatment of the rail steel (analogue J13052)

Chertovskih E.O.¹, Technologist, e-mail: chertovskih13@gmail.com

Gabets A.V.¹, Ph.D. (Engineering), Development director, e-mail: gabets22@mail.ru

Gabets D.A.², Ph.D. student, e-mail: gabets22@mail.ru

Markov A.M.², D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: andmarkov@inbox.ru

Okolovich G.A.², D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: chertovskih13@gmail.com

Komarov P.N.³, Ph.D. student, e-mail: pasha-molotov@mail.ru

¹ Altai steel-casting factory, 116/52 Kalinina avenue, Barnaul, Altai region, 656037, Russian Federation

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

³ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The shortcomings of the existing normalization regime with annealing of the 1st kind of large-sized parts made of rail steel analogue J13052 are investigated. The increasing of toughness was obtained by controlled quenching air to the bainitic structure with the use of an orthogonal matrix of planning for 15 modes. Allowable hardness interval was determined to provide the value of shock viscosity no less than 20 J/cm². On the basis of statistical data and the series of experimental heat treatment processes, optimal interval of hardness 165...180 HB was defined. This interval of hardness provides desired impact strength characteristics. According to the method above, heat treatment modes on the planning matrix were established in laboratory conditions. Critical points of the cooling Ar₁ and Ar₃ were determined by the thermograms. Then obtained thermograms results are used to select the cooling mode of castings of different masses and sizes, by setting the temperature control sensors during the heat cycle. Due to the fact that the austenite transformation temperature range is influenced by heating, holding time and cooling air flow rate. While using controlled heat treatment in the production, correction of holding time and of cooling rate of bulk product is being adjusted to reach the predetermined interval of intermediate conversion. Regressive equalizations of polynomials of 2nd degree were expected for determination of the shock viscosity of KCV-60, hardness, microhardness of structural constituents as a ferrite, alloyed ferrite, pearlite. Applying of controlled cooling process includes controlled isothermal quenching with self-tempering, where pearlite transformation region is transferred to the low temperature interval. This transfer provides obtaining of maximal degree of grain refinement and getting of structural component in the form of bainite till 3% in ferrite-pearlite structure. The difficult cycle of heat treatment is offered for massive railway details with conservation of internal energy of founding for recrystallization.

Keywords

bainite, toughness, ferrite-pearlite structure, low carbon steel

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-70-79

References

1. Odesskii P.D., Vedyakov I.I. *Udarnaya vyazkost' stalei dlya metallicheskih konstruktii* [Impact strength steels for metal designs]. Moscow, Intermet Inzhiniring Publ., 2003. 231 p. ISBN 5895940919
2. Pastukhov M.I. Otsenka nesushchei sposobnosti litykh detalei telezhek gruzovykh vagonov posle dlitel'noi ekspluatatsii [Evaluation of the bearing capacity of cast parts of freight wagons bogies after prolonged use]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta – Herald of the Polotsk State University*, 2005, no. 12, pp. 160–163.
3. Chertovskikh E.O., Gabets D.A., Markov A.M., A.V. Gabets [Adjustable heat treatment for cast parts freight car truck]. *Aktual'nye voprosy sovremennoi nauki* [Actual problems of modern science], 2015, no. 44 (1), pp. 153–161.
4. Ivanov I.I. *Produkty prevrashchenii austenita pri nepreryvnom okhlazhdenii* [Products austenite under continuous cooling transformation]. Available at: <http://metal-archive.ru/metallurgiya/761-produkty-prevrascheniya-austenita-pri-epriyevnom-okhlazhdenii.html> (accessed 25.05.2016).
5. Bhadeshia H.K.D.H. Nanostructured bainite. *Proceedings of the Royal Society A*, 2010, vol. 466, pp. 3–18. doi: 10.1098/rspa.2009.0407
6. Gabarello F.G., Miller M.K., Garcia-Mateo C. Opening previously impossible avenues for phase transformation in innovative steels by atom probe tomography. *Materials Science and Technology*, 2014, vol. 30, iss. 9, pp. 1034–1039. doi: 10.1179/1743284714Y.00000000512
7. Ahaneku I.E., Kamal A.R., Ogunjirin O.A Effects of heat treatment in the properties of mild steel using different quenchants. *Frontiers in Science*, 2012, vol. 2, no. 6, pp. 153–158. doi: 10.5923/j.fs.20120206.04
8. Adetunji O.R., Kuye S.I., Alao M.J., Eng B.M. Microstructures of mild steel spring after heat treatment. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 2013, vol. 14, iss. 2, pp. 11–15.
9. Estifeev A.D., Gruzdkov A.A., Petrov Yu.V. Zavisimost' peregibov skorosti ot temperatury [Temperature-speed dependence of fracture type]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2013, iss. 7, pp. 59–63.
10. Chertovskikh E.O., Gabets D.A., Markov A.M., Gabets A.V. Metodika reguliruemoi termoobrabotki litykh detalei [Method of adjustable heat treatment molded pieces]. *Mashinostroenie: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal – Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 48–52. Available at: <http://indust-engineering.ru/issues/2015/2015-4-8.pdf> (accessed 25.05.2016)
11. Volchenkov N.V., Moiseenkov V.P., Surgaeva E.S. *Stal'noe lit'e i metody povysheniya kachestva* [Metal supply and sales]. Available at: <http://www.metalinfo.ru/ru/news/49443> (accessed 20.05.2016)
12. Chertovskikh E.O., Gabets D.A., Kargin V.V., Markov A.M., Gabets A.V. [Tribological properties of special cast CHMN-35M]. *Innovatsii v mashinostroenii (InMash-2015): VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: sbornik trudov* [Innovations in mechanical engineering: VII International scientific and practical conference: Materials]. Kemerovo, 2015, pp. 268–273. (In Russian)
13. Hesse O., Merker J., Brykov M., Efremenko V. Zur festigkeit niedriglegierter stähle mit erhöhtem kohlenstoffgehalt gegen abrasiven verschleiß [Abrasive wear resistance of high-carbon low-alloy steels]. *Tribologie und Schmierungstechnik*, 2013, vol. 60, no. 6, pp. 37–43.
14. Stallybrass C., Dmitrieva O., Schroder J., Liessem A. Effect of base metal composition on the toughness in the heat affected zone of DSAW-welded large diameter line pipes. *Proceedings of the 6th International Pipeline Technology Conference*, Ostend, 2013, pp. 26–29.
15. Gabets A.V., Filippov G.A., Chertovskikh E.O. Vliyanie rezhimov termoobrabotki na kinetiku prevrashcheniya i udarnuyu vyazkost' stali 20GFL [Effect of heat treatment regimes on the kinetics of transformation and the toughness of the steel 20GFL]. *Stal' – Steel in Translation*, 2015, no. 8, pp. 67–70. (In Russian)

Article history:

Received 22 February 2016

Revised 29 April 2016

Accepted 15 May 2016

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НАСЫЩАЮЩИХ ПОРОШКОВЫХ СРЕД НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ДИФфуЗИОННЫХ КАРБИДНЫХ СЛОЕВ

В.А. БУТУХАНОВ, инженер

*Б.Д. ЛЫГДЕНОВ, доктор техн. наук, доцент
(ВСГУТУ, г. Улан-Удэ)*

Поступила 25 апреля 2016

Рецензирование 10 мая 2016

Принята к печати 15 мая 2016

Бутуханов В.А. – 670013, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40 В,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
e-mail: butuhanov_vyacheslav@mail.ru

Выполнена оптимизация составов насыщающих смесей в системе Cr-V по износостойкости при трении скольжения без смазки диффузионных карбидных слоев, полученных на стали У7 методом химико-термической обработки. Математическое моделирование позволило сократить число опытов и определить оптимальный состав двухкомпонентной смеси для обеспечения максимальной износостойкости. Проведены исследования структуры и свойств диффузионных слоев методами металлографического, дюрометрического и микрорентгеноспектрального анализов. Установлено, что при одновременном насыщении в порошках ферросплавов формируются диффузионные слои на основе карбидов ванадия и карбидов хрома. Показано, что двухкомпонентные слои превосходят однокомпонентные по износостойкости. При насыщении стали У7 в составе, содержащем 76 % феррованадия и 24 % феррохрома, износостойкость при трении скольжения без смазки в 22,4 раза превышает износостойкость образцов после закалки и низкого отпуска. Установлено, что повышение уровня износостойкости обусловлено увеличением твердости диффузионного слоя до значения 25 ГПа и наличием карбидной фазы типа VC.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, диффузионные слои, планирование эксперимента, рентгеноспектральный анализ, износостойкость, микротвердость.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-80-86

Введение

Для повышения износостойкости стальных изделий широкое применение нашли карбидные слои. Карбиды сочетают в себе высокие физико-химические и механические свойства [1]. Анализ литературных данных о нанесении карбидных покрытий на поверхность сталей и твердых сплавов показал возможность получения износостойких слоев с помощью различных технологий (химико-термическая обработка, PVD, CVD, электронно-лучевая обработка) [2–7]. Метод химико-термической обработки (ХТО) выбран авторами в связи с простотой применяемого технологического оборудования. Одним

из преимуществ метода ХТО является высокая адгезия в результате взаимной диффузии компонентов. Известно, что особенно высокими показателями механических свойств обладают многокомпонентные диффузионные слои [8, 9]. Экстремум свойств достигается в сложных карбидных системах, образованных при наличии взаимной растворимости карбидов. Оптимизация по твердости и износостойкости процесса диффузионного насыщения высокоуглеродистой стали хромом, ванадием, марганцем на основе порошков оксидов соответствующих металлов выполнялась автором работы [10]. Специальную насыщающую смесь получали методом СВС путем восстановления оксида алюминия.

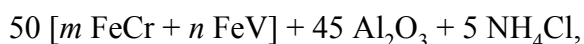
В результате исследований установлено повышение стойкости при абразивном изнашивании до 40,5 раз по сравнению с образцом без ХТО. Применение оксидов предполагает их предварительную подготовку (нагрев смеси с целью восстановления) [11]. При использовании в качестве насыщающих сред порошков ферросплавов с грануляцией 0,4 мм подобная предварительная подготовка исключается.

Цель настоящей работы состоит в исследовании структуры и свойств диффузионных слоев после насыщения в смесях с различным соотношением феррохрома и феррованадия.

Материалы и методы

Химико-термическую обработку осуществляли в контейнерах с плавким затвором при 1000 °С в течение 6 ч в муфельной электропечи.

Насыщающие смеси имели общий состав:



где m и n – соотношения порошков феррохрома и феррованадия. Указанные соотношения и соответствующие им составы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номер состава	FeCr, %	FeV, %
1	100	0
2	75	25
3	50	50
4	25	75
5	0	100

Оксид алюминия предотвращал спекание частиц порошков и прилипание их к поверхности образцов. Хлористый аммоний, разлагаясь и взаимодействуя с активными атомами насыщающих элементов, генерировал активную газовую среду.

Оптимизацию составов насыщающих смесей по износостойкости осуществляли методом симплекс-планирования [12, 13] по пяти экспериментальным опытам.

Испытания на износостойкость карбидных слоев в условиях трения скольжения без смазки по схеме «диск-плоскость» проводили на машине трения типа Амслера при нагрузке 500 Н и 300 об/мин в течение 30 мин. Показатель отно-

сительной износостойкости $K_{\text{и}}$ рассчитывали по формуле

$$K_{\text{и}} = \frac{\Delta m_{\text{э}}}{\Delta m_{\text{и}}},$$

где $\Delta m_{\text{э}}$ – потеря массы эталона; $\Delta m_{\text{и}}$ – потеря массы образца. В качестве эталона использовали образцы стали У7 после закалки и низкого отпуска (HRC 58-60). Потерю массы определяли на аналитических весах WA-31.

Микроструктуру диффузионных слоев исследовали на оптическом микроскопе «Neophot-21». В связи с толщиной диффузионных слоев, не превышающей 20 мкм, для определения микротвердости изготавливали косые шлифы. Микротвердость определяли на приборе ПМТ-3М при нагрузке 0,5 Н. Микрорентгеноспектральный анализ проводили в Центре коллективного пользования «Прогресс» на растровом электронном микроскопе JSM-6510 LV JEOL с системой микроанализа INCA Energy 350.

Результаты и обсуждение

Параметром оптимизации y являлась износостойкость в условиях трения скольжения без смазки. Математическое моделирование составов подробно описано в работе [14]. Получено уравнение

$$y = 19,36 + 4,74x - 0,81x^2 - 0,94x^3 = f(X_1).$$

Адекватность уравнения экспериментальным данным проверяли по критерию Фишера. Подставив в уравнение безразмерные величины $X_{1\text{и}}$, рассчитали величины $\hat{y}_{\text{и расч}}$ и невязки $\Delta_{\text{и}}$ (табл. 2).

Зависимость показателя относительной износостойкости (в условиях трения скольжения без смазки) от состава насыщающей смеси представлена на рис. 1.

Оптимальный состав двухкомпонентной смеси с максимальной износостойкостью ($K_{\text{и}} = 22,4$ ед.) определили из полученного уравнения: $x_{1\text{опт}} = 0,76$, т. е. 76 % феррованадия; $x_{2\text{опт}} = 0,24$, или 24 % феррохрома. Таким образом, состав № 4 наиболее близок к оптимальному составу, рассчитанному методом симплекс-планирования и обеспечивающему максимальную износостойкость в условиях трения скольжения без смазки.

Таблица 2

№ п/п	V, %	$x_{1и}$	$X_{1и}$	Cr, %	$x_{2и}$	$\bar{y}_{и\text{ эксп}}$, ед	$\hat{y}_{и\text{ расч}}$, ед	$\Delta_{и}$, ед
1	0	0,0	-2	100	1,0	14,2	14,1	-0,1
2	25	0,25	-1	75	0,75	14,6	14,7	0,1
3	50	0,50	0	50	0,50	19,6	19,3	-0,3
4	75	0,75	1	25	0,25	22,2	22,3	0,1
5	100	1,00	2	0	0,0	18,1	18	-0,1

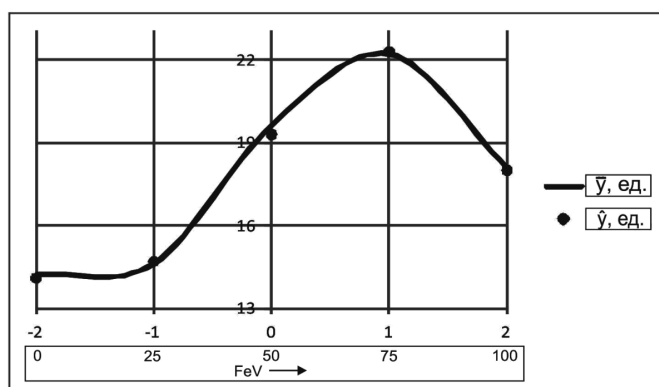


Рис. 1. Зависимость показателя относительной износостойкости от состава насыщающей смеси

Формирование карбидного слоя происходит вследствие двух одновременно протекающих процессов: транспортировки атомов насыщающих элементов к поверхности образца и диффузии атомов углерода из сердцевины к поверхности. Таким образом, под карбидными слоями наблюдаются плохо травящиеся обезуглероженные зоны. Анализ диаграмм состояния систем Fe-C-Me позволяет сделать вывод, что образующиеся переходные зоны представляют собой эвтектоид, состоящий из твердого раствора V, Cr в α -железе. Микротвердость переходной зоны сразу за границей раздела со слоем на основе карбидов хрома и ванадия составляет 4 ГПа.

Эксплуатационные свойства карбидных слоев зависят не только от состава, но и от содержания и распределения углерода и легирующих элементов. Данные о распределении элементов по толщине слоев представляют интерес, так как позволяют делать выводы о процессах диффузии элементов в слое.

Для всех полученных слоев характерно, что на границе раздела карбидный слой – матрица насыщаемой стали концентрация карбидообразующего элемента резко снижается, плавно уменьшаясь по толщине переходной зоны.

При насыщении стали У7 в составе № 1 формируется хромированный слой, содержащий карбидные фазы типа $(Cr,Fe)_7C_3$ и $(Cr,Fe)_{23}C_6$ [15] с микротвердостью 16...18 ГПа. Одновременное насыщение двумя карбидообразующими элементами состава № 2 (рис. 2) приводит к формированию слоя с двумя участками: на основе карбида хрома на внешней стороне слоя и карбида ванадия, расположенного возле границы слой-основа. Такое распределение элементов в диффузионном слое обусловлено тем, что ванадий является более сильным карбидообразующим элементом. В карбиде хрома микротвердостью 18 ГПа растворено железо матрицы (≈ 28 вес.%) и ванадий (≈ 6 вес. %). Микрорентгеноспектральный

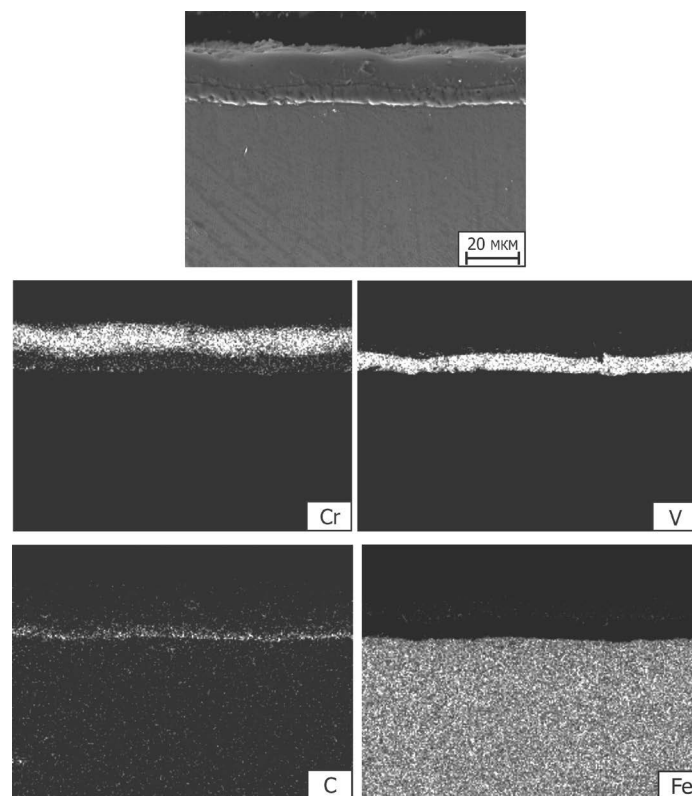


Рис. 2. Распределение элементов по площади шлифа на стали У7 после насыщения в смеси состава № 2 (в характеристическом излучении хрома, ванадия, углерода, железа)

анализ зафиксировал в карбиде ванадия присутствие хрома в количестве ≈ 8 вес. %. Данное содержание хрома приводит к снижению микротвердости карбида ванадия до значения 16 ГПа. Износостойкость образцов после насыщения в данном составе незначительно превышает износостойкость образцов после хромирования в составе № 1.

После обработки в составе № 3 происходит увеличение толщины участка карбида ванадия по сравнению с составом № 2. Диффузионный слой состоит из участка карбида ванадия и тонкой кромки карбида хрома на внешней стороне. Увеличение составляющей карбида ванадия приводит к повышению износостойкости.

При насыщении в составе № 4 (рис. 3), показавшем близкие к максимальным значения износостойкости, формируется диффузионный слой на основе карбида ванадия, легированный хромом в количестве ≈ 3 вес. %. Микрорентгеноспектральный анализ показал, что содержание ванадия соответствует карбиду типа VC. Микротвердость составляет 25 ГПа.

При насыщении в составе № 5 (рис. 4) диффузионный слой имеет двухслойную структуру.

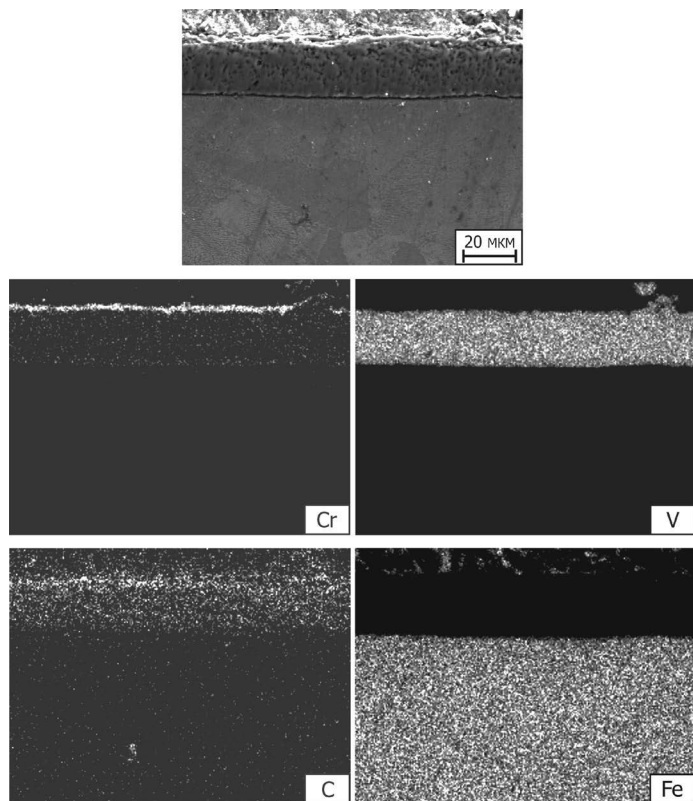


Рис. 3. Распределение элементов по площади шлифа на стали У7 после насыщения в смеси состава № 4 (в характеристическом излучении хрома, ванадия, углерода, железа)

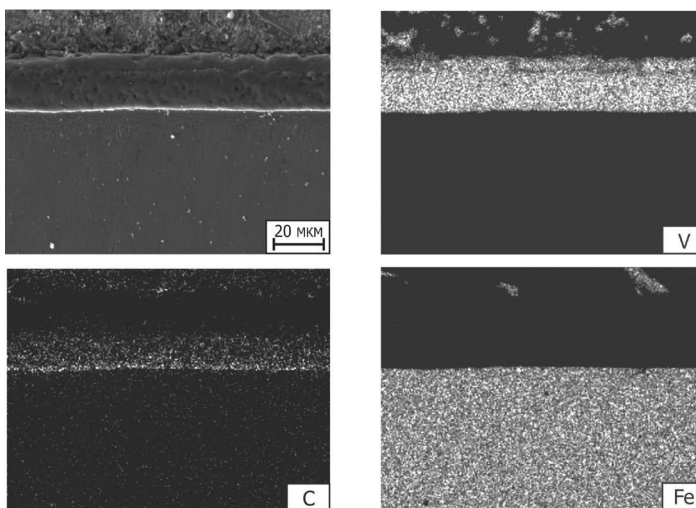


Рис. 4. Распределение элементов по площади шлифа на стали У7 после насыщения в смеси состава № 5 (в характеристическом излучении ванадия, углерода, железа)

Согласно фазовой диаграмме ванадий образует с углеродом два карбида: VC и V_2C . Микротвердость полукарбида ванадия, сформированного на наружной стороне слоя, составляет 20 ГПа, а микротвердость монокарбида, находящегося под ним – 27 ГПа. Наличие полукарбида ванадия с пониженной микротвердостью приводит к снижению износостойкости слоя. Отрицательную роль играет слишком высокая микротвердость монокарбида ванадия, приводящая к выкрашиванию слоя.

Выводы

Проведены процессы диффузионного насыщения стали У7 в порошках ферросплавов при их различных соотношениях. С помощью метода симплекс-планирования выявлена область оптимальных составов порошковой среды с соотношением 24...25 % феррохрома и 75...76 % феррованадия, ХТО в которой повышает износостойкость при трении скольжения без смазки стали У7 в 22,2...22,4 раза по сравнению с состоянием после закалки и низкого отпуска. Установлено, что оптимизированный слой состоит из легированного хромом карбида VC с микротвердостью 25 ГПа. Повышение износостойкости в условиях трения скольжения без смазки многокомпонентных карбидных слоев обусловлено преобладанием в диффузионном слое карбидов ванадия с высокой микротвердостью. Снижение уровня микро-

твердости по сравнению с однокомпонентным насыщением ванадием (27 ГПа) оказывает благоприятное воздействие на уровень износостойкости. Это обусловлено тем, что высокотвердая фаза под действием истирающей нагрузки выкрашивается.

Список литературы

1. Самсонов Г.В., Упадхья Г.Ш., Нешпор В.С. Физическое материаловедение карбидов. – Киев: Наукова думка, 1974. – 456 с.
2. Comparison of mechanical properties of boronized and vanadium carbide coated AISI 1040 steels / A. Calik, F. Taylan, O. Sahin, N. Ucaf // *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. – 2009. – Vol. 16. – P. 326–330.
3. Surface modification of the X40CrMoV5-1 steel by laser alloying and PVD coatings deposition / L.A. Dobrzanski, E. Jonda, K. Lukaszewicz, K. Labisz, A. Klimpel // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2008. – Vol. 27, iss. 2. – P. 179–182.
4. Dobrzanski L.A., Jonda E., Labisz K. Structure and properties of surface layer of hot-work tool steels alloyed using high power diode laser // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2009. – Vol. 37, iss. 2. – P. 617–621.
5. Electrolytic plasma processing for cleaning and metal-coating of steel surfaces / E.I. Meletis, X. Nie, F.L. Wang, J.C. Jiang // *Surface and Coatings Technology*. – 2002. – Vol. 150, iss. 2–3. – P. 246–256. – doi: 10.1016/S0257-8972(01)01521-3.
6. Electron-beam boriding of low-carbon steel / A.A. Novakova, I.G. Sizov, D.S. Golubok, T.Yu. Kiseleva, P.O. Revokatov // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2004. – Vol. 383. – P. 108–112. – doi: 10.1016/j.jallcom.2004.04.017.
7. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovski, D.S. Krivizhenko, A.A. Losinskaya, O.G. Lenivtseva // *Applied Surface Science*. – 2013. – Vol. 284. – P. 472–481. – doi: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121.
8. Ворошин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А. Теория и технология химико-термической обработки. – Минск: Новое знание, 2010. – 304 с.
9. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Власова О.А. Интенсификация процессов химико-термической обработки металлов // *Фундаментальные исследования*. – 2008. – № 8. – С. 48–50.
10. Шматов А.А. Моделирование процесса формирования карбидного слоя при диффузионном хромо-ванадировании стали У8 // *Вестник Полоцкого государственного университета*. – 2011. – № 11: Серия В: Промышленность. Прикладные науки. – С. 113–123.
11. Исследование процесса диффузионного насыщения в смеси, содержащей оксид ванадия и алюминий / В.А. Бутуханов, А.Д. Грешилов, Б.Д. Лыгденов, О. Галаа // *Ползуновский вестник*. – 2012. – № 1-1. – С. 51–55.
12. Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении. – М.: МИСиС, 1970. – 106 с.
13. Грачев Ю.П., Плаксин Ю.М. Математические методы планирования эксперимента. – М.: ДеЛи, 2005. – 296 с. – ISBN 5-94343-096-2.
14. Бутуханов В.А., Лыгденов Б.Д. Диффузионные карбидные покрытия на стали У8А // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2016. – № 3. – С. 414–418.
15. Диффузионные карбидные покрытия / В.Ф. Локутов, В.Г. Хижняк, Ю.А. Куницкий, М.В. Киндарчук. – Киев: Техніка, 1991. – 168 с.

OBRAOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (71), April – June 2016, Pages 80–86

The effect of powder mixtures composition on the structure and properties of carbide diffusion layers

Butukhanov V.A., Engineer, e-mail: butuhanov_vyacheslav@mail.ru

Lygdenov B.D., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: lygdenov59@mail.ru

East Siberia State University of Technology and Management, 40V Klyuchevskaya st., Ulan-Ude, 670013, Russian Federation

Abstract

Thick-walled cylinders ($D/d \geq 2$) constitute a large group of parts with precise small diameter holes ($d = 1 \dots 10$ mm). Improvement of surface finish and accuracy of small diameter holes is an actual task and requires the development of new methods of processing and cold expansion is one of the most effective methods of finishing and hardening of holes in such parts. Along with high productivity, cold expansion helps to increase accuracy, improve surface roughness, considerably work-harden surface layer and generate favorable compressive residual stresses. However, residual stresses generated during cold expansion of parts such as thick-walled cylinders can be undesirably high in some cases.

It is supposed that in order to maintain high accuracy of holes and to reduce residual stresses after cold expansion of thick-walled cylinders, which undergo throughout plastic deformations, it is needed to perform axial plastic compression with subsequent cold expansion with small interferences. To test the hypothesis, the accuracy of holes as well as hoop, radial and axial residual stresses in cylinders made of steel grade 50 (0,5 % C, HB 2170...2290 MPa) with hole diameter $d = 5$ mm, outer diameter $D = 15$ and length $L = 30$ mm by Sachs method is studied. It is found that double-cycle cold expansion with total interference $a_{\Sigma}/d = 5,1$ % generates hoop residual stresses with largest absolute value equal to 284 MPa, which, after plastic compression with strain $\Delta L/L$ equal to 0.5% and 1% and single-cycle cold expansion with interference $a/d = 0,9$ %, changed to 177 MPa. It is shown that high hole accuracy (IT7) achieved through double-cycle expansion remained at the same high level after plastic compression and single-cycle expansion.

Keywords

thick-walled cylinders, cold expansion, plastic compression, residual stresses

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-80-86

References

1. Samsonov G.V., Upadkhaya G.Sh., Neshpor V.S. *Fizicheskoe materialovedenie karbidov* [Physical materials science of carbides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1974. 456 p.
2. Calik A., Taylan F., Sahin O., Ucaf N. Comparison of mechanical properties of boronized and vanadium carbide coated AISI 1040 steels. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2009, vol. 16, pp. 326–330.
3. Dobrzanski L.A., Jonda E., Lukaszewicz K., Labisz K., Klimpel A. Surface modification of the X40CrMoV5-1 steel by laser alloying and PVD coatings deposition. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2008, vol. 27, iss. 2, pp. 179–182.
4. Dobrzanski L.A., Jonda E., Labisz K. Structure and properties of surface layer of hot-work tool steels alloyed using high power diode laser. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2009, vol. 37, iss. 2, pp. 617–621.
5. Meletis E.I., Nie X., Wang F.L., Jiang J.C. Electrolytic plasma processing for cleaning and metal-coating of steel surfaces. *Surface and Coatings Technology*, 2002, vol. 150, iss. 2–3, pp. 246–256. doi: 10.1016/S0257-8972(01)01521-3
6. Novakova A.A., Sizov I.G., Golubok D.S., Kiseleva T.Yu., Revokatov P.O. Electron-beam boriding of low-carbon steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, vol. 383, pp. 108–112. doi: 10.1016/j.jallcom.2004.04.017
7. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovski M.G., Krivizhenko D.S., Losinskaya A.A., Lenitseva O.G. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 284, pp. 472–481. doi: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121
8. Voroshnin L.G., Mendeleva O.L., Smetkin V.A. *Teoriya i tekhnologiya khimiko-termicheskoi obrabotki* [Theory and technology of chemical-thermal treatment]. Minsk, Novoe znanie Publ., 2010. 304 p.
9. Gur'ev A.M., Lygdenov B.D., Vlasova O.A. Intensifikatsiya protsessov khimiko-termicheskoi obrabotki metallov [Intensification of metals thermochemical treatment]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental Research*, 2008, no. 8, pp. 48–50.
10. Shmatov A.A. Modelirovanie protsessa formirovaniya karbidnogo sloya pri diffuzionnom khromovanadirovani stali U8 [Process modulation of forming diffusion Cr-V carbide coating on steel U8]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B: Promyshlennost'. Prikladnye nauki – Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Sciences*, 2011, no. 11, pp. 113–123. (In Russian)
11. Butukhanov V.A., Greshilov A.D., Lygdenov B.D., Galaa O. Issledovanie protsessa diffuzionnogo nasyshcheniya v smesi, sodержashchei oksid vanadiya i alyuminii [Study of diffusion saturation in a mixture of vanadium oxide and aluminum]. *Polzunovskii vestnik – Polzunov Bulletin*, 2012, no. 1-1, pp. 51–55.

12. Novik F.S. *Matematicheskie metody planirovaniya eksperimentov v metallovedenii* [Mathematical methods for design of experiments in metal science]. Moscow, Moscow Institute of Steel and Alloys Publ., 1970. 106 p.
13. Grachev Yu.P., Plaksin Yu.M. *Matematicheskie metody planirovaniya eksperimenta* [Mathematical methods of design of experiment]. Moscow, DeLi Publ., 2005. 296 p. ISBN 5-94343-096-2
14. Butukhanov V.A., Lygdenov B.D. Diffuzionnye karbidnye pokrytiya na stali U8A [Diffusion carbide coatings on steel with 0,8 percent of carbon]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2016, no. 3, pp. 414–418.
15. Loskutov V.F., Khizhnyak V.G., Kunitskii Yu.A., Kindarchuk M.V. *Diffuzionnye karbidnye pokrytiya* [Diffusion carbide coatings]. Kiev, Tehnika Publ., 1991. 168 p.

Article history:

Received 25 April 2016

Revised 10 May 2016

Accepted 15 May 2016

ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ СПЛАВОВ Al–Cu ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА И ТЕРМООБРАБОТКИ

*В.К. АФАНАСЬЕВ, доктор техн. наук, профессор
М.А. МАЛЮХ, младший научный сотрудник УНИ
М.В. ПОПОВА, доктор техн. наук, профессор
В.А. ЛЕЙС, младший научный сотрудник УНИ
С.В. ДОЛГОВА, младший научный сотрудник УНИ
(СибГИУ, г. Новокузнецк)*

Поступила 4 апреля 2016
Рецензирование 4 мая 2016
Принята к печати 15 мая 2016

Афанасьев В.К. – 654007, Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: sv_dolgov@mail.ru

Изучены закономерности теплового расширения сплавов системы Al – Cu в литом и деформированном состояниях в зависимости от обработки расплава и термической обработки. Применяемая обработка расплава заключается в продувке водяным паром. Установлено, что выбранная обработка расплава создает аномалии, которые выражаются в уменьшении теплового расширения изучаемых сплавов. Дальнейшая термическая обработка приводит к развитию аномалий. Показано, что горячая пластическая деформация существенно влияет на температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР, α) алюминиево-медных сплавов, причем это влияние усиливается с увеличением содержания меди. Рассмотрены возможности применения обнаруженных закономерностей для создания будущих новых инварных сплавов, отличающихся малым удельным весом и меньшей стоимостью.

Ключевые слова: температурный коэффициент линейного расширения, сплавы Al – Cu, инвар, обработка расплава, термическая обработка, аномалия ТКЛР.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-87-94

Введение

Важнейшее место в деятельности человека на Земле отведено метрологии. В ней главное внимание уделяется материалам приборной техники, особое положение среди которых занимают металлы и сплавы с регулируемым ТКЛР [1, 2].

В 1920 году Ш. Гильом получил Нобелевскую премию по физике «за создание железоникелевых сплавов для метрологических целей» [3]. Разработанные им сплавы на основе Fe-Ni получили название «инвары». До сих пор в приборной технике используется его сплав Н36, который при температурах испытания ($t_{\text{исп}}$) 50...100 °С после сложной деформации и тер-

мической обработки имеет $\alpha = 1...2 \cdot 10^{-6}$, град⁻¹ [4, 5].

До настоящего времени проводится гигантское количество работ по выяснению инварного эффекта с привлечением легирования железоникелевой основы всеми доступными элементами периодической системы, включая драгоценные (Pt, Pd). Однако секрет инварного эффекта до сих пор не выяснен.

Настоящая работа является разделом общего направления – поиска легких сплавов для космической техники с таким же низким ТКЛР [6], как у тяжелых железоникелевых инваров.

Ранее [7] изучалось влияние меди на линейное расширение алюминия А7. На основании полученных результатов сделан вывод, что «вполне

приемлемым может быть применение меди для получения легких сплавов с контролируемым тепловым расширением». Введение меди в алюминий А7 в количестве 4...20 % создает аномалию линейного расширения с максимумом при $t_{\text{исп}} = 300^\circ\text{C}$ (рис. 1). После резкого повышения значений ТКЛР при $t_{\text{исп}} = 400...450^\circ\text{C}$ происходит плавное уменьшение его до значений, близких к исходному. Большие добавки меди (30, 40 и 50 %) аномалию ТКЛР не создают, но снижают ТКЛР во всем температурном интервале испытания, что согласуется с результатами, полученными на алюминиевокремниевых и кремниевых сплавах [8, 9]. Здесь следует отметить очень важное обстоятельство, что высоколегированный алюминий с кремнием и алюминий с медью (30, 40, 50 % легирующей добавки) отличаются высокой хрупкостью [10–12]. Естественно, что это затрудняет применение их для создания деформируемых сплавов для космических аппаратов [13, 14].

В связи с этим цель настоящей работы – исследование возможности уменьшения ТКЛР

сплавов алюминия с 4...20 % Cu в литом и деформированном состояниях за счет обработки расплава и последующей термической обработки.

Обработка расплава заключалась в продувке его водяным паром в течение 30 мин при $730...750^\circ\text{C}$. Водяной пар был выбран как вещество, легко разлагающееся на поверхности жидкого металла и способное существенным образом изменять наводороженность конечного сплава, т. е. изменять соотношение водорода нейтрального и ионизованного ($\text{H}^\pm$, H^+ и H^-) [15].

Методика экспериментальных исследований

Для исследования осуществляли выплавку сплавов в закрытой лабораторной печи сопротивления в алундовом тигле. После расплавления алюминия А7 вводили медь М1. В ходе экспериментов варьировали количество компонентов. Приготовление сплавов осуществляли по методике [16]. Деформацию проводили на лабораторном прокатном стане [17]. Из полученных слитков изготавливали образцы для dilatометрического исследования. ТКЛР определяли с помощью дифференциального оптического фоторегистрирующего dilatометра системы Шевенара в интервале температур испытания $50...450^\circ\text{C}$, погрешность определения составляла $\pm 0,16 \cdot 10^{-6}, \text{град}^{-1}$.

Термическая обработка проводилась при температуре 450 и $510...520^\circ\text{C}$ в течение $1...12$ ч с последующим охлаждением в воде (закалка). В некоторых случаях проводилась закалка с последующим старением.

Результаты и обсуждение

Обработка расплава. Продувка расплава водяным паром значительно снижает ТКЛР при $t_{\text{исп}} = 50...200^\circ\text{C}$, усиливает первую аномалию при 300°C и вторую при 400°C (рис. 2). Это действие обработки расплава наиболее ярко наблюдается для сплава $\text{Al} - 10\% \text{Cu}$. Сплав $\text{Al} - 4\% \text{Cu}$ (основа промышленных дуралюминов) при обычном приготовлении не имеет второй аномалии ($t_{\text{исп}} = 400^\circ\text{C}$). Продувка его расплава водяным паром создает аномалию при этой температуре испытания, что дает основание считать

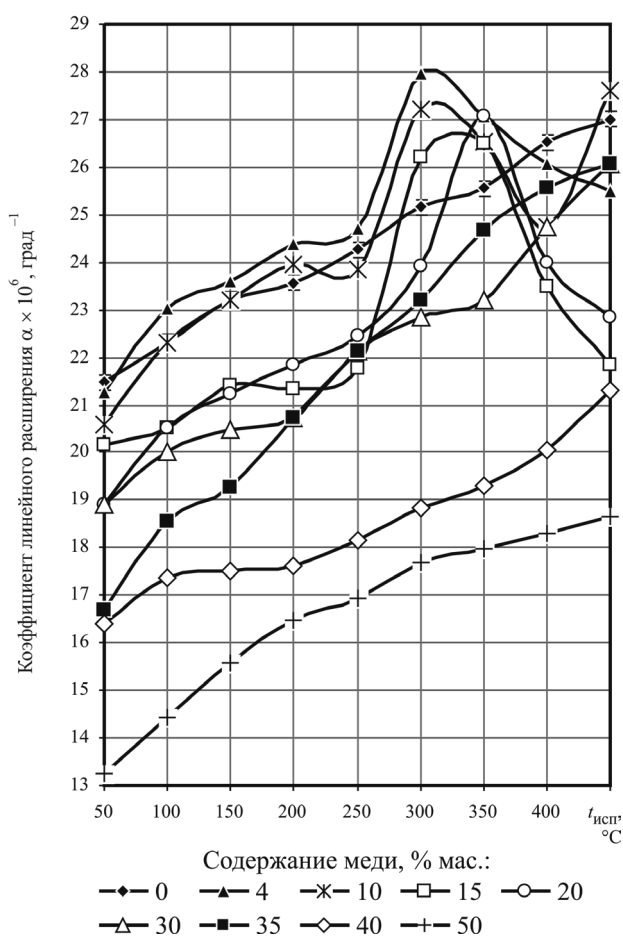


Рис. 1. Линейное расширение сплавов алюминия с медью

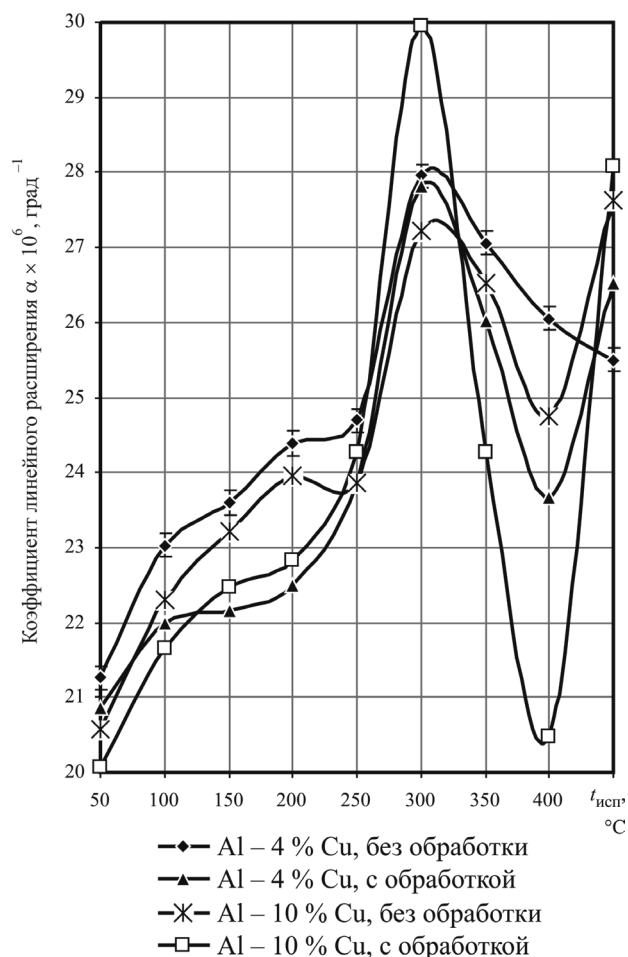


Рис. 2. Влияние обработки расплава водяным паром ($\tau = 30$ мин) на линейное расширение сплавов Al–Cu

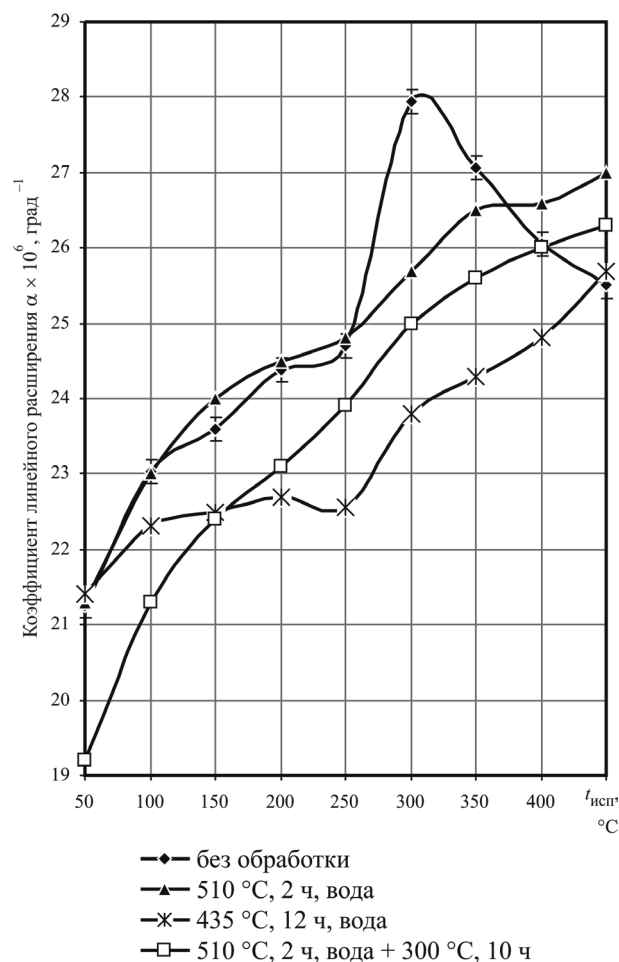


Рис. 3а. Влияние термической обработки на линейное расширение сплава Al – 4 % Cu (обычного приготовления)

ее ответственной за резкое уменьшение расширения при 400 °C (вторая аномалия).

Значительное влияние на развитие аномалии оказывает термическая обработка. Установлено, что нагревы выше температуры начала удаления водорода из металлических сплавов (280...300 °C) уменьшают или полностью устраняют аномалию [18–20]. Например, на рис. 3а показано, что закалка сплава Al – 4 % Cu с температур 450 и 510 °C после нагрева в течение 12 и 2 ч соответственно подавляет образование аномалии. Причем более эффективно действует длительный нагрев в течение 12 ч при 450 °C, а не обычно рекомендуемый для закалки – при 510 °C. Старение при 300 °C в течение 10 ч снижает ТКЛР во всем температурном интервале испытаний, а также устраняет аномалию при 300 °C. Отмечено, что самым эффективным нагревом, подавляющим образование аномалии, является длительный нагрев при температуре этой же аномалии. Сделан очень важный вывод,

что чем выше значения ТКЛР при $t_{\text{исп}} = 300$ °C, тем сильнее его снижение после длительного нагрева при 300 °C. В заключение следует отметить, что наиболее эффективными температурами нагрева, устраняющими образование аномалии, являются температуры 435 и 300 °C.

На рис. 3б показано влияние закалки и старения при 100 и 250 °C. Наиболее важно здесь то, что обработка расплава водяным паром и последующая закалка (без старения) повышают ТКЛР при $t_{\text{исп}} = 50...250$ °C и усиливают обе аномалии.

Первая аномалия, заключающаяся в резком увеличении расширения при 250...350 °C, и вторая аномалия – резкое уменьшение расширения при $t_{\text{исп}} = 400$ °C – свидетельствуют о развитии процессов, управляющих общей величиной ТКЛР.

На рис. 4 показано, что высокотемпературный нагрев сплава Al – 10 % Cu, продутого в расплавленном состоянии водяным паром, еще более четко выражает наличие первой и второй

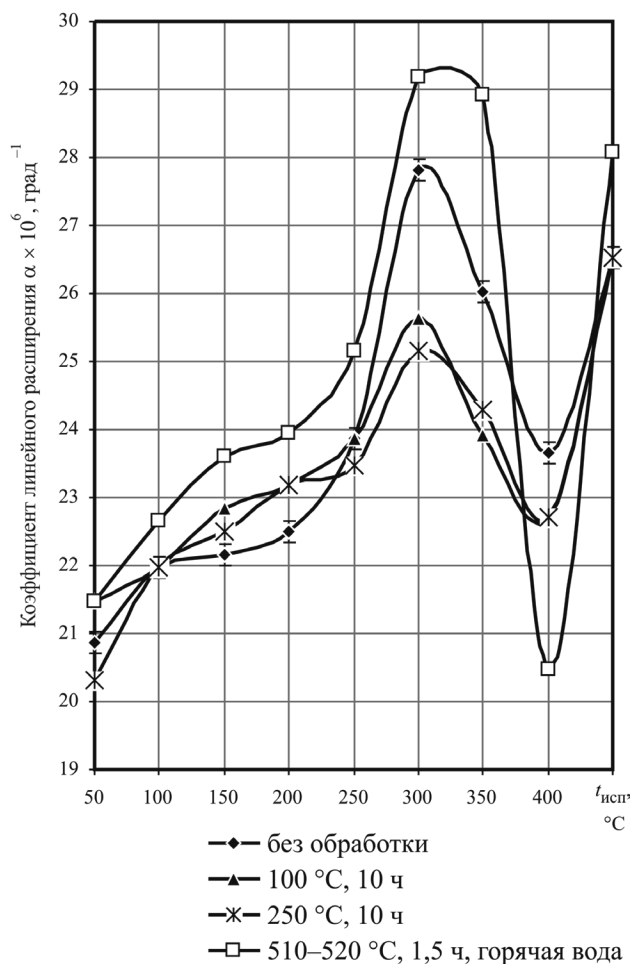


Рис. 3б. Влияние термической обработки на линейное расширение сплава Al – 4 % Cu (продувка расплава водяным паром, 30 мин)

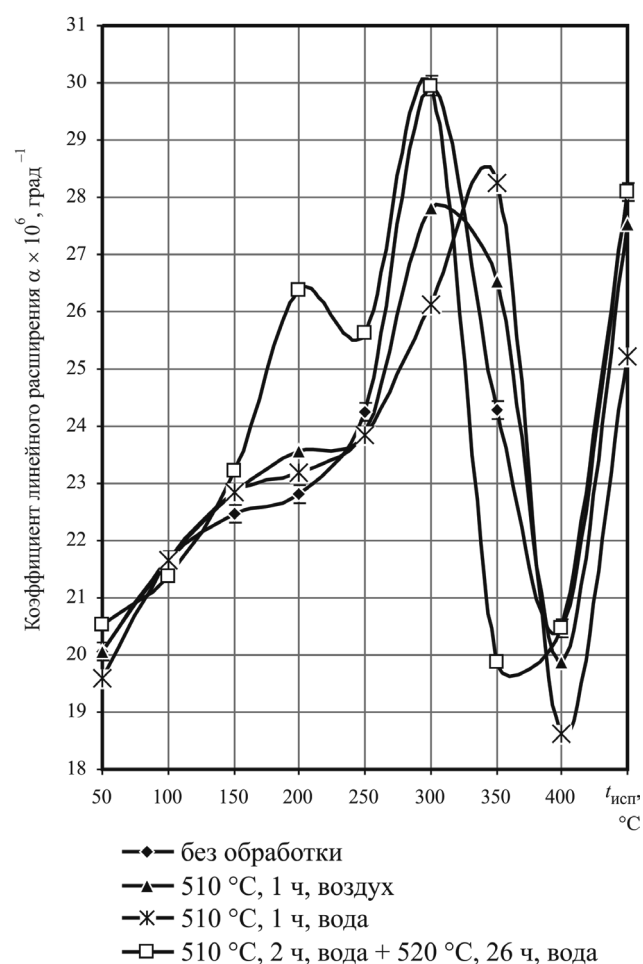


Рис. 4. Влияние термической обработки на линейное расширение сплава Al – 10 % Cu (продувка расплава водяным паром, 30 мин)

аномалий. Сделано заключение о том, что одной закалки недостаточно для снижения ТКЛР. Это происходит потому, что высокий нагрев разлагает промежуточные фазы, являющиеся концентраторами водорода [21, 22]. В результате количество водорода H^+ в твердом растворе повышается, а следовательно, ТКЛР сплава увеличивается. Для его снижения необходимо проведение закалки с последующим старением при 200...300 °C, когда водород H^+ взаимодействует с примесями сплава и образует независимые «продукты распада пересыщенного раствора» [23], снижающие ТКЛР.

Вторая аномалия ТКЛР, выражающаяся в резком снижении коэффициента при $t_{исп} = 400$ °C, ранее была установлена на сплавах алюминия с магнием [24]. Там же сделано заключение, что «аномалию линейного расширения в сплавах Al-Mg следует рассматривать как эффект, обусловленный перераспределением водорода

в твердом растворе, молизацией и частичным выходом в атмосферу. Это согласуется с масс-спектрометрическим определением температуры начала выделения водорода из сплава Al – 10 % Cu [21]». Кроме того, сделан вывод, что «повышение содержания магния или водорода усиливает аномалию, длительная гомогенизация сплавов приводит к значительному ее уменьшению».

Развитие второй аномалии линейного расширения характерно для многих других материалов. Резкое снижение ТКЛР при нагреве различных веществ, таких как высокочистое железо 008ЖР, серый чугун и белый нелегированный чугун [25], часто достигающее отрицательных значений, свидетельствует о едином процессе расширения и сжатия при нагреве. Выяснению природы этого процесса должно быть уделено значительное внимание. Сейчас достоверно известно, что определенная, а может быть веду-

щая, роль в обнаруженных процессах расширения и сжатия принадлежит водороду. Столь необычное поведение тяжелых и легких сплавов открывает перспективу получения требуемого и контролируемого значения ТКЛР.

Основное внимание должно быть уделено также пластической деформации как горячей, так и холодной.

На сплавах Al – Cu показано, что «горячий прокат существенно влияет на линейное расширение сплава, причем эффект деформации усиливается при увеличении содержания меди» [7].

На рис. 5а, б, в на примере сплавов алюминия с 10, 15 и 20 % меди, показано, что пластическая деформация и последующий отжиг полностью устраняют как первую, так и вторую аномалии. Проведение горячего проката с холодным подкатом существует давно и является важным, поскольку лежит в основе получения класса Fe-Ni инваров.

Нами впервые приведены результаты, указывающие на возможность сжатия сплава Al – 30 % Cu при $t_{\text{исп}} = 400 \dots 450 \text{ } ^\circ\text{C}$, где ТКЛР достигает значений $\alpha = -1,92 \dots -2,00 \cdot 10^{-6}, \text{ град}^{-1}$. Также процессы сжатия ярко просматриваются после различной термической обработки железа и белого нелегированного чугуна [25].

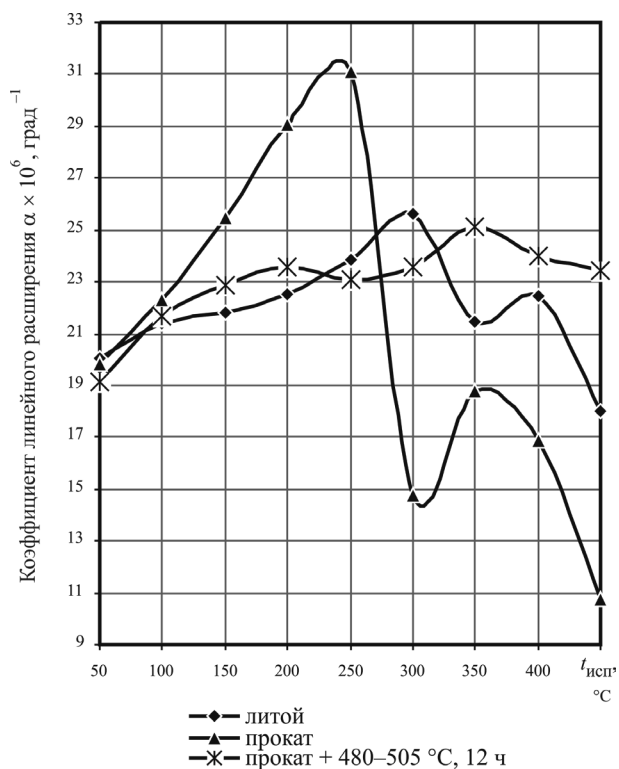


Рис. 5а. Линейное расширение деформируемого сплава Al – 10 % Cu

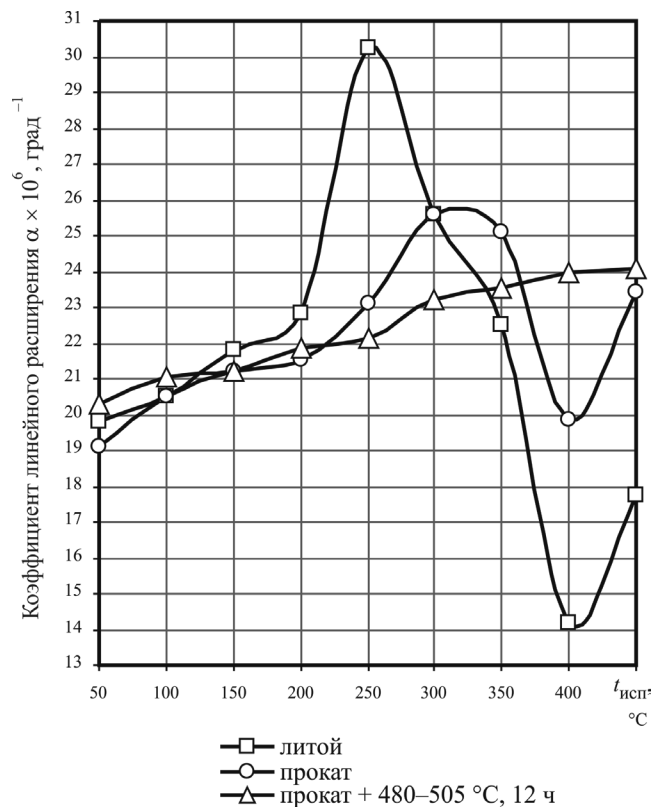


Рис. 5б. Линейное расширение деформируемого сплава Al – 15 % Cu

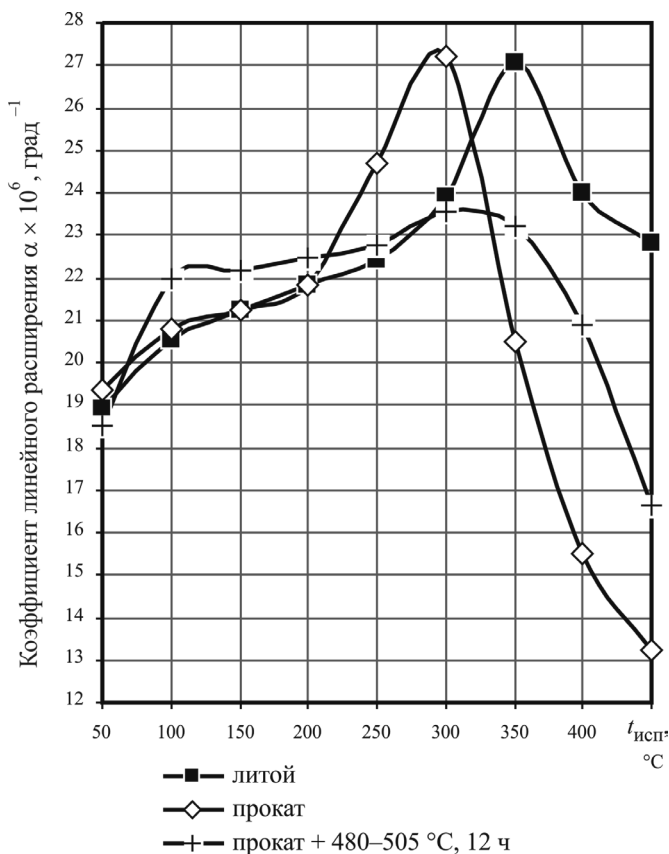


Рис. 5в. Линейное расширение деформируемого сплава Al – 20 % Cu

Выводы

1. Изучена обработка расплава водяным паром и последующая термическая обработка сплавов Al – Cu различного приготовления. Показано, что водяной пар, введенный в расплав, приводит к развитию аномалии линейного расширения при температурах испытания 350...400 °С.

2. Установлено, что пластическая деформация сплавов Al – 10...20 % Cu снижает ТКЛР при высоких температурах испытания, а последующий отжиг (480...505 °С) после 12 ч нагрева существенно уменьшает действие пластической деформации.

3. Полученные экспериментальные результаты являются следующим шагом при разработке будущих легких инваров.

Список литературы

1. Материаловедение и технология материалов: учебное пособие / под ред. А.И. Батышева, А.А. Смолькина. – М.: Инфра-М, 2012. – 288 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-16-004821-5.
2. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 424 с.
3. Гринвуд Н., Эрншо А. Химия элементов. В 2 т. Т. 2: пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 670 с. – (Лучший зарубежный учебник). – ISBN 978-5-94774-372-2. – ISBN 978-5-94774-374-6.
4. Таблицы физических величин: справочник / под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1006 с.
5. Прецизионные сплавы: справочник / под ред. Б.В. Молотилова. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1983. – 439 с.
6. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 7–17.
7. Влияние меди на линейное расширение алюминия А7 / В.К. Афанасьев, А.В. Горшенин, М.А. Старостина, Е.В. Первакова, И.В. Дегтярева // Металлургия машиностроения. – 2010. – № 3. – С. 30–34.
8. О влиянии кремния на тепловое расширение алюминия / В.К. Афанасьев, А.В. Горшенин, М.В. Попова, А.Н. Прудников, М.А. Старостина // Металлургия машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 23–26.
9. Афанасьев В.К., Попова М.В. Перспективы развития легких сплавов с малым тепловым расши-

рением для космической техники // Металлургия машиностроения. – 2012. – № 6. – С. 8–13.

10. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием. – М.: Металлургия, 1977. – 271 с.

11. Альтман М.Б. Структура и свойства легких сплавов. – М.: Наука, 1971. – 218 с.

12. Алюминий: свойства и физическое материаловедение: пер. с англ. / под ред. Дж.Е. Хэтча. – М.: Металлургия, 1989. – 422 с.

13. Лившиц Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов. – М.: Машгиз, 1959. – 368 с.

14. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.

15. Афанасьев В.К. Водородная платформа периодической системы элементов // Металлургия машиностроения. – 2011. – № 2. – С. 21–27.

16. О линейном расширении алюминия при нагреве / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, В.Ф. Фролов, А.Н. Любушкина // Металлы. – 2002. – № 2. – С. 47–53.

17. О новом способе дегазации металлов и сплавов / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, А.А. Копытько, М.А. Старостина, Н.Б. Лаврова, Д.М. Чибряков // Металлургия машиностроения. – 2009. – № 4. – С. 5–9.

18. Галактионова Н.А. Водород в металлах. – М.: Металлургия, 1967. – 303 с.

19. Колачев Б.А. Водородная хрупкость цветных металлов. – М.: Металлургия, 1966. – 255 с.

20. Водород в металлах. В 2 т. Т. 2. Прикладные аспекты / под ред. Г. Алефельда, И. Фелькля. – М.: Мир, 1981. – 430 с.

21. Ливанов В.А., Габидуллин Р.М., Колачев Б.А. О распределении водорода между фазами в металлах // Сплавы цветных металлов: сборник статей. – М., 1972. – С. 145–151.

22. О распределении водорода в металле при кристаллизации / Р.М. Габидуллин, В.А. Засыпкин, В.Д. Юшин, В.Н. Титов // Алюминиевые сплавы: сборник. – М., 1968. – Вып. 5. – С. 14–21.

23. Афанасьев В.К. Об особенностях влияния водорода на распад алюминиевых твердых растворов // Физика и химия обработки материалов. – 1977. – № 4. – С. 67–75.

24. Афанасьев В.К., Ухов В.Л., Солопеко А.Н. Об аномалии линейного расширения сплавов Al-Mg // Известия Академии наук СССР. Металлы. – 1975. – № 5. – С. 189–191.

25. Разработки кафедры материаловедения и технологии новых материалов СибГИУ / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, Н.Н. Кушнарченко, А.Н. Прудников // Металлургия машиностроения. – 2014. – № 2. – С. 30–38.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (71), April – June 2016, Pages 87–94

Thermal expansion of Al–Cu alloys after conditioning and heat treatment

Afanas'ev V.K., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: sv_dolgov@mail.ru

Malyuh M.A., Junior researcher, e-mail: malyuh_ma@umu.sibsiu.ru

Popova M.V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: m.popova@rdtc.ru

Leis V.A., Junior researcher

Dolgova S.V., Junior researcher, e-mail: sv_dolgov@mail.ru

Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Abstract

There is a huge amount of works on the study of the *invar effect* including alloying of iron-nickel bases by all the available elements of the periodic table, including precious metals (*Pt*, *Pd*). However, the secret of the *invar effect* is still not clear. The effect of copper on the linear expansion of commercial purity aluminum A7 was studied previously. The results obtained led to the conclusion that it can be reasonable to use copper to produce light alloys with controlled thermal expansion. The mechanism of the thermal expansion of as-cast and deformed Al-Cu alloys depends on the melt conditioning and heat treatment. The melt conditioning is presented by the water steam purging. It is found that the melt conditioning leads to anomalies, which are reflected in the reduction of thermal expansion of the alloys of interest. Further heat treatment leads to the development of anomalies. It is shown that the hot plastic deformation significantly affect the temperature coefficient of linear expansion (TCLE, α) aluminum-copper alloys and the effect increases with copper content increasing. The possibility of application of the discovered mechanism to create a new invar alloys, differing by a low specific weight and lower cost is investigated.

Keywords

temperature coefficient of linear expansion, Al-Cu alloys, Invar, melt conditioning, heat treatment, anomaly of TCLE

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-87-94

References

1. Batyshev A.I., Smol'kin A.A., eds. *Materialovedenie i tekhnologiya materialov* [Materials science and technology of materials]. Moscow, Infra-M Publ., 2012. 288 p. ISBN 978-5-16-004821-5
2. Novikova S.I. *Teplovoe rasshirenie tverdykh tel* [Thermal expansion of solid bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 424 p.
3. Greenwood N.N., Earnshaw A. *Chemistry of the Elements*. 2nd ed. Oxford, Boston, Butterworth-Heinemann Publ., 1997. 1600 p. ISBN-10: 0-7506-3365-4. ISBN-13: 978-0-7506-3365-9 (Russ. ed.: Grinvud N., Ernsho A. *Khimiya elementov*. V 2 t. T. 2. Translated from English. Moscow, BINOM. Laboratoriya znanii Publ., 2008. 670 p. ISBN 978-5-94774-372-2. ISBN 978-5-94774-374-6).
4. Kikoin I.K., ed. *Tablitsy fizicheskikh velichin* [Tables of physical quantities]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 1006 p.
5. Molotilov B.V., ed. *Pretsizionnye splavy* [Precision alloys]. 2nd ed. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 439 p.
6. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda [Strategical areas of developing materials and their processing technologies for the period up to 2030]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii – Aviation materials and technologies*, 2012, no. S (Special iss.), pp. 7–17.
7. Afanasev V.K., Gorshenin A.V., Starostina M.A., Pervakova E.V., Degtyaryova I.V. Vliyanie medi na lineinoe rasshirenie alyuminiya A7 [Features of influence of copper on linear expansion of aluminium A7]. *Metallurgiya mashinostroeniya – Metallurgy of Machinery Building*, 2010, no. 3, pp. 30–34.
8. Afanasiev V.K., Gorshenin A.V., Popova M.V., Prudnikov A.N., Starostina M.A. O vliyanii kremniya na teplovoe rasshirenie alyuminiya [About influence of silicon on thermal expansion of aluminium]. *Metallurgiya mashinostroeniya – Metallurgy of Machinery Building*, 2010, no. 6, pp. 23–26.

9. Afanasyev V.K., Popova M.V. Perspektivy razvitiya legkikh splavov s malym teplovym rasshireniem dlya kosmicheskoi tekhniki [Development prospects for light alloys with low thermal expansion for space technology]. *Metallurgiya mashinostroeniya – Metallurgy of Machinery Building*, 2012, no. 6, pp. 8–13.
10. Stroganov G.B., Rotenberg V.A., Gershman G.B. *Splavy alyuminiya s kremniem* [Aluminum alloys with silicon]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 271 p.
11. Al'tman M.B. *Struktura i svoistva legkikh splavov* [Structure and properties of easy alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 218 p.
12. Hatch J.E., ed. *Aluminum: properties and physical metallurgy*. Metals Park, Ohio, ASM International Publ., 1984. 424 p. ISBN-10: 0-8717-0176-6. ISBN-13: 978-0871701763 (Russ. ed.: *Alyuminii: svoistva i fizicheskoe metallovedenie*. Translated from English. Ed. by Dzh. Khetch. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989. 422 p.).
13. Livshits B.G. *Fizicheskie svoistva metallov i splavov* [Physical properties of metals and alloys]. Moscow, Mashgiz Publ., 1959. 368 p.
14. Fridman Ya.B. *Mekhanicheskie svoistva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow, Mashinostroe-
nie Publ., 1974. 472 p.
15. Afanasyev V.K. Vodorodnaya platforma periodicheskoi sistemy elementov [The hydrogen platform of the periodic table of elements]. *Metallurgiya mashinostroeniya – Metallurgy of Machinery Building*, 2011, no. 2, pp. 21–27.
16. Afanas'ev V.K., Popova M.V., Frolov V.F., Lyubushkina A.N. O lineinom rasshirenii alyuminiya pri nagreve [On the linear expansion of aluminum upon heating]. *Metally – Russian metallurgy (Metally)*, 2002, no. 2, pp. 47–53. (In Russian)
17. Afanasev V.K., Dolgova S.V., Kopytko A.A., Starostin M.A., Lavrova N.B., Chibryakov D.M. O novom sposobe degazatsii metallov i splavov [A new way of decontamination of metals and alloys]. *Metallurgiya mashi-
nostroeniya – Metallurgy of Machinery Building*, 2009, no. 4, pp. 5–9.
18. Galaktionova N.A. *Vodorod v metallakh* [Hydrogen in metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1967. 303 p.
19. Kolachev B.A. *Vodorodnaya khrupkost' tsvetnykh metallov* [Hydrogen fragility of non-ferrous metals]. Mos-
cow, Metallurgiya Publ., 1966. 255 p.
20. Alefeld G., Völkl J., eds. *Hydrogen in metals*. In 2 vol. Vol. 2. *Application-oriented properties*. Berlin, New
York, Springer-Verlag, 1978. 387 p. (Russ. ed.: *Vodorod v metallakh*. V 2 t. T. 2. *Prikladnye aspekty*. Ed by G. Alefel'd,
I. Fel'kl'. Moscow, Mir Publ., 1981. 430 p.).
21. Livanov V.A., Gabidullin R.M., Kolachev B.A. [About distribution of hydrogen between phases in metals]. *Splavy tsvetnykh metallov: sbornik statei* [Non-ferrous alloys: collection of articles]. Moscow, 1972, pp. 145–151. (In Russian)
22. Gabidullin P.M., Zasytkin V.A., Yushin V.D., Titov V.N. [About distribution of hydrogen between phases in metals]. *Alyuminievye splavy: sbornik* [Aluminium alloys: collection of articles]. Moscow, 1968, no. 5, pp. 14–21. (In Russian)
23. Afanas'ev V.K. Ob osobennostyakh vliyaniya vodoroda na raspad alyuminievykh tverdykh rastvorov [About features of influence of hydrogen on disintegration of aluminum solid solutions]. *Fizika i khimiya obrabotki materi-
alov – Physics and chemistry of materials treatment*, 1977, no. 4, pp. 67–75.
24. Afanas'ev V.K., Ukhov V.L., Solopeco A.N. Ob anomalii lineinogo rasshireniya splavov Al-Mg [About anomaly of linear expansion of alloys of Al-Mg]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Metally – News of Academy of Sci-
ences of the USSR. Metals*, 1975, no. 5, pp. 189–191. (In Russian)
25. Afanasiev V.K., Popova M.V., Kushnarenko N.N., Prudnikov A.N. Razrabotki kafedry materialovedeniya i tekhnologii novykh materialov SibGIU [Developments by the SibGIU's Material Science and New Materials Tech-
nology Department]. *Metallurgiya mashinostroeniya – Metallurgy of Machinery Building*, 2014, no. 2, pp. 30–38.

Article history:

Received 4 April 2016

Revised 4 May 2016

Accepted 15 May 2016

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 упорядочение данных и систематическое представление результатов. Так, простой отчет о результатах испытаний без попытки исследовать внутренние механизмы не имеет большой ценности.

8. Выводы

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

9. Список литературы

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

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

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

ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

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

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

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

В тексте авторского резюме следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций. В тексте авторского резюме следует применять значимые слова из текста статьи. Текст авторского резюме должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначущих 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 ^1H or ^{31}P spectroscopy) are related to several pathophysiologic indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative ^{13}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}P MR, as well as with increased EEG measures of Teager energy, further arguing for a direct role of glutamate with hyperexcitability.

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

Фрагменты из рекомендаций авторам журналов издательства Emerald

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

Авторское резюме включает следующее.

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

2. Кратко излагая основные факты работы, необходимо помнить следующие моменты:

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

Примеры, как не надо писать реферат, приведены на сайте издательства

(<http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/abstracts.htm?part=3&>).

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

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

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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

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

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

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

При принятии рукописи к печати дополнительно на почтовый адрес редакции (630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 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*. 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.

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

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

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

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

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

Научная публикация должна иметь следующую структуру

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

2. Аннотация:

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

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

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

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

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

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

10. Сведения для РИНЦ.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ АНГЛОЯЗЫЧНОГО БЛОКА СТАТЬИ

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

Англоязычная часть статьи должна включать в себя:

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

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

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

ключевые слова (Keywords);

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

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

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

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

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ В АНГЛОЯЗЫЧНОМ БЛОКЕ СТАТЬИ*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ПРИМЕРЫ ССЫЛОК

Описание статьи из журналов:

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

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

Описание статьи из электронного журнала:

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

Если статья имеет DOI – обязательно указать его!

Описание статьи с DOI:

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

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

Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

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

Описание материалов конференций:

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

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

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

Описание книги (монографии, сборники):

Nenashev M.F. *Poslednee pravitel'stvo SSSR* [Last government of the USSR]. Moscow, Krom Publ., 1993. 221 p.

Ot katastrofy k vrozozhdeniyu: prichiny i posledstviya razrusheniya SSSR [From disaster to rebirth: the causes and consequences of the destruction of the Soviet Union]. Moscow, HSE Publ., 1999. 381 p.

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

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

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

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

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

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

Описание переводной книги:

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

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

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

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

Описание неопубликованного документа:

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

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

Описание Интернет-ресурса:

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

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

Описание диссертации или автореферата диссертации:

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

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

Описание ГОСТа:

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

или

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

Описание патента:

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

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

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

Описание анонимных документов:

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

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

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

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

Пример оформления статьи

УДК 621.9.06:518.4

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

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

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

Аннотация (не менее 10 строк, 850 знаков)

Ключевые слова

<Текст статьи с четко выраженной структурой>

1. Введение
2. Теория или методика экспериментального исследования или материалы и методы и др.
3. Результаты и обсуждение
4. Выводы
5. Список литературы (15–25 наименований, не более 30 % ссылок на свои публикации)

<Англоязычный блок статьи (с новой страницы)>

Choice of design parameters of base details at the design stage

Ivanov V.G.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: metal_working@mail.ru
Petrov V.S.², Ph.D. student, e-mail: petrov_v@mail.ru

¹Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

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

Abstract (не менее 250 слов)

Keywords

References

Funding

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

Пример оформления сведений для РИНЦ

УДК 621.9.06:518.4

Выбор конструктивных параметров базовых деталей на этапе проектирования

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

¹Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

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

Иванов В.Г. e-mail: metal_working@mail.ru

Петров В.С. e-mail: petrov_v@mail.ru

Аннотация

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

Ключевые слова:

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

Список литературы

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

(15–25 наименований)

Choice of design parameters of base details at the design stage

¹Ivanov V.G., ²Petrov V.S., ...

¹Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

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

Abstract

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

Keywords

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

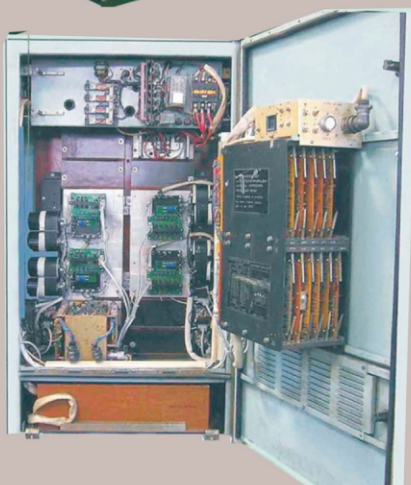


Модернизация систем ЧПУ и электроприводов металлообрабатывающих станков с ЧПУ

Модернизированные СЧПУ
мод. 2P22 и 2C42-65



Модернизированные электроприводы
мод. Размер 2М-5-21,Размер2М-5-21\11



Асинхронные станочные электроприводы в габаритах болгарских КЕМРОС,КЕМРОН,КЕМТОК
мод. Размер 6М-3-1Ц,Размер 6М-3-2Ц



Размер 6М-3-2Ц
две подачи по 4,5 кВт



Размер 6М-3-1Ц
гл.привод 11 кВт



Размер 6М-3-2Ц
гл. привод 11 кВт
подача 4,5 кВт

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;
- на сайте НГТУ: 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



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

Тематика работы конференции:

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

Официальный сайт конференции:

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



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

Цветная реклама на обложке (формат А4):

2 страница 18 000 руб.

3 страница 15 000 руб.

4 страница 20 000 руб.

