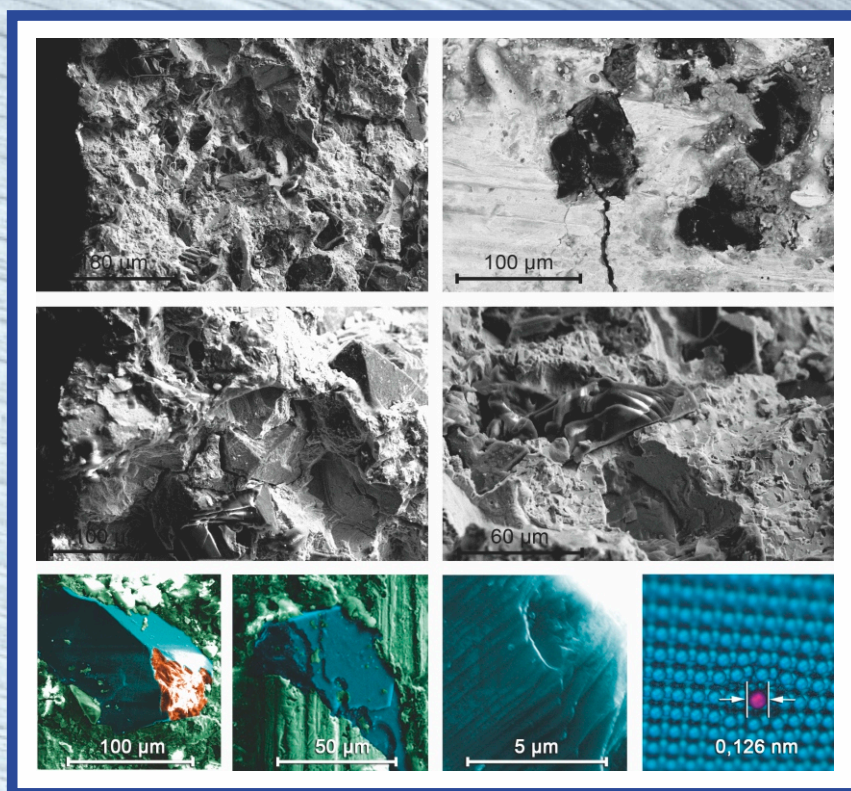


ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ISSN 1994-6309

ТЕХНОЛОГИЯ
ОБОРУДОВАНИЕ
ИНСТРУМЕНТЫ

№ 4 (73) ОКТЯБРЬ–ДЕКАБРЬ 2016 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



Внешние картины алмазных зерен
в связке шлифовального круга

НОВОСИБИРСК

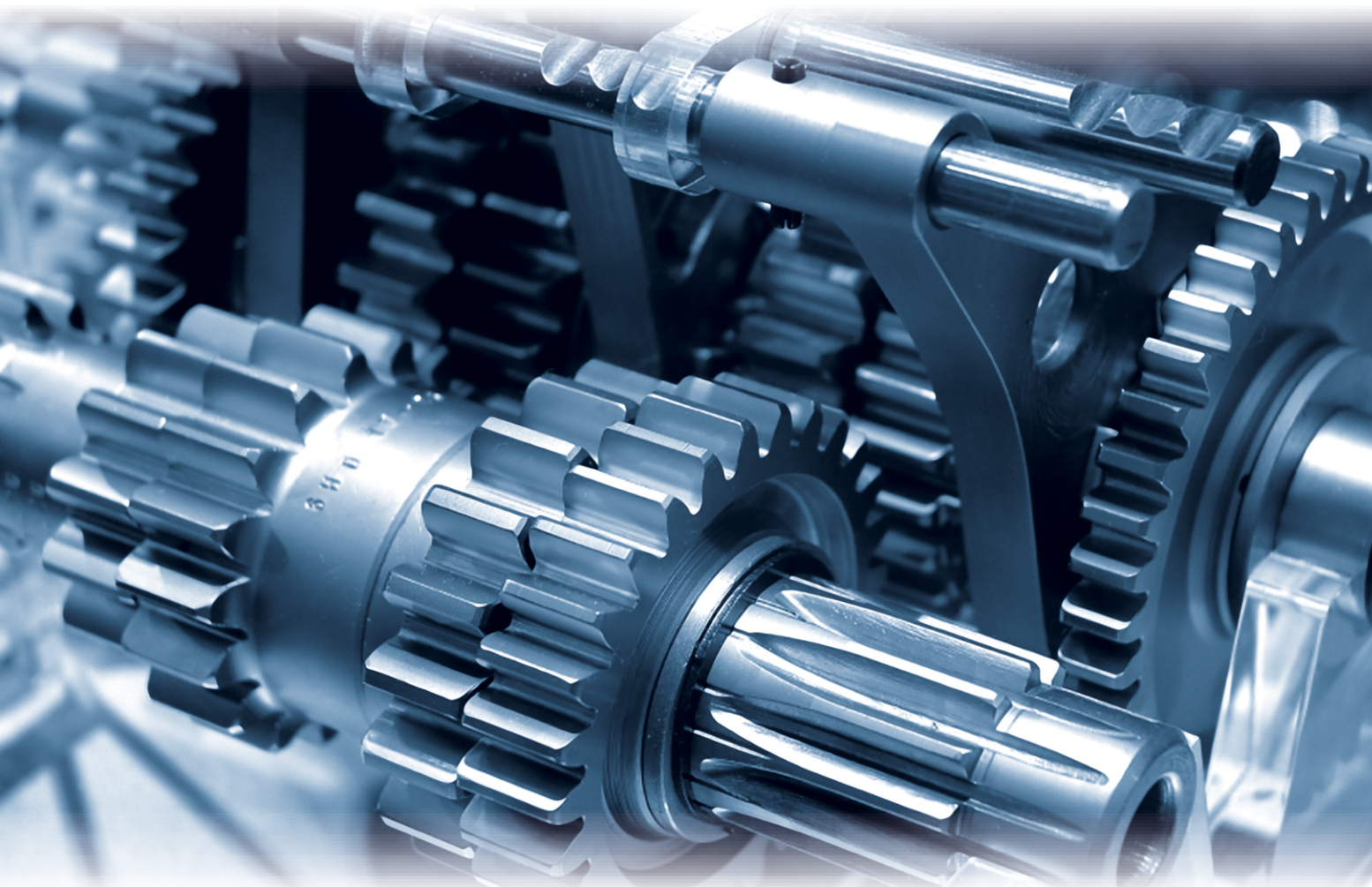


Выставка оборудования
для металлообработки
и сварки

28–31 марта 2017

Место проведения: МВК «Новосибирск Экспоцентр»

Получите электронный билет
mashex-siberia.ru



Организатор
ITE Сибирь

Россия, Новосибирск
ул. Станционная, 104

Тел.: (383) 363-00-36
www.ite-siberia.ru

Генеральный
информационный партнер

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ЖУРНАЛ
**СТАНОЧНЫЙ
ПАРК**

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309

№ 4 (73) ОКТЯБРЬ–ДЕКАБРЬ 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 Морейра Хорхе**, профессор, доктор технических наук, Федеральный университет, г. Сан Карлос

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

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

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

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

Журнал вошел в список рекомендованных к включению в **Перечень рецензируемых научных изданий**, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в соответствии с требованиями приказа Минобрнауки России от 25 июля 2014 г. № 793, с изменениями, внесенными приказом Минобрнауки России от 03 июня 2015 г. № 560 (по состоянию на 01.11.2016)

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

СОУЧРЕДИТЕЛИ

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Иванцовский Владимир Владимирович – доцент,
доктор технических наук.

Скиба Вадим Юрьевич – доцент, кандидат технических наук

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

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных 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. 137ВЦ, Скиба В.Ю.

Тел. (383) 346-17-79

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

Мозговой Н.И., Мозговая Я.Г. Разработка программно-аппаратного комплекса для контроля внутренних дефектов и остаточного ресурса инженерных конструкций и изделий из стеклопластика.....	6
--	---

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Разрушение алмазных зерен при шлифовании.....	16
Подгорный Ю.И., Скиба В.Ю., Кириллов А.В., Максимчук О.В., Мартынова Т.Г., Лобанов Д.В., Филатов И.С., Скиба П.Ю. Определение жесткостных характеристик и энергии деформации несущих систем технологических машин.....	24

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Ковалевская Ж.Г., Шаркеев Ю.П., Корчагин М.А., Химич М.А., Ибрагимов Е.А., Сапрыкин А.А., Батаев В.А. Исследование строения порошкового сплава Ti-40Nb, полученного механической активацией.....	34
Суханов Д.А., Архангельский Л.Б., Плотникова Н.В. Морфология избыточной карбидной фазы в высокоуглеродистых сплавах типа булат.....	43
Корниенко Е.Е., Никулина А.А., Баннов А.Г., Кузьмин В.И., Мильдебрах М., Безрукова В.А., Жойдик А.А. Влияние температуры оплавления на структуру и свойства самофлюсующихся покрытий на основе никеля.....	52
Ленивцева О.Г., Дробяз Е.А., Гонгаренко А.С., Зимоглядова Т.А., Чучкова Л.В. Структура и свойства слоев TiV-TiC-Ti, полученных на поверхности сплава ВТ1-0 методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки.....	63
Рекомендации по написанию научной статьи	75
Подготовка аннотации	77
Правила для авторов	79
IV Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы в машиностроении» Информационное письмо.....	88

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 18.11.2016. Выход в свет 15.12.2016. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
 Усл. печ.л. 12,0. Уч.-изд. л. 22,32. Изд. № 256. Заказ 1603. Тираж 300 экз.

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

BRABOTKA OMETALLOV METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

ISSN 1994-6309

Journal no.4 (73) October–December 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 V. Ivancivsky, D.Sc. (Engineering), Associate Professor,
Department of Industrial Machinery Design,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

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

Editor of the English translation:

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

The magazine is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year

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

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

Edition address: Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,
Novosibirsk, 630073, Russia
Tel.: (383) 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*;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CONTENTS

TECHNOLOGY

Mozgovoy N.I., Mozgovaya Y.G. Development of hardware and software for the control of internal defects and residual resource of engineered structures and parts made of fiberglass.....	6
--	---

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

Popov V.Y., Yanyushkin A.S., Khlystov A.N. About a destruction of diamond grains in the grinding process.....	16
Podgornyj Yu.I., Skeebe V.Yu., Kirillov A.V., Maksimchuk O.V., Martynova T.G., Lobanov D.V., Filatov I.S., Skeebe P.Yu. Determination of the rigidity and deformation energy of the technological machine load-carrying systems.....	24

MATERIAL SCIENCE

Kovalevskaya Zh.G., Sharkeev Yu.P., Korchagin M.A., Khimich M.A., Ibragimov E.A., Saprykin A.A., Bataev V.A. Investigation of the structure of Ti-40Nb powder alloy obtained by mechanical activation.....	34
Sukhanov D.A., Arkhangelskiy L.B., Plotnikova N.V. The morphology of the carbides in high-carbon alloys such as damascus steel.....	43
Kornienko E.E., Nikulina A.A., Bannov A.G., Kuz'min V.I., Mildebrath M., Bezrukova V.A., Zhoidik A.A. The influence of flowing temperature on the structure and properties of the self-fluxing coatings.....	52
Lenivtseva O.G., Drobyaz E.A., Gontarenko A.S., Zimogliadova T.A., Chuchkova L.V. Structure and properties of TiB-TiC-Ti layers fabricated on cp-titanium substrates by electron beam cladding.....	63
Guidelines for Writing a Scientific Paper	75
Abstract requirements	77
Rules for authors	79
IV International Scientific and Practical Conference “Actual problems in machine building”. Information letter.....	88

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА

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

Поступила 13 октября 2016
Рецензирование 3 ноября 2016
Принята к печати 15 ноября 2016

Мозговой Н. И. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: nick_3@mail.ru

Рассматривается выявление дефектов в изделиях из современных композиционных материалов методом ультразвукового сигнала и представлен анализ остаточного ресурса инженерных конструкций. К основным дефектам, возникающим в структуре композиционных материалов, можно отнести следующие: смещение, поворот и коробление отдельных слоев армирующего материала; поверхностное вздутие, расслоение, коробление; повышенная пористость, трещины, раковины, неравномерность усадки материалов; снижение адгезии связующего и наполнителя и др.

Своевременное выявление дефектов и прогнозирование остаточного ресурса инженерных конструкций позволит снизить вероятность разгерметизации деталей в инженерных конструкциях и даст возможность избежать экологических проблем при разрушении трубопроводов. Невыявленные внутренние дефекты могут привести не только к значительным экономическим потерям, загрязнению окружающей среды, но и к человеческим жертвам.

В условиях производства пластичные материалы, в частности композиты, широко используются для замены деталей и узлов из редких материалов, цветных и черных металлов и на их основе сплавов, работающих в агрессивных средах. Это позволяет повысить надежность и долговечность конструкции в целом.

Однако в современных производственных условиях для оценки качества производимой продукции по-прежнему на многих предприятиях при осуществлении контроля свойств материала приходится выборочно из партии деталей разрушать целостность исследуемого образца. С экономической точки зрения это приводит к увеличению производственного цикла и себестоимости продукции.

В настоящей работе предлагается способ ультразвуковой диагностики с использованием программно-аппаратного комплекса, позволяющего выявить внутренние дефекты, наличие посторонних включений и неоднородности по структуре композиционного материала без разрушения изделия, сократить экономические, экологические и человеческие потери.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, ультразвук, композиционные материалы, качество поверхности, управление процессом, обработка материалов, ресурс инженерных конструкций.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-6-15

Введение

Большая часть изделий из металла, имеющих термодинамическую неустойчивость, в той или иной степени разрушаются под воздействием

коррозионной среды. Один из путей решения этой проблемы – применение пластических материалов, таких как стеклопластики.

Стеклопластики со временем стали применяться все интенсивнее. Во многих отраслях

промышленности (табл. 1) за последние три года можно увидеть рост объема производства стеклопластика в России, несмотря на экономические проблемы.

Таблица 1

**Объем производства стеклопластика
в России (по данным Росстата и исследованиям
ID-Marketing)**

Год	2013	2014	2015
Объем рынка РФ, млрд руб.	275,8	322,6	408,7
Рост, %	–	14,51	21,07

Для современных инженерных конструкций и ответственных деталей использование стеклопластика дает возможность повысить стойкость к коррозии и агрессивным химическим средам в 3–5 раз, уменьшить массу изделия, а также увеличить прочность и долговечность [1–3].

В настоящее время на многих производственных предприятиях существуют детали, которые успешно изготавливаются из пластичных материалов. Такие детали условно можно разделить на следующие группы: тела вращения 67 % (валы 26 %, втулки 20 %, диски с отверстиями 17 % и без отверстий – 4 %), корпусные 30 % и прочие 3 %. Композиты используются для качественной замены металлов в машиностроении и приборостроении (38...45 %), газо- и нефтехимии для изготовления установок, труб (25...30 %), корпусов в судостроении и авиационной промышленности (15...24 %) [4–6].

В нефтегазовой промышленности широко используются трубы из композиционных материалов, таких как стеклопластик. Однако, по данным министерства природных ресурсов и экологии России и регионального отделения «Гринпис», потери нефти и нефтепродуктов за счет аварийных ситуаций, в частности спровоцированных наличием дефектов, колеблются от 17 до 20 млн т ежегодно, что составляет около 7 % объема добываемой в России нефти. При стоимости 1 т нефти 150...200 долл. ущерб в экономике России, не считая экологического, составляет 3...4 млрд долл. Только на территории Ханты-Мансийского АО ежегодно на землю попадает до 2 млн т нефти вследствие значительного износа внутрипромысловых трубопроводов с частотой 1,5...2,0 разрыва на 1 км.

Таким образом, исследования, направленные на выявление дефектов, оценку остаточного ре-

сурса и контроль качества изделий из композитов в настоящее время актуальны и востребованы.

Целью экспериментальных исследований является разработка программно-аппаратного комплекса для выявления внутренних дефектов в деталях из композиционных материалов и определение остаточного ресурса инженерных конструкций с помощью ультразвукового сигнала.

**Методика экспериментального
исследования**

Структура композиционных материалов характеризуется степенью неоднородности, которая зависит от наличия дефектов, образующихся в процессе переработки материала в изделия, дефектов исходного сырья и дефектов, возникающих во время эксплуатации. Преобладающее влияние на качество материала оказывают наследственные и технологические дефекты, развивающиеся и (или) образующиеся из-за несоблюдения режимов подготовки исходного сырья, состояния технологического оборудования, нарушения технологических регламентов (режим нагревания, охлаждения, давление, скорость протяжки). К основным дефектам, возникающим в структуре композиционных материалов, можно отнести следующие: смещение, поворот и коробление отдельных слоев армирующего материала; поверхностное вздутие, расслоение, коробление; повышенная пористость, трещины, раковины, неравномерность усадки материалов; снижение адгезии связующего и наполнителя и другие (рис. 1, а–в) [7–9]. Эти дефекты приводят к тому, что в исходном материале изделия появляются участки со значительным расхождением физико-механических свойств, а это ведет к возникновению внутренних остаточных напряжений и нарушению ориентации армирующих волокон, которые провоцируют появление концентраторов напряжений и т. п.

Своевременное выявление данных дефектов и прогнозирование остаточного ресурса инженерных конструкций позволит избежать разгерметизации деталей и инженерных конструкций, экологических проблем при разрушении трубопроводов. Невыявленные внутренние дефекты могут привести не только к значительным экономическим потерям, загрязнению окру-

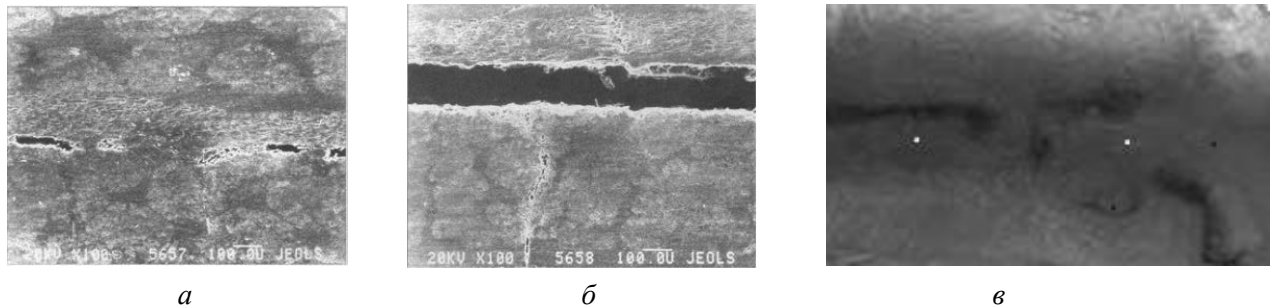


Рис. 1. Виды дефектов, возникающих в стеклопластиках и выявляемых акустическим методом: а – прерывистость расслоения; б – трещина поперек слоев; в – расслоение в зоне заклепанного соединения

жающей среды, но и к человеческим жертвам. В настоящей работе предлагается способ, позволяющий сократить экономические, экологические и человеческие потери, а именно проводить дефектоскопию изделий из стеклопластика [10–12]. В основу способа положена разработка и внедрение программно-аппаратного комплекса, что только в нефтегазовой отрасли позволит получить экономический эффект в размере 0,6...0,8 млрд долл.

В рамках данного исследования проведен патентный поиск по темам: «Приборы для неразрушающего контроля деталей из композиционных материалов, реализующие метод ультразвукового контроля», «Приборы для оценки остаточного ресурса инженерных конструкций методами неразрушающего контроля».

Наиболее близким российским аналогом оборудования является ультразвуковой дефектоскоп УД2-102 Пеленг. Методы ультразвукового контроля, реализуемые дефектоскопом: эхо-метод; частота следования зондирующих импульсов УЗК 25...5000 Гц; диапазон измерения глубины выявленного дефекта в изделиях из стали 1...8850 мм, производитель – РФ, стоимость 196 020 руб. Недостатки: ограничение в использовании из-за соединения датчиков и приемников проводами; не предназначен для выявления дефектов в стеклопластиках.

Зарубежные аналоги:

1) STARMANS DIO 1000PA. Методы ультразвукового контроля, реализуемые дефектоскопом: метод фазированных решеток, частота следования зондирующих импульсов УЗК – 0,5...15 МГц, диапазон измерения глубины выявленного дефекта в изделиях из стали 1...29 000 мм, производитель – Чешская республика. Недостатки: ограничение в использовании из-за соединения датчиков и приемников проводами; не предназначен

для выявления дефектов в стеклопластиках, высокая стоимость 887 500 руб. [13–15];

2) Eron 1000i. Методы ультразвукового контроля, реализуемые дефектоскопом: методы фазированных решеток, частота следования зондирующих импульсов УЗК – 0,5...15,5 МГц, диапазон измерения глубины выявленного дефекта в изделиях из стали 1...29 000 мм, производитель – США. Недостатки: ограничение в использовании из-за соединения датчиков и приемников проводами; не предназначен для выявления дефектов в стеклопластиках [16, 17].

Выявлены достоинства и недостатки имеющихся технических решений, предложена принципиальная схема для контроля внутренних дефектов и остаточного ресурса инженерных конструкций.

Требования, предъявляемые к разрабатываемому программно-аппаратному комплексу

1. Основные технические параметры разрабатываемого продукта «Программно-аппаратный комплекс для контроля внутренних дефектов и остаточного ресурса инженерных конструкций»: используемый метод контроля – метод ультразвукового контроля; частота следования зондирующих импульсов УЗК 25...5000 Гц; диапазон измерения глубины выявленного дефекта в изделиях из стеклопластика 1...9000 мм; передача данных при работе программно-аппаратного комплекса осуществляется с помощью GPS-связи.

2. Конструктивные требования:

– программно-аппаратный комплекс должен иметь классическое исполнение ультразвукового дефектоскопа, простоту настройки и энергонезависимую память. Масса прибора не превышает 5 кг;

– работоспособность прибора сохраняется при температурах от –20 до +50 °С;

– предусмотрена возможность предустановки основных параметров контроля с возможностью их быстрого выбора;

– прибор работает от встроенного щелочного или литий-ионного аккумулятора, который обеспечивает бесперебойную работу в течение длительного интервала времени;

– оперативное подключение по USB для передачи данных на портативный компьютер.

3. Техническое обслуживание заявляемого программно-аппаратного комплекса составляет определенный набор организационно-технических мероприятий, направленных:

1) на повышение работоспособности и увеличение ресурса работы программно-аппаратного комплекса;

2) своевременное его техническое обслуживание и ремонт;

3) снижение стоимости и сокращение сроков проведения ремонтных работ.

В качестве исследуемого материала выбран композит: стеклопластик ВМ-1 длиной 30 мм, диаметром 100 мм.

Для осуществления контроля свойств материала на производстве в большинстве случаев используют методику разрушения исследуемого образца, что неизбежно приводит к повышению себестоимости продукции. В лабораторных условиях применялся **ультразвуковой метод** неразрушающего контроля качества композиционных материалов, в основе которого лежит способность ультразвуковых колебаний проникать с большой скоростью (до 12 000 м/с) в материал и отражаться от поверхности раздела сред с различными акустическими свойствами (табл. 2).

Таблица 2

Условия проведения эксперимента

Объект контроля	Исследуемый образец
Материал	Композит ВМ-1
Метод контроля	Ультразвуковой
Цель испытания	Проверка детали из стеклопластика на наличие внутренних несплошностей Заключение о дальнейшей пригодности заготовки в зависимости от критериев браковки
Оборудование	Дефектоскоп ультразвуковой ПАККВД-1 версия 1,00 Эталон (из композита) Прямой ПЭП, частота 5 МГц
Критерий выбраковки	Эквивалентная площадь несплошности менее 2 мм ²
Вспомогательные материалы	Контактная жидкость

При подготовке к проведению экспериментальных исследований поверхность заготовки была очищена от загрязнений спиртовым раствором Terostat-450, препятствующим обеспечению акустического контакта. Затем для улучшения процесса сканирования на поверхность исследуемого образца была нанесена контактная жидкость «Гель ультразвуковой». Настроен дефектоскоп ультразвуковой «ПАККВД-1» версия 1,00 (табл. 3) на уровень чувствительности 57 дБ, что дает возможность выявлять дефекты с эквивалентной площадью 2 мм². Минимальное расстояние от поверхности ввода до дефекта при контроле составляет 5 мм.

Таблица 3

Параметры исследования, измеряемые величины

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

Обработка протокола (рис. 2) контроля экспериментальных данных, полученных с помощью дефектоскопа, проводилась на компьютере с использованием программного обеспечения Microsoft Excel.

Для подтверждения достоверности полученных результатов наблюдений и исключения экспериментальных ошибок исследуемый образец был проверен методом с разрушением целостности. Для оценки полученных данных двумя методами были получены дефектограммы. При обнаружении участков с эквивалентной площадью несплошности более 2 мм² фиксировался внутренний дефект в виде несплошности и записывались данные о детали, выявленном дефекте и параметрах контроля в виде протокола исследования.

Обнаруженный участок в виде несплошности относится к области недопустимых дефектов, так как амплитуда от ультразвукового сигнала превышает уровень выбраковки. Для проверки

адекватности полученных данных были проведены однофакторные эксперименты. Сравнение результатов экспериментов, проведенных методом с разрушением целостности исследуемого образца и ультразвуковым методом подтверждает их адекватность, наибольшее расхождение составляет 5 %.

Результаты и обсуждение

Данная разработка направлена на решение задачи снижения себестоимости готовых изделий из композиционных материалов в отрасли промышленности, предотвращения или уменьшения экологических и человеческих потерь, возникающих при техногенных катастрофах.

Ожидаемым результатом применения данного прибора является повышение качества и долговечности изделий из композиционных материалов за счет своевременного выявления бракованных и замены изношенных деталей.

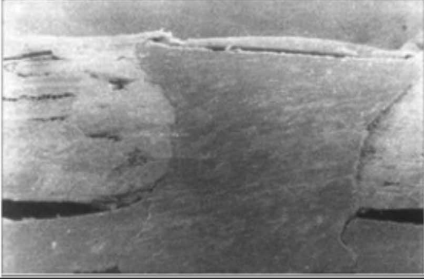
ПРОТОКОЛ №	11/2016	От 15.09.2016 14:06:30		
УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОСКОПОМ				
ПАККВД -1 версия 1,00				
ПРЕДПРИЯТИЕ	АлтГТУ			
Подразделение		Дата контроля	15.09.2016 15:16	
ОПЕРАТОР	Шифр 0	Фамилия и.о.	Иванов С.И.	
ОБЪЕКТ	тип	основн.металл	Толщина 0,00 мм	
материал	композит	№ 003	порядк. № 3	
НТД на контроль				
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ:		ОТРАЖАТЕЛЬ №	000000	
Коорд. По дл./ сеч. объекта		0 м 11 мм 00 час	Расстояние X 0,00 мм	
			Глубина Y 25,90 мм	
		Время распротр. УЗК T		19,40 мкс
		Амплитуда	N	5 дБ
		Усл.протяженность	0 мм	
		Усл.высота	0 мм	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОПЕРАТОРА:				
Присутствует признак дефекта				
ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НАСТРОЙКИ ДЕФЕКТОСКОПА:				
НАСТРОЙКА № 115	РАЗВЕРТКА: 120%	Длит.	48,1мм Y 36,0 мкс	
Частота УЗК 5,00 МГц	Зона ВС-1	Начало	5,0 мм Y 3.8 мкс	
Скорость УЗК 2670м/с	Порог 50%	Конец	38,0 мм Y 28.5 мкс	
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ:				
Усиление	57 дБ			
Треб.чувств.	00 дБ			
Фактич. чувств.	-17 дБ			
ПЭП: № 038				
Включение совмещ	ВРЧ: ручная	Начало	5,0 мм Y 3.8 мкс	
Угол ввода 0 град	Ампл. 30 дБ	Конец	38,0 мм Y 28.5 мкс	
Время ПЭП 1,6 мкс	До ВРЧ 00 дБ	Форма	-11	
Стрела 0 мм	После ВРЧ 00 дБ			

Рис. 2. Протокол ультразвукового контроля дефектоскопом



На этапе научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы разработана схема программно-аппаратного комплекса для контроля внутренних дефектов и остаточного ресурса инженерных конструкций, предложена методика выявления внутренних дефектов в деталях из композиционных материалов и определение остаточного ресурса инженерных конструкций методами ультразвукового сигнала на стадии заготовительной операции и в процессе механической обработки (рис. 3).

В результате проведенных лабораторных исследований с использованием «ПАККВД-1» на глубине 25,9 мм у исследуемого образца были обнаружены недопустимые дефекты, что подтверждается превышением амплитуды колебаний уровня выбраковки на 5 дБ. Дальнейшее использование такой заготовки для изготовления продукции не допускается.

Основные принципы работы программно-аппаратного комплекса

1. Объектом контроля являются изделия из стеклопластика, в данном случае представлен сосуд для нефтехимической промышленности.
2. На объект контроля устанавливаются датчики сканирования УЗК, предварительно настроенные по эталону.
3. Определение наличия внутренних дефектов в структуре материала.
4. Передача результатов по спутниковой системе ГЛОНАСС или GPS на портативный компьютер с установленным специальным программным обеспечением, с помощью которого обрабатывается полученная информация и выносится вердикт об отсутствии дефектов или их наличии, а также осуществляется прогнозирование остаточного ресурса.

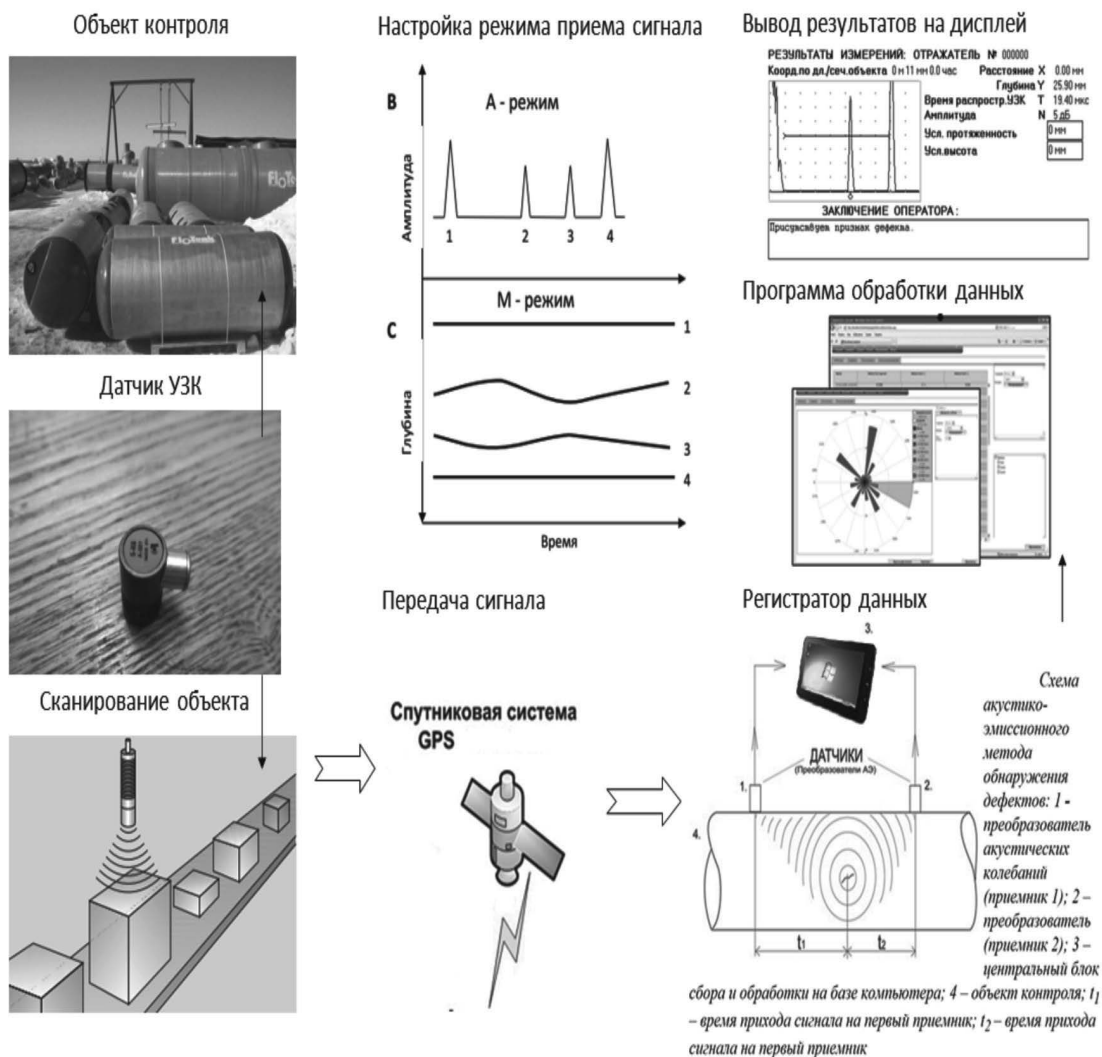


Рис. 3. Схема программно-аппаратного комплекса для контроля внутренних дефектов и остаточного ресурса инженерных конструкций

Отличительные признаки создаваемого продукта «Программно-аппаратный комплекс для контроля внутренних дефектов и остаточного ресурса инженерных конструкций» – это использование нелинейного синтеза для ультразвукового контроля, реализуемого дефектоскопом; возможность применения для инженерных конструкций и деталей из стеклопластика; передача данных при работе программно-аппаратного комплекса, осуществляемая с помощью GPS-связи. В результате проведения научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы и разработки программно-аппаратного комплекса планируется подать заявку на официальную регистрацию полезной модели дефектоскопа.

Апробация результатов исследования: первичную апробацию предполагается провести в Метрологическом центре, действующем при Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова, который оборудован видеосканерами для визуального контроля, программным обеспечением для выявления дефектов типа усталостных трещин на поверхности деталей протяженностью от 3 мм, с раскрытием в пределах от 0,05 до 1 мм из немагнитных и ферромагнитных сплавов плоских и криволинейных поверхностей с радиусом положительной и отрицательной кривизны до 20 мм.

После регистрации полезной модели дефектоскопа и апробации планируется предложить к внедрению программно-аппаратный комплекс для контроля внутренних дефектов и остаточного ресурса инженерных конструкций на следующих предприятиях.

1. Производственные предприятия, работающие с композиционными материалами: ООО «Проектный центр Бийского котельного завода», г. Бийск, ООО «ТрансМаш», г. Барнаул; ООО «Бийский завод стеклопластиков», г. Бийск; ООО «Стеклопластик», г. Бийск; ООО «Завод ПК «Стеклокомпозит», г. Рязань и др.

2. Центры профессиональной экспертизы: ООО «Центр независимой профессиональной экспертизы «Алтай-Эксперт», г. Барнаул; ЗАО «Профессиональный центр оценки и экспертизы», г. Москва; ООО «Центр независимых экспертиз», г. Нижний Новгород и др.

3. Лаборатории неразрушающего контроля: ООО «Вятский аттестационный центр», г. Ки-

ров, Лаборатория неразрушающего контроля и диагностики ООО «Международная Горно-промышленная компания», г. Екатеринбург и др.

4. Метрологические центры: ООО «Метрологический центр», г. Ангарск; Метрологический центр ООО «СТП», г. Казань и др.

Выводы

В результате проведенного исследования показана его своевременность, актуальность и необходимость проведения исследования в данной области, сформулированы цели и задачи, произведен патентный поиск аналогов разрабатываемого программно-аппаратного комплекса, разработана схема программно-аппаратного комплекса для контроля внутренних дефектов и остаточного ресурса инженерных конструкций, методика выявления внутренних дефектов в деталях из композиционных материалов и определение остаточного ресурса инженерных конструкций методами ультразвукового сигнала на стадии заготовительной операции и в процессе механической обработки.

Список литературы

1. *Рогов В.А., Позняк Г.Г.* Современные машиностроительные материалы и заготовки: учебное пособие. – М.: Академия, 2008. – 336 с. – ISBN 978-5-7695-4254-1.

2. *Обработка металлов резанием: справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм, В.Ф. Безъязычный, В.С. Волков, Л.Б. Гай, В.А. Гречишников, А.И. Зайцев, С.В. Кирсанов, В.И. Кокарев, Г.А. Лавров, Б.В. Медведь, В.Б. Савин, А.П. Соловьев, А.З. Старосельский, А.Г. Схиртладзе, А.С. Тарапанов, З.А. Фарберов, Г.А. Харламов, Л.Н. Чеканова, Л.Б. Чернявский, Н.П. Шестаков; под общ. ред. А.А. Панова.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2004. – 784 с. – ISBN 5-94275-049-1.

3. *Марков А.М.* Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов // *Наукоемкие технологии в машиностроении.* – 2014. – № 7 (37). – С. 3–8.

4. *Мозговой Н.И., Мозговая Я.Г.* Исследования влияния физико-механических свойств стеклопластиков на процесс резания // *Вестник алтайской науки.* – 2013. – № 2-1. – С. 15–20.

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



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

7. *Мозговой Н.И., Мозговая Я.Г., Пашикова Е.А.* Экспериментальные исследования внутренних дефектов пластичных материалов методом неразрушающего контроля // Инновации в машиностроении: материалы VII международной научно-практической конференции, 23–25 сентября 2015 г. – Кемерово, 2015. – С. 512–515.

8. *Мозговой Н.И., Мозговая Я.Г., Пашикова Е.А.* Применение акустического метода контроля для деталей из композиционных материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 3 (68). – С. 42–48. – doi: 10.17212/1994-6309-2015-3-42-48.

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

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

11. *Калиниченко Н.П., Калиниченко А.Н.* Визуальный и измерительный контроль: учебное пособие / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 300 с.

12. РД 03–606–03. Инструкция по визуальному измерительному контролю [Электронный ресурс]:

утв. Постановлением Госгортехнадзора России от 11.06.2003 № 92: зарег. 20.06.2003: введ. в действие 17.07.2003. – М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2003. – 101 с. – URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4294816/4294816743.pdf> (дата обращения: 11.11.2016).

13. *Ультразвуковой эхо-импульсный метод неразрушающего контроля [Электронный ресурс]: электронные методические указания к лабораторным работам / Самарский государственный аэрокосмический университет; сост: Д.Ю. Киселев, И.М. Макаровский.* – Самара: СГАУ, 2010. – 15 с. – URL: http://www.ssau.ru/files/education/metod_1/Киселев Д.Ю. Ультразвуковой эхо-импульсный.pdf (дата обращения: 11.11.2016).

14. *Каневский И.Н., Сальникова Е.Н.* Неразрушающие методы контроля: учебное пособие. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.

15. *Ермолов И.Н., Ланге Ю.В.* Неразрушающий контроль. В 7 т. Т. 3. Ультразвуковой контроль: справочник / под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с. – ISBN 5-217-03224-3.

16. *Measurement technologies. Remote visual inspection.* – USA: General Electric Company, 2007.

17. *Hubben E.B., Jervis D.* Advances in three dimensional measurement in remote visual inspection [Electronic resource] // Proceedings 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16–20 April 2012, Durban, South Africa. – URL: http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/320_wcndtfinal00320.pdf (accessed: 11.11.2016).

OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4 (73), October – December 2016, Pages 6–15

Development of hardware and software for the control of internal defects and residual resource of engineered structures and parts made of fiberglass

Mozgovoy N.I., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: nick_3@mail.ru

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

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

Abstract

The identification of defects in advanced composite materials by the means of ultrasonic signal is considered and analysis of the residual resource of engineered structures is made. The main defects in the structure of composite materials are the following: displacement, rotation and warping of the individual layers of the reinforcing material; superficial swelling, separation, distortion; increased porosity, cracks, sinks, uneven shrinkage materials; reduction in adhesion of the binder and filler, and others.

The early recognition of defects and forecasting of the residual resource of engineered structures gives the opportunity to avoid the loss of sealing of engineered parts and structures, environmental problems concerned with the

destruction of pipelines. Undetected internal defects can not only lead to significant economic losses, environmental pollution, but also to the loss of human life.

The working conditions of the plastic materials, especially composites, are widely used for replacement of parts and components made of rare materials, ferrous and nonferrous metals and alloys based on them, working in hostile environments. This makes it possible to improve the reliability and durability of the structure as a whole.

However, in modern working conditions to evaluate the quality of products a lot of enterprises have to selectively destroy the integrity of the samples under investigation in the control of material properties. From an economic point of view, this leads to an increase of the production cycle and the cost of production.

A method of ultrasonic diagnostics using hardware-software complex, allowing to reveal internal defects, the presence of inclusions or inhomogeneities on the structure of the composite material without destroying the product, to reduce the economic, environmental and human costs is offered.

Keywords

non-destructive testing, ultrasound, composite materials, surface quality, process control, material handling, engineered structures resource.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-6-15

References

1. Rogov V.A., Poznyak G.G. *Sovremennye mashinostroitel'nye materialy i zagotovki* [Modern engineering materials and blanks]. Moscow, Academia Publ., 2008. 336 p. ISBN 978-5-7695-4254-1.
2. Panov A.A., Anikin V.V., Boim N.G., Bez'yazychnyi V.F., Volkov V.S., Gai L.B., Grechishnikov V.A., Zaitsev A.I., Kirsanov S.V., Kokarev V.I., Lavrov G.A., Medved' B.V., Savin V.B., Solov'ev A.P., Starosel'skii A.Z., Skhirtladze A.G., Tarapanov A.S., Farberov Z.A., Kharlamov G.A., Chekanova L.N., Chernyavskii L.B., Shestakov N.P. *Obrabotka metallov rezaniem: spravochnik tekhnologa* [Metalcutting: directory of industrial engineer]. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 784 p. ISBN 5-94275-049-1.
3. Markov A.M. Tekhnologicheskie osobennosti mekhanicheskoi obrabotki detalei iz kompozitsionnykh materialov [Technological features of machining of parts from composite materials]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii – Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2014, no. 7 (37), pp. 3–8.
4. Mozgovoy N.I., Mozgovaya Ya.G. Issledovaniya vliyaniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv stekloplastikov na protsess rezaniya [Research of influence of physical and mechanical properties of the cutting process fiberglass]. *Vestnik altaiskoy nauki – Bulletin of the Altai Science*, 2013, no. 2-1, pp. 15–19.
5. Mozgovoy N.I., Markov A.M., Dots M.V. *Stekloplastik i osobennosti ego mekhanicheskoi obrabotki* [Glass-fiber material and features of its machining]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2012. 100 p.
6. Mozgovoy N.I., Markov A.M., Mozgovaya Ya.G. Problemy i perspektivy primeneniya plasticheskikh materialov dlya detalei mashinostroeniya [Problems and perspectives of the use of plastic materials for machine parts]. *Polzunovskii al'manakh – Polzunov Almanac*, 2013, no. 2, pp. 92–95.
7. Mozgovoy N.I., Mozgovaya Ya.G., Pashkova E.A., [Experimental studies of internal defects of plastic materials by non-destructive testing]. *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. 512–515. (In Russian)
8. Mozgovoy N.I., Mozgovaya Ya.G., Pashkova E.A. Primenenie akusticheskogo metoda kontrolya dlya detalei iz kompozitsionnykh materialov [The use of acoustic control method for parts made of composite materials]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2015, no. 3 (68), pp. 42–48. doi: 10.17212/1994-6309-2015-3-42-48
9. Bondar' E.B., Markov A.M. Problemy obrabotki plastmass rezaniem [Problems processing plastic cutting]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2004, no. 2, pp. 20–21.
10. Kobelev A.G., Sharonov M.A., Kobelev O.A., Sharonova V.P. *Materialovedenie. Tekhnologiya kompozitsionnykh materialov* [Materials science. The technology of composite materials]. Moscow, Knorus Publ., 2014. 270 p.
11. Kalinichenko N.P., Kalinichenko A.N. *Vizual'nyi i izmeritel'nyi kontrol'* [Visual and measurement control]. Tomsk, TPU Publ., 2009. 300 p.
12. RD 03–606–03. Instruction for the visual and measurement control. Moscow, STC “Industrial Safety” Publ., 2004. 101 p. (In Russian) Available at: <http://gostrf.com/normadata/1/4294816/4294816743.pdf> (accessed 11.11.2016)

13. Kiselev D.Yu., Makarovskii I.M., comps. *Ul'trazvukovoi ekho-impul'snyi metod nerazrushayushchego kontrolya* [The ultrasonic pulse-echo method of nondestructive test]. Available at: http://www.ssau.ru/files/education/metod_1/Киселев Д.Ю. Ультразвуковой эхо-импульсный.pdf (accessed 11.11.2016)

14. Kanevskii I.N., Sal'nikova E.N. *Nerazrushayushchie metody kontrolya* [Nondestructive inspection methods]. Vladivostok, DVG TU Publ., 2007. 243 p.

15. Ermolov I.N., Lange Yu.V. *Nerazrushayushchii kontrol'*. V 7 t. T. 3. *Ul'trazvukovoi kontrol'*: spravochnik [Nondestructive inspection. In 7 vol. Vol. 3. Ultrasonic inspection. Reference]. Ed. by V.V. Klyuev. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 864 p. ISBN 5-217-03224-3.

16. *Measurement technologies. Remote visual inspection*. USA, General Electric Company, 2007.

17. Hubben E.B., Jervis D. Advances in three dimensional measurement in remote visual inspection. *Proceedings 18th World Conference on Nondestructive Testing*, Durban, South Africa, 16–20 April 2012. Available at: http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/320_wcndtfinal00320.pdf (accessed 11.11.2016)

Article history

Received 13 October 2016

Revised 3 November 2016

Accepted 15 November 2016

РАЗРУШЕНИЕ АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН ПРИ ШЛИФОВАНИИ*

В.Ю. ПОПОВ, канд. техн. наук, доцент
А.С. ЯНЮШКИН, доктор техн. наук, профессор
А.Н. ХЛЫСТОВ, магистрант
(БрГУ, г. Братск)

Поступила 3 октября 2016
Рецензирование 17 октября 2016
Принята к печати 4 ноября 2016

Попов В.Ю. – 665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40,
Братский государственный университет,
e-mail: berkutoff@rambler.ru

Анализ современных трендов в области обработки металлов показывает, что в настоящее время алмазный инструмент находится на пике своей популярности, опережая по количеству поисковых запросов в Интернете инструмент из кубического нитрида бора, карбида кремния зеленого и электрокорунда. Более того, прослеживается тенденция на стабильное увеличение интереса металлообрабатывающей промышленности и машиностроительного комплекса к алмазным шлифовальным кругам. Подобная популярность объясняется тем, что производство на базе последних научных исследований научилось эффективно применять инструмент из синтетического алмаза. Однако, как показала практика, каждый алмаз имеет различные дефекты, которые оказывают характерное воздействие на его разрушение и износ, что следует учитывать при эксплуатации приборов и изделий, содержащих алмазы.

Ключевые слова: комбинированная электроалмазная обработка, синтетический алмаз, адгезия, компьютерная визуализация, молекулярная динамика.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-16-23

Введение

С того момента, как в металлорежущем инструменте стал применяться синтетический алмаз, исследователей интересовали причины образования засаленного слоя на поверхности алмазных шлифовальных кругов. В настоящее время поиск ответа на данный вопрос является актуальным как с точки зрения фундаментальной науки, так и компьютерного моделирования объектов физики твердого тела, что стало возможным в результате стремительного развития информационных технологий, внедрения их во все сферы науки и техники.

Научные работы многих авторов служат основой для расширения технологических возможностей алмазного инструмента при решении актуальных производственных задач во многих

областях науки и техники. Но и они не в полной мере раскрывают физические аспекты образования засаленного слоя. Дело здесь даже не в том, что частично наукой были определены разнообразные способы минимизации засаливания, а в том, что с «самым главным» режущим инструментом – алмазным поиск этих способов все еще не закончен. Поэтому исследователям остается лишь констатировать, что хотя круги из кубического нитрида бора менее пригодны для шлифования керамических, сверхтвердых, труднообрабатываемых материалов, современных инструментальных наноматериалов, производство все же вынуждено было применять их там, где предпочтительнее было использовать алмаз [1].

Вероятно, ответ на данный вопрос можно найти только на стыке разных областей –

* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ, код проекта: 927.

физики твердого тела, материаловедения, синтеза алмаза, резания металлов. Объединить знания и наглядно показать, визуализировать все нюансы процесса резания представляется возможным при помощи компьютерного моделирования шлифования методами молекулярной динамики [2].

Различные аспекты теории и практики технологии шлифования рассмотрены в работах: Г.В. Бокучавы, А.С. Васильева, М.Б. Гордона, А.И. Грабченко, И.П. Захаренко, А.Н. Короткова, С.Н. Корчака, Т.Н. Лоладзе, Г.Б. Лурье, Л.Л. Мишнаевского, А.А. Панова, С.И. Петрушина, В.Н. Подураева, Ю.В. Полянскова, С.А. Попова, А.И. Промптова, Х.М. Рахиянова, С.Г. Редько, А.Н. Резникова, В.В. Рыжова, Ф.М. Седыкина, М.Ф. Семко, А.Г. Сулова, И.Х. Чеповецкого, А.В. Якимова, А.С. Ямникова, П.И. Ящерицина и др. Вопросам обеспечения работоспособности алмазных кругов, а также исследованию контактного взаимодействия посвящены работы ученых: С.Н. Корчака, Е.П. Мельниковой, А.Ю. Попова, Ю.М. Правикова, А.В. Репко, А.Н. Унянина, Л.В. Худобина, С.С. Черепанова, В.С. Шоркина, А.С. Янюшкина, а также ряда зарубежных ученых: J. Badger, Guo Changsheng, P. Chevrier, R.S. Hahn, M. Hitchiner, I. Inasaki, R.I. King, I.D. Marinescu, S. Murphy, G.E. O'Donnell, P. Padilla, W.B. Rowe, O. Sinot, M. Stephen, Taghi Tawakoli, E. Uhlmann и др.

Проблемы физики и материаловедения синтетических алмазов исследованы в работах: Г.Н. Безрукова, Г.П. Богатыревой, Г.Б. Бокия, В.Г. Винса, Ю.А. Ключева, В.А. Надолинного, А.М. Налетова, В.И. Непша, Н.В. Новикова, В.А. Петровского, Д.В. Сивухина, Е.В. Соболева, Н.А. Солоповой, А.Е. Сухарева, А.И. Чепурова, А.А. Ширяева, а также ряда зарубежных ученых: С.Р. Miranda, J. Bruley, W. Kaiser, W.L. Bond, J.H. Chen, P.B. Hirsch, P. Pirouz, J.C. Barry. Все авторы согласны с тем, что наличие различного вида дефектов в алмазах оказывает сильное влияние на их физические свойства (механические, магнитные, электрические и пр.) и влияет на их термостойкость [3–8].

Известно, что в процессе комбинированного электроалмазного шлифования на сам шлифовальный инструмент оказывает внешнее воздействие, состоящее из давления в зоне резания, температуры, процессов окисления, влияния электрического тока, электроэрозионных про-

цессов и пр. Соответственно и поведение алмаза, находящегося в шлифовальном инструменте, будет зависеть от характера этого воздействия [9–12].

Методика исследования

В экспериментах применялся алмазный чашечный круг на металлической связке: АС6 80/63 М1 100%, $D = 125$ мм, $b = 15$ мм, где АС6 – шлифпорошок из синтетических монокристаллических алмазов повышенной прочности. С помощью растровой электронной микроскопии исследовался образец поверхности алмазного шлифовального круга после операции шлифования быстрорежущей стали Р6М5. Обработка осуществлялась всухую с целью засаливания поверхности круга [13–15].

Для получения фотографий синтетических алмазов, не участвовавших в процессе резания, а следовательно, находящихся внутри металлической связки шлифовального круга, использовался растровый электронный микроскоп Carl Zeiss EVO50. Образцы с алмазоносным слоем разламывались и изучалась поверхность такого разлома. Подобный подход позволяет также с высокой точностью определить и толщину засаленного слоя, в том числе, если это необходимо, химический анализ ее состава встроенным химическим анализатором EDS X-Act (Oxford Instruments).

Для решения актуальной задачи причин образования засаленного слоя, для предсказательного моделирования в области материаловедения [16] при разработке новых конструкционных и функциональных наноматериалов была осуществлена визуализация ювенильных поверхностей на атомном уровне [2]. Это нашло отражение в компьютерной 3D-графике и видео*, демонстрируя возможности атомистического моделирования статической структуры материалов, а также моделирования процесса их резания.

Таким образом, эксперименты были разделены на две части: в первой части – получались изображения разрушенных (или дефектных) алмазных зерен на поверхности алмазного шлифовального круга, во второй части – эти разрушения (или дефекты) моделировались на атомном уровне и визуализировались.

* Видео размещено на сайте, по адресу: alexiy.nl/category/blcl/

Атомистическое моделирование

Традиционное математическое описание не обладает достаточной наглядностью для демонстрации трудных для понимания аспектов атомистической трибологии резания металлов, где одновременно протекают разные по своей физической природе процессы. Единственным способом восполнить этот пробел является молекулярно-динамическое (МД) моделирование. В этой части работы использовались методы молекулярной динамики для визуализации динамических, скоротечных изменений, происходящих при шлифовании, где преобладают процессы, невозможные для непосредственного наблюдения никакими иными инструментальными средствами. Для визуализации поверхностей, в отличие от их молекулярного моделирования, достаточно подобрать масштаб таким образом, чтобы визуальная картина отличалась наибольшей наглядностью тех изменений, которые происходят в атомной структуре во время резания. Было определено [2], что наиболее просто (с точки зрения математического аппарата) реализовать визуализацию ювенильных поверхностей по атомам, когда профили обрабатываемой поверхности и алмазного зерна задаются в виде блока атомов с соответствующей кристаллической решеткой. В этом случае поверхность представляется как плоскость, состоящая из элементарных блоков (кластеров) кристаллических решеток.

Была создана адекватная динамичная (т. е. в движении) 3D-модель царапания алмазным зерном поверхности быстрорежущей стали, основанная на ранее выполненных фундаментальных и прикладных исследованиях [13–15]. Для проверки адекватности моделирования проводилось сравнение профилей, полученных после электроалмазной обработки и МД-моделирования. Сравнение показало достаточно хорошее совпадение параметров поверхностей.

Результаты и обсуждение

При исследовании процесса шлифования [17–20], моделировании его закономерностей [21–24] необходимо учитывать воздействие точечных и объемных дефектов внутри зерна алмаза, так как именно они ответственны за их разрушение и износ. Так, расчетная прочность алмаза с «идеальной» кристаллической структурой достигает $10\,000\text{ Н/мм}^2$, но, как показывает практика, прочность реального алмаза в $100\dots 1000$ раз меньше [25].

При анализе полученных при помощи растровой электронной микроскопии изображений видно (рис. 1), что даже на поверхности не участвовавших в процессе резания алмазных зерен (рис. 1, а), а также на их гранях присутствуют

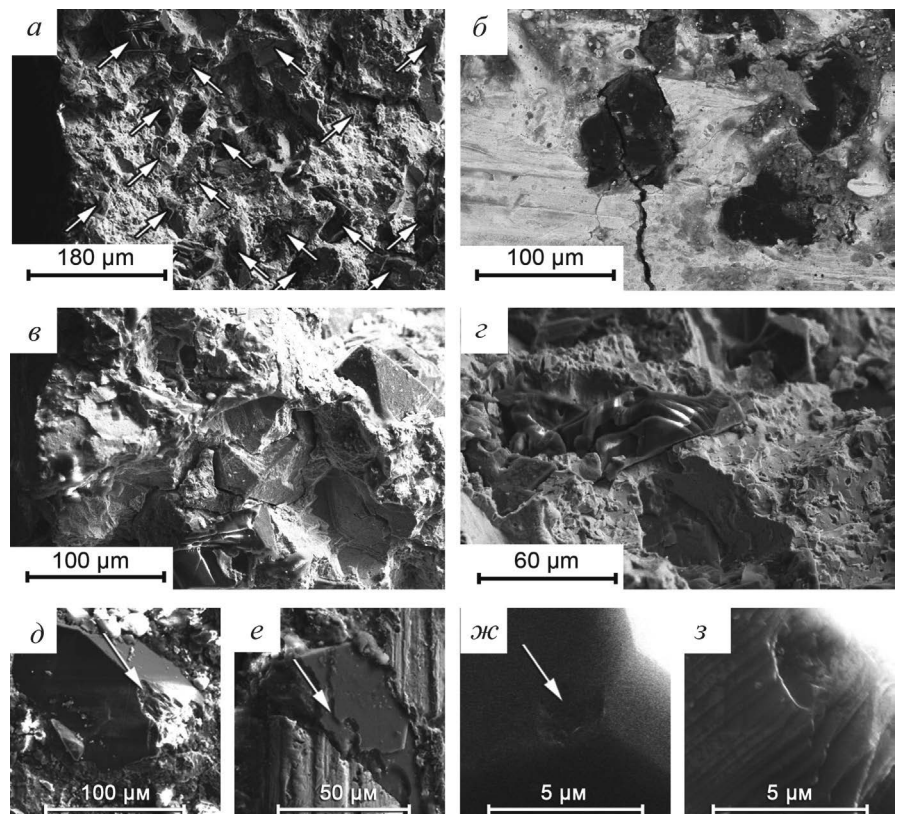


Рис. 1. Внешние картины алмазных зерен в связке шлифовального круга:

а – зерна с нарушениями кристаллической структуры (показаны стрелками); б – зерно, находящееся в засаленном слое и треснувшее вместе с ним в результате внутреннего дефекта; в – зерна в разломе связки со следами объемных микродефектов; г – отдельное зерно в разломе связки со следами пластинчатых дефектов кристаллической решетки; д – объемное разрушение вершины алмаза в виде макроскола; е – износ режущей поверхности алмаза по микрослоям роста, которые находятся в диапазоне $0,2\dots 4\text{ мкм}$; ж – объемное разрушение вершины алмаза в виде микроскола; з – износ режущей поверхности алмаза по нанослоям роста, которые находятся в диапазоне $10\dots 300\text{ нм}$

характерные следы нарушения кристаллической структуры на микро- и макроуровнях. Это свидетельствует о том, что алмазными зернами дефекты приобретаются во время их синтеза и последующего отжига, о чем неоднократно упоминали авторы работ [3–12]. Эти дефекты при совокупном воздействии высокой температуры и увеличении сил резания при шлифовании взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью на атомном уровне.

Однако несмотря на сами дефекты, большинство алмазных зерен шлифовального круга во время шлифования все-таки сохраняют свою форму и целостность, пусть она и несет на себе следы «неидеальной», синтетической природы. В то же время существование в зернах разнообразных точечных (рис. 2, *а, б*) и объемных (рис. 2, *в, г*) дефектов, а, как правило, их совокупности (рис. 1, *в*) и являются причиной определенного характера их разрушения при шлифовании.

Так, объемное разрушение вершины зерна алмаза по расположенным на его поверхности микротрещинам может происходить в виде макроскола (рис. 1, *з, д*) и микроскола (рис. 1, *ж*). Это объясняется тем, что зерно синтетического алмаза, вырастая, формируется из ступеней ро-

ста (рис. 1, *з*), поэтому при шлифовании происходит разрушение поверхности алмаза по его:

- макрослоям, которые находятся в размерном диапазоне от 10 до 300 нм (рис. 1, *з, ж*; рис. 2, *г*);

- микрослоям, в диапазоне от 0,2 до 4 мкм (рис. 1, *е*).

Как правило, микро- и макрослои представляют собой блоки кристаллической решетки, между которыми могут располагаться как обычные трещины, так и трещины, заполненные металлическими включениями, что было также учтено при моделировании дефектов на поверхности алмазных зерен (рис. 2, *д, е*).

Следует отметить, что визуализация статической модели алмазного зерна (рис. 2) содержит более 850 тысяч атомов. Этого количества достаточно для того, чтобы в дальнейшем при моделировании процесса резания (шлифования) увеличить глубину проникновения модели алмазного зерна в модель обрабатываемой поверхности. Такой подход позволит на атомном уровне показать, где именно на алмазоносной поверхности начинает образовываться засаленный слой и почему.

Таким образом, комплексное исследование состояния поверхности шлифовального круга показало [13–15], что вне зависимости от условий обработки в связке круга одновременно наблюдаются алмазные зерна с разными видами разрушения и износа. Очевидно, это объясняется тем, что дефекты создают в зернах неравномерные напряжения. В процессе шлифования возникает деформация, вызывающая сближение точечных дефектов, а частицы сошлифованного материала, попадая в микротрещины и провоцируя образование засаленного слоя, распирают их, вызывая тот или иной вид разрушения и износа.

Выводы

Рис. 2. Компьютерная визуализация точечных и объемных дефектов на поверхности алмазных зерен:

а – точечный дефект в кристаллической структуре зерна; *б* – множество точечных дефектов на поверхности зерна; *в* – совокупность пластинчатых (объемных) и точечных дефектов; *г* – ступени роста; *д* – трещина в зерне, содержащая внутрикристаллические металлические включения сплава-растворителя; *е* – трещина в зерне

1. Разрушение алмазного зерна происходит, как правило, по объемным дефектам, имеющим протяженность от нанометров до нескольких микрометров и представляющим собой блоки кристаллической решетки, между

которыми располагаются как обычные трещины, так и трещины, заполненные металлическими включениями.

2. Разрушение алмазного зерна при шлифовании происходит в результате взаимодействия на атомном уровне процесса образования засаженного слоя с дефектами в алмазных зернах.

Список литературы

1. *Rowe W.B.* Principles of modern grinding technology. – 2nd ed. – Oxford: Elsevier, 2014. – 480 p. – ISBN: 978-0-12-810166-7.

2. *Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В.* Атомная визуализация алмазного резания // Компьютерные исследования и моделирование. – 2016. – Т. 8, № 1. – С. 161–172.

3. *Voidites in polycrystalline natural diamond / J.H. Chen, D. Bernaerts, J.W. Seo, G. Van Tendeloo, H. Kagi // Philosophical Magazine Letters.* – 1998. – Vol. 77 (3). – P. 135–140. – doi: <http://dx.doi.org/10.1080/095008398178561>.

4. Включения в кристаллах синтетических алмазных высокопрочных порошков / Н.В. Новиков, Г.П. Богатырева, Г.Д. Ильницкая, Г.Ф. Невструев, Г.А. Петасюк, В.Н. Ткач, Р.К. Богданов, А.М. Исонкин, А.П. Загора, И.Н. Зайцева // Физика и техника высоких давлений. – 2009. – Т. 9, № 2. – С. 48–53.

5. Фундаментальные и прикладные исследования микро- нанополикристаллических алмазных агрегатов и их практическое применение / В.А. Петровский, А.Е. Сухарев, В.П. Филоненко, С.Н. Виноградов // Минералого-технологическая оценка месторождений полезных ископаемых и проблемы раскрытия минералов: сборник статей по материалам V Российского семинара по технологической минералогии. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. – С. 190–196. – ISBN 978-5-9274-0460-5.

6. *Винс В.Г.* Оптически активные дефекты в алмазе – закономерности образования и взаимной трансформации: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 / Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2011. – 252 с.

7. *Ширяев А.А.* Дефекты и микровключения в алмазах как индикаторы условий кристаллообразования и постростовых изменений: дис. ... д-ра хим. наук: 02.00.21 / Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет». – М., 2013. – 251 с.

8. *Солопова Н.А.* Кристаллизация алмаза в карбонатных расплавах минералогического значения (эксперимент при 5,5–84,0 ГПа): дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.05 / Федеральное государ-

ственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет». – М., 2014. – 112 с.

9. Зависимость прочности алмазных шлифпорошков от структуры кристаллов алмаза / Н.В. Новиков, Г.П. Богатырева, Г.Ф. Невструев, Г.Д. Ильницкая, И.Н. Зайцева // Физика и техника высоких давлений, 2007. – Т. 17, № 2. – С. 96–99.

10. Влияние прочностных характеристик алмазных шлифпорошков на работоспособность бурового инструмента / Н.В. Новиков, Г.П. Богатырева, Р.К. Богданов, Г.Д. Ильницкая, А.М. Исонкин // Сверхтвердые материалы. – 2009. – № 6. – С. 75–80.

11. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении / П.В. Зыбинский, Р.К. Богданов, А.П. Загора, А.М. Исонкин. – Донецк: Норд-Пресс, 2007. – 244 с.

12. Влияние обработки высоковольтным электрическим разрядом на морфометрические характеристики алмазных порошков / Г.П. Богатырева, О.Н. Сизоненко, Н.А. Олейник, Г.А. Петасюк, Г.Д. Ильницкая, В.С. Шамраева, Г.А. Базалий, Э.И. Тафтай, А.Д. Зайченко, А.С. Торпаков, Е.В. Липян // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сборник научных трудов. – Киев: Изд-во ИСМ им. В.М. Бакуля НАН Украины, 2011. – Вып. 14. – С. 272–277.

13. *Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Zamashchikov Y.I.* Diffusion phenomena in the combined electric diamond grinding // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 799–800. – P. 291–298. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.799-800.291.

14. *Popov V.Y., Yanyushkin A.S.* Adhesion-diffusion interaction of contact surfaces with the treatment diamond grinding wheels // Eastern European Scientific Journal. – 2014. – N 2. – P. 301–310. – doi: 10.12851/EESJ201404ART46.

15. *Popov V.Yu., Yanyushkin A.S.* Combined electrodiamond grinding of high speed steels // International Journal of Advances in Machining and Forming Operations. – 2012. – Vol. 4, N 1. – P. 91–102.

16. MD simulation of cluster-surface impacts for metallic phases: soft landing, droplet spreading and implantation / K. Kholmurodov, T. Ebisuzaki, I. Puzynin, W. Smith, K. Yasuoka // Computer Physics Communications. – 2001. – Vol. 141, iss. 1. – P. 1–16. – doi: [10.1016/S0010-4655\(01\)00292-2](http://10.1016/S0010-4655(01)00292-2).

17. Контактные процессы при алмазной обработке инструментальных материалов / В.Ю. Попов, А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, В.Ю. Скиба // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 3 (23). – С. 68–74.

18. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeebe, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 30,

iss. 12. – P. 1408–1411. – doi: 10.1080/10426914.2014.973595.

19. Шлифовальный инструмент на основе силикокарбида титана / Г.И. Смагин, В.Н. Филимоненко, Н.Д. Яковлев, М.А. Корчагин, В.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 1. – С. 27–30.

20. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю.* Повышение поверхностной микротвердости стали при интеграции поверхностно-термической и финишной механической обработок // Научный вестник НГТУ. – 2006. – № 3. – С. 187–192.

21. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Пушкин В.Н.* Методика назначения режимов обработки при совмещении операций абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 4. – С. 19–25.

22. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyshkin, K.A. Parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 126. – P. 012016. – doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016.

23. *Ivancivsky V., Parts K., Popov V.* Depth distribution of temperature in steel parts during surface hardening by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 129–135. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.129.

24. *Zamashchikov Y.I.* Duality in metal cutting: impact to the surface layer residual stress // Materials and Manufacturing Processes. – 2006. – Vol. 21, iss. 5. – P. 551–566. – doi: 10.1080/10426910500471706.

25. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Физматлит, 1970. – 565 с.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4 (73), October – December 2016, Pages 16–23

About a destruction of diamond grains in the grinding process

Popov V.Y., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: berkutoff@rambler.ru

Yanyushkin A.S., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: yanyushkin@brstu.ru

Khlystov A.N., Master's Degree student, e-mail: alexey.khlystov@gmail.com

Bratsk State University, 40 Makarenko, Bratsk, 665709, Russian Federation

Abstract

An analysis of modern trends in the area of metal processing shows that at the moment the diamond tool is at the peak of its popularity. It can be confirmed by the fact that the diamond tools are stay ahead in the number of search queries on the Internet. It leaves behind tool made of cubic boron nitride, silicon carbide and green silicon carbide. Moreover, there is a tendency on the steady increase of interest to the diamond grinding wheel in the metal processing industry and mechanical engineering complex. This popularity is due to the fact that manufacturing based on the latest research learned how to effectively use the tools of synthetic diamond. However, experience shows that almost every diamond has various defects that have a characteristic influence on its destruction and deterioration that should be considered in the operation of devices and products containing diamonds. Defects occur in diamond crystals during its synthesis, give rise to the formation of more complex defects that occur in the operational process of diamonds. Under external influence these defects have immediate strong effect on production characteristics of devices, products or instruments containing diamonds. The analysis of the scanning electron microscopy images shows that even on the surface of the diamond grains and on their edges that are not involved in the process of cutting, there are typical traces of lattice disturbance both on micro and macro levels. This indicates that disturbance of the diamond grains usually happens due to bulk defects, which have a length of several nanometers to micrometers, and represent blocks of the crystal lattice, between which cracks and cracks are usually filled with metallic inclusions. A visualization method, developed on the basis of modern digital technology and molecular dynamics, shows it for atomic-scale.

Keywords

combined electro-diamond grinding, synthetic diamond, adhesion contact, computer simulation, molecular dynamics.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-16-23

References

1. Rowe W.B. Principles of modern grinding technology. 2nd ed. Oxford, Elsevier, 2014. 480 p. ISBN 978-0-12-810166-7.
2. Popov V.Y., Khlystov A.N., Bondin A.V. Atomnaya vizualizatsiya almaznogo rezaniya [Atomic visualization diamond cutting]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie – Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 161–172.
3. Chen J.H., Bernaerts D., Seo J.W., Tendeloo G. van, Kagi H. Voidites in polycrystalline natural diamond. *Philosophical Magazine Letters*, 1998, vol. 77 (3), pp. 135–140. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/095008398178561>
4. Novikov N.V., Bogatyreva G.P., Il'nitskaya G.D., Nevstruev G.F., Petasyuk G.A., Tkach V.N., Bogdanov R.K., Isonkin A.M., Zakora A.P., Zaitseva I.N. Vkluyucheniya v kristallakh sinteticheskikh almaznykh vysokoprochnykh poroshkov [Inclusions in crystals of synthetic diamond high-strength powders]. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii – High Pressure Physics and Technics*, 2009, vol. 19, no. 2, pp. 48–53.
5. Petrovskii V.A., Suharev A.E., Filonenko V.P., Vinogradov S.N. [Fundamental and applied study of micro-nanopolycrystalline diamond aggregates and their practical application]. *Mineralogo-tekhnologicheskaya otsenka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh i problemy raskrytiya mineralov: sbornik statei po materialam V Rossiiskogo seminara po tekhnologicheskoi mineralogii* [Proceedings of V Russian seminar on technological mineralogy “Mineralogical and technological evaluation of useful mineral deposits and problems in mineral opening”], Petrozavodsk, 2011, pp. 190–196. ISBN 978-5-9274-0460-5. (In Russian)
6. Vins V.G. *Opticheski aktivnye defekty v almaze – zakonomernosti ob-razovaniya i vzaimnoi transformatsii*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [The optically active defects in diamond – pattern formation and mutual transformation. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Barnaul, 2011. 252 p.
7. Shiryaev A.A. *Defekty i mikrovklyucheniya v almazakh kak indikator y uslovii kristalloobrazovaniya i postrostoyvykh izmenenii*. Diss. dokt. khim. nauk [Defects and micro-inclusions in diamonds as indicators of crystallization conditions and post-growth changes. Dr. chem. sci. diss.]. Moscow, 2013. 251 p.
8. Solopova N.A. *Kristallizatsiya almaza v karbonatnykh rasplavakh mine-ralogicheskogo znacheniya (eksperiment pri 5,5–84,0 GPa)*. Diss. dokt. tekhn. nauk [The crystallization of diamond in carbonate melts mineralogical value (experiment at 5,5–84,0 GPa). Dr. eng. sci. diss.]. Moscow, 2014. 112 p.
9. Novikov N.V., Bogatyreva G.P., Nevstruev G.F., Il'nitskaya G.D., Zaitseva I.N. Zavisimost' prochnosti almaznykh shlifporoshkov ot struktury kristallov almaza [Dependence of diamond grinding powder strength on structure of diamond crystals]. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii – High Pressure Physics and Technics*, 2007, vol. 17, no. 2, pp. 96–99.
10. Novikov N.V., Bogatyreva G.P., Bogdanov R.K., Il'nitskaya G.D., Isonkin A.M. Vliyanie prochnostnykh kharakteristik almaznykh shlifporoshkov na rabotosposobnost' burovogo instrumenta [The influence of strength characteristics of diamond grits on drilling tool performance]. *Sverkhтвердые материалы – Journal of Superhard Materials*, 2009, no. 6, pp. 75–80. (In Russian)
11. Zybinskii P.V., Bogdanov R.K., Zakora A.P., Isonkin A.M. *Sverkhтвердые материалы v geologorazvedochnom burenii* [Superhard materials in exploration drilling]. Donetsk, Nord-Press Publ., 2007. 244 p.
12. Bogatyreva G.P., Sizonenko O.N., Oleinik N.A., Petasyuk G.A., Il'nitskaya G.D., Shamraeva V.S., Bazalii G.A., Taftai E.I., Zaichenko A.D., Torpakov A.S., Lipyani E.V. [The influence of high-voltage electrical discharge machining on morfomet-torical characteristics of diamond powder]. *Porodorazrushayushchii i metalloobrabatvyvayushchii instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniya i primeneniya: sbornik nauchnykh trudov* [Proceedings of the V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine “Rock cutting and metalworking tools – equipment and technology of its manufacture and use”], 2011, iss. 14, pp. 272–277. (In Russian).
13. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Zamashchikov Y.I. Diffusion phenomena in the combined electric diamond grinding. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 799–800, pp. 291–298. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.799-800.291](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.799-800.291)
14. Popov V.Y., Yanyushkin A.S. Adhesion-diffusion interaction of contact surfaces with the treatment diamond grinding wheels. *Eastern European Scientific Journal*, 2014, no. 2, pp. 301–310. doi: [10.12851/EESJ201404ART46](https://doi.org/10.12851/EESJ201404ART46)
15. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. Combined electro-diamond grinding of high speed steels. *International Journal of Advances in Machining and Forming Operations*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 91–102.
16. Kholmurodov K., Ebisuzaki T., Puzynin I., Smith W., Yasuoka K. MD simulation of cluster-surface impacts for metallic phases: soft landing, droplet spreading and implantation. *Computer Physics Communications*, 2001, vol. 141, iss. 1, pp. 1–16. doi: [10.1016/S0010-4655\(01\)00292-2](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(01)00292-2)

17. Popov V.Y., Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., Skeebe V.Yu. Kontaktnye protsessy pri almaznoi obrabotke instrumental'nykh materialov [Contact processes in diamond processing of tool materials]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 3 (23), pp. 68–74.
18. Skeebe V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 12, pp. 1408–1411. doi: 10.1080/10426914.2014.973595
19. Smagin G.I., Filimonenko V.N., Yakovlev N.D., Korchagin M.A., Skeebe V.Yu. Shlifoval'nyi instrument na osnove silikokarbida titana [The grinding tool on a basis titan silicon carbide]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 1, pp. 27–30.
20. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu. Povyshenie poverkhnostnoi mikrotverdosti stali pri integratsii poverkhnostno-termicheskoi i finishnoi mekhanicheskoi obrabotok [Increased surface microhardness of steel in the integration of surface-thermal and mechanical finishing treatments]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 3, pp. 187–192.
21. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu., Pushnin V.N. Metodika naznacheniya rezhimov obrabotki pri sovmeshchenii operatsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh [Methods of appointment processing conditions when combining the operations of abrasive grinding and surface induction hardening]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 4, pp. 19–25.
22. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Kutyshkin A.V., Parts K.A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126, p. 012016. doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016
23. Ivancivsky V., Parts K., Popov V. Depth distribution of temperature in steel parts during surface hardening by high frequency currents. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 129–135. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.129
24. Zamashchikov Y.I. Duality in metal cutting: impact to the surface layer residual stress. *Materials and Manufacturing Processes*, 2006, vol. 21, iss. 5, pp. 551–566. doi: 10.1080/10426910500471706
25. Sivukhin D.V. *Obshchii kurs fiziki. Termodinamika i molekulyarnaya fizika* [General physics course. Thermodynamics and molecular physics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1970. 565 p.

Funding

This work performed under the state task. Registration number of research: 927.

Article history

Received 3 October 2016

Revised 17 October 2016

Accepted 4 November 2016

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЭНЕРГИИ ДЕФОРМАЦИИ НЕСУЩИХ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

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

В.Ю. СКИБА¹, канд. техн. наук, доцент

А.В. КИРИЛЛОВ^{1,3}, канд. техн. наук, доцент

О.В. МАКСИМЧУК², канд. техн. наук, доцент

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

Д.В. ЛОБАНОВ⁴, доктор техн. наук, профессор

И.С. ФИЛАТОВ¹, магистрант

П.Ю. СКИБА¹, студент

(¹НГТУ, г. Новосибирск,

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

³НГПУ, г. Новосибирск,

⁴БрГУ, г. Братск)

Поступила 17 августа 2016

Рецензирование 23 сентября 2016

Принята к печати 18 октября 2016

Подгорный Ю.И. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: pjui@mail.ru

Рассматриваются вопросы определения энергии деформации несущих систем технологических машин и энергетических соотношений между ними при выполнении технологических операций. Целью данной работы является выработка рекомендаций для модернизации конструкции несущих систем на примере ткацкого станка СТБ для выработки плотных тканей. Анализ научной литературы по данному направлению указывает на то, что вопросам влияния элементов несущих систем на систему заправки ткацкого станка уделено недостаточно внимания. Актуальность исследования обусловлена отсутствием единой методики, позволяющей задавать параметры несущих систем с учетом технологических требований и качества получаемого готового продукта. Для определения энергии деформации в работе рассмотрена расчетная модель ткацкого станка для выработки плотных тканей, включающая в себя неподвижное скало и подскальную трубу как опору для нитей основы. Средствами САД системы SolidWorks и конечно-элементного САЕ комплекса ANSYS определены значения энергии деформации несущей и скальной систем ткацкой машины СТБ-180, а также перемещений их конструктивных элементов в зависимости от технологического усилия, варьируемого в пределах 4000...10 000 Н. Анализ результатов проведенных расчетов показывает, что энергия деформации несущей системы и скал составляет около 25 % от полезной работы, идущей на формирование ткани, что говорит о необходимости повышения жесткостей несущей и скальной систем. В результате проведенных исследований предложена модернизированная конструкция станка для выработки плотных тканей, в которой предусмотрено введение дополнительных опор для неподвижного скало и подскальной трубы с опиранием на переднюю связь. Анализ результатов расчетов с учетом предложенной модернизации конструктивных элементов позволяет сделать вывод, что для станка модернизированной конструкции величина энергии деформации значительно уменьшается. Полученные результаты исследований позволили выработать конкретные рекомендации по модернизации конструкций несущей и скальной систем ткацких станков СТБ для выработки плотных и технических тканей.

Ключевые слова: несущая система, скальная система, система заправки ткацкого станка, технологическая машина, метод конечных элементов, энергия деформации, технологическая нагрузка, ткацкая машина СТБ.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-24-33

Введение

В настоящее время остро стоит задача технического перевооружения и реконструкции предприятий, оснащения их новыми высокопроизводительными станками. В частности, в текстильной отрасли актуальной является задача переоснащения предприятий текстильной промышленности, выпускающей тяжелые технические ткани. Модернизация производства ориентирована на значительный рост производительности труда за счет достижений научно-технического прогресса, создания нового технологического оборудования, разработка которого сдерживается из-за отсутствия общей теории для оценки параметров технологического процесса.

До настоящего времени в мировой практике преобладает интуитивный подход к разработке ткацких машин, выбору параметров заправочных элементов по глубине станка. Отсутствие научного подхода к определению и назначению параметров заправочных элементов и режимов работы не позволяет правильно оценивать возможности существующего оборудования и проектировать новое. При выработке плотных и технических тканей значительно возрастают требования к отдельным механизмам и станку в целом. В этом случае необходимо задавать параметры с учетом технологических требований и качества получаемого готового продукта.

Так, при выработке тканей массового производства используются станки с определенной заправочной схемой. Для выработки тяжелых технических тканей такие схемы не могут быть применены из-за больших деформаций элементов. В связи с этим поставлена задача проведения теоретических исследований существующих заправочных схем станка с целью определения их приемлемости для выработки плотных технических тканей. Также поставлены задачи: предложить критерии оценки поведения несущей системы в зависимости от технологических нагрузок, возникающих при формировании тканей; разработать методику комплексного исследования поведения элементов станка, имеющих непосредственный контакт с нитями основы и тканью; предложить метод, позволяющий производить увязку конструктивных особенностей

станков с технологическими параметрами выработываемых тканей, а также прогнозировать приемлемость отдельных видов станков для определенного ассортимента.

За последние годы опубликовано значительное количество работ по исследованию заправочных ткацких станков, в которых они рассматриваются с точки зрения технологических возможностей и качества получаемой ткани (работы Гордеева В.А., Ефремова Е.Д. и других авторов). В работах Гордеева В.А. показано, что для анализа процессов, происходящих на станке, необходимо учитывать упругие свойства нитей основы и ткани; исследовано влияние технологических нагрузок на процесс деформаций нитей основы в цикле работы станка, приведены рекомендации по определению приведенной жесткости [1–4]. Саввин О.А. в своих работах уделяет внимание проблемам определения деформаций основных нитей, исследования системы заправки ткацкого станка как механической системы с переменными параметрами, влияния сил трения нитей основы об элементы скальной системы на их взаимодействие с системой заправки [5–12]. Исследованию вопросов влияния конструктивных элементов скальной системы, величины технологических усилий на процесс формирования ткани посвящены работы С. Г. Степанова, В.Ю. Селиверстова, А.П. Гречухина, А.С. Шлыкова [13–15]. Имеется значительное количество работ ряда авторов, в которых рассмотрены вопросы повышения производительности ткацких машин с малогабаритными прокладчиками утка [16], распределения энергии при выработке тканей на ткацких машинах [17], выработки плотных тканей [18], оценки напряженности заправки ткацкого станка при изготовлении тканей различного переплетения, в том числе и плотных [19, 20], определения жесткости системы заправки [21, 22].

Анализ вышеперечисленных работ указывает на то, что в них решено большое количество проблем, связанных с влиянием различных элементов скальной системы на систему заправки ткацкого станка, однако вопросам влияния элементов несущих систем уделено недостаточно внимания.

При проектировании новых станков необходимо считаться с факторами конструктивного порядка, так как от того, насколько правильно

будут выбраны конструктивные параметры, напрямую зависит качество вырабатываемой ткани. При проектировании новых конструкций также необходимо учитывать упругие характеристики элементов несущих систем и энергетические соотношения между ними в моменты технологических операций, осуществляемых на станке [23–28]. Поэтому анализ существующих конструкций несущих систем, а также проектирование новых с измененными параметрами, является задачей актуальной.

Расчетная модель

В работах [29, 30] авторами была предложена универсальная расчетная модель несущей системы для гаммы бесчелночных станков СТБ. Главными элементами этой модели являются правая и левая рамы машины, передняя и задняя связи (рис. 1).

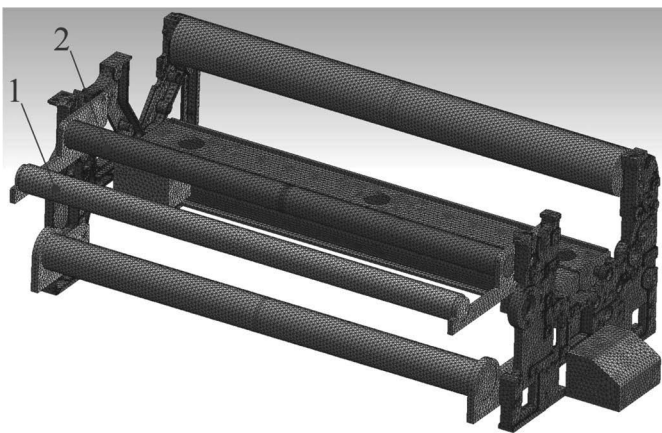


Рис. 1. Расчетная модель ткацкого станка для выработки плотных тканей:

1 – неподвижное скало; 2 – подскальная труба

При выработке на станках плотных и технических тканей нагрузки на несущую и скальную системы могут достигать 8000...10 000 Н, в связи с чем значительно возрастают деформации элементов этих систем, включая систему опор, с которыми контактируют нити основы и ткань. Энергия, расходуемая на деформацию станка, в этом случае достигает значительных величин. При этом полезной энергии, необходимой для формирования ткани, окажется недостаточно [1–3]. В связи с этим в расчетную модель необходимо ввести дополнительные элементы, позволяющие сократить энергию, которая идет на деформации всей несущей системы и скал.

В конструкции станка для выработки массового ассортимента тканей на станках серийного

производства предусмотрена скальная система, которая включает в себя подскальную трубу и подвижное скало. В этом случае заправка станка подразумевает направление нитей основы через подвижное скало.

В соответствии с данными, приведенными в [1–3], основные усилия, воспринимаемые элементами станка, приходится на подвижное скало, а подскальная труба только уменьшает деформацию несущей системы. Поэтому необходимо прежде всего создать такую конструкцию, которая бы одновременно уменьшала энергию деформации несущей системы и более равномерно распределяла полезную нагрузку на элементы станка. С этой целью при выработке плотных тканей предлагается в состав скальной системы ввести дополнительные конструктивные элементы: неподвижное скало, подскальную трубу как опору для нитей основы (рис. 2, элемент 2). Значения координат центров конструктивных элементов приведены в таблице.

Результаты и обсуждение

На основе разработанной модели, представляющей собой несущую систему и опоры для ткани (скальная система), был проведен расчет энергии деформации этих элементов, а также их перемещений в зависимости от тех-

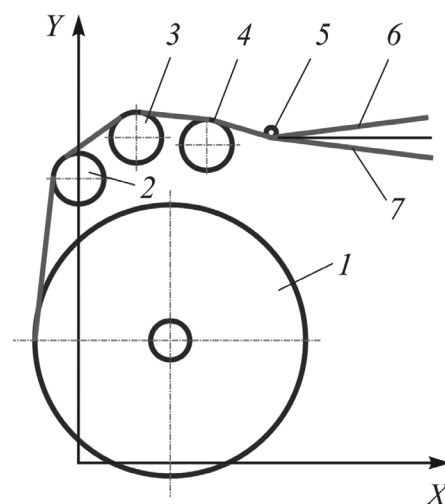


Рис. 2. Схема заправки ткацкого станка для выработки плотных тканей:

1 – навой; 2 – неподвижное скало; 3 – подвижное скало; 4 – подскальная труба; 5 – ценовый валик; 6, 7 – нити основы

Значения координат центров тяжести конструктивных элементов ткацкой машины СТБ

Номер (по схеме, рис. 2)	Конструктивный элемент	Координаты центров элементов станка, м		Диаметр, мм
		X	Y	
1	Навой	0,235	0,311	700
2	Неподвижное скало	0	0,725	128
3	Подвижное скало	0,148	0,829	128
4	Подскальная труба	0,326	0,803	80

нологического усилия, варьируемого в пределах 4000...10 000 Н. Расчеты были проведены средствами CAD системы SolidWorks и конечно-элементного CAE комплекса ANSYS. Результаты расчетов для ткацкой машины с заправочной шириной 180 см представлены в виде графиков, изображенных на рис. 3 и 4. На рис. 3 по вертикальной оси отложены значения энергии деформации, по горизонтальной – величина технологической нагрузки.

На рис. 4 в качестве примера изображены графики перемещения сечения, соответствующего середине неподвижного скало (как наиболее деформируемого элемента). По вертикальной оси отложены значения перемещений, по горизонтали – величина технологической нагрузки. При изменении технологической нагрузки в указанных пределах величина прогиба увеличивается от 2 до 4 мм.

Из практики эксплуатации ткацких станков известно, что величина полезной энергии, необ-

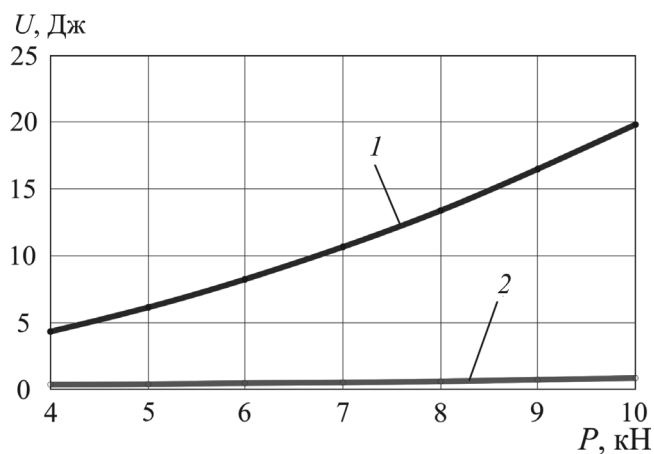


Рис. 3. График зависимости энергии деформации несущей и скальной систем от технологического усилия:

1 – для станка СТБ-180 серийной конструкции; 2 – для станка модернизированной конструкции

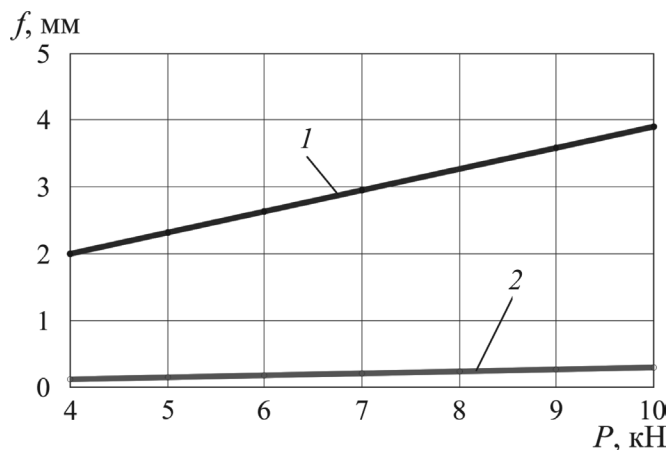


Рис. 4. График зависимости деформаций неподвижного скало от технологического усилия:

1 – для станка СТБ-180 серийной конструкции; 2 – для станка модернизированной конструкции

ходимой для формирования качественных плотных тканей, может достигать 80 Дж и более [1]. При этом энергия деформации элементов несущей и скальной систем составляет около 25 % от величины полезной энергии.

Как видно из графика, изображенного на рис. 3, суммарная энергия деформации несущей и скальной систем при технологическом усилии, равном 4000 Н, составляет около 4 Дж, а для 8300 Н (джинсовая ткань) – около 16,0 Дж. При этом величина прибойной полоски (накопленная остаточная деформация в нитях основы и ткани) равна 7 мм [1]. Тогда значение энергии, необходимой для формирования этой ткани, составит

$$U = 8300 \cdot 7 = 58\,100 \text{ Н} \cdot \text{мм} = 58,1 \text{ Дж.}$$

Таким образом, на деформацию несущей и скальной систем в рассматриваемом случае расходуется порядка 25 % от величины полезной энергии. При выработке тяжелых технических тканей эта величина возрастает. Для снижения величины энергии деформации и, следовательно,

повышения качества вырабатываемой ткани [1] необходимо увеличить жесткость системы.

В этой связи при выработке плотных тканей предложено модернизировать конструкцию скальной системы с целью увеличения ее жесткости путем введения дополнительных опор для ее элементов: рекомендуется ввести дополнительные опоры для неподвижного скала и подскальной трубы с опиранием на переднюю связь.

Расчеты показывают, что для станка модернизированной конструкции величина энергии деформации значительно снижается. Так, при нагрузке 4000 Н энергия деформации составила 0,3 Дж, а при нагрузке 10 000 Н – 0,85 Дж (см. рис. 3). При этом максимальные перемещения наиболее податливого элемента составили 0,26 мм при нагрузке 10 000 Н.

Выводы

1. Предложена расчетная модель ткацкого станка для выработки плотных тканей, включающая неподвижное скало и подскальную трубу как опоры для нитей основы.

2. На основе предложенной модели определены значения энергии деформации несущей и скальной систем ткацкого станка СТБ-180, которые изменяются в диапазоне от 4,3 до 19,8 Дж, а также перемещений их конструктивных элементов в зависимости от технологического усилия, варьируемого в пределах 4000...10 000 Н. Максимальные перемещения наиболее податливого элемента составили 4,5 мм при нагрузке 10 000 Н.

3. Проведенные расчеты показывают, что энергия деформации несущей системы и скала составляет около 25 % от полезной, что указывает на необходимость увеличения жесткостных характеристик несущей и скальной систем.

4. Предложена модернизированная конструкция станка для выработки плотных тканей, в которой предусмотрено введение дополнительных опор для неподвижного скала и подскальной трубы с опиранием на переднюю связь.

5. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что для станка модернизированной конструкции величина энергии деформации значительно снижается. Так, при нагрузке 4000 Н энергия деформации составила 0,3 Дж, а при нагрузке 10 000 Н – 0,85 Дж.

Список литературы

1. *Подгорный Ю.И.* Методы исследования заправок, их синтез и разработка критериев оптимальности условий эксплуатации ткацких станков при формировании плотных тканей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.19.03; 05.02.13: защищена 20.05.1990: утв. 07.12.1990. – Кострома, 1990. – 541 с.

2. *Подгорный Ю.И., Афанасьев Ю.А.* Исследование и проектирование механизмов технологических машин: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 191 с.

3. *Подгорный Ю.И., Афанасьев Ю.А., Кириллов А.В.* Исследование и выбор параметров при синтезе и эксплуатации механизмов технологических машин: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 196 с.

4. *Кириллов А.В.* Исследование и разработка конструктивных элементов остовов ткацких станков СТБ: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13: защищена 24.04.2002: утв. 12.07.2002. – М., 2002. – 187 с.

5. *Саввин О.А.* О деформации основных нитей на скале и дуге ее распространения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2007. – № 2 (297). – С. 45–48.

6. *Саввин О.А.* Понятие геометрической и реальной деформации. Геометрическая деформация ветвей основы при поступательном движении скала // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2007. – № 3 (298). – С. 55–59.

7. *Саввин О.А., Селезнева Е.В., Сергеева А.В.* Определение деформации ветвей основы, огибающих скало, методом элементарных перемещений // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2008. – № 4 (309). – С. 52–55.

8. *Саввин О.А., Кузнецов Г.К., Герасимова С.Ф.* Система заправки ткацкого станка как механическая система с переменными параметрами // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2009. – № 2 (314). – С. 33–36.

9. *Саввин О.А.* Влияние сил трения основы по скалу на его взаимодействие с системой заправки ткацкого станка // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2009. – № 3 (316). – С. 35–38.

10. *Саввин О.А.* Влияние сил сухого трения в опорах на движение скальной системы станка СТБ-175 и о допущении В.А. Гордеева // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2009. – № 4 (318). – С. 47–51.

11. *Саввин О.А., Титов С.Н., Герасимова С.Ф.* Особенности вычисления обобщенных сил и деформаций ветвей основы при изучении динамики скальной системы // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2009. – № 4С (319). – С. 33–36.



12. *Саввин О.А.* Связь между деформацией ветви основы, огибающей скало, и плечом силы ее натяжения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2011. – № 2 (331). – С. 34–37.

13. *Степанов С.Г., Волков И.И.* Влияние силы прибора, дозировки уточной нити на параметры формирования ткани и изменение этих параметров в течение времени прибора // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2008. – № 1 (305). – С. 30–35.

14. *Селиверстов В.Ю., Гречухин А.П.* Исследование процесса формирования тканей с переменной плотностью по утку на станке СТБ с товарным регулятором периодического действия // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2008. – № 4С (310). – С. 62–64.

15. Исследование и пути стабилизации натяжения нитей основы в процессе формирования ткани на бесчелночном ткацком станке / А.С. Шлыков, Р.В. Быкадоров, И.С. Бобылькова, Н.М. Сокерин // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2011. – № 6 (335). – С. 42–48.

16. *Макаров В.А., Хозина Е.Н., Ковалева О.С.* К вопросу о повышении производительности ткацких машин с малогабаритными прокладчиками утка // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2008. – № 2 (306). – С. 93–99.

17. Распределение энергии в системе прокладывания утка ткацких машин с малогабаритными прокладчиками в вероятностном аспекте / В.В. Петров, Е.Н. Хозина, В.А. Макаров, О.С. Ковалева // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2008. – № 5 (311). – С. 83–89.

18. *Степанов О.С., Романьчев Н.К., Моторин Л.В.* Ткань из высокомодульных технических нитей // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2009. – № 3 (316). – С. 41–44.

19. *Черняева О.Е., Карева Т.Ю.* Сравнительное исследование напряженности конструктивно-заправочной линии нитей основы в процессе выработки баллистической ткани на станках СТБ и Dornier // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2010. – № 1 (322). – С. 50–54.

20. *Макаров В.А., Сурков Б.А., Хозина Е.Н.* Сила прибора как часть вектора суммарного натяжения ветвей зева основы, пределы ее ограничения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2013. – № 1 (343). – С. 120–125.

21. *Назарова М.В., Романов В.Ю.* Оценка напряженности заправки ткацкого станка при изготовлении тканей различного переплетения // Известия высших

учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2013. – № 2 (344). – С. 63–67.

22. *Богатырева М.С., Старинец И.В.* Исследование жесткости системы заправки ткацкого станка // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2013. – № 3 (345). – С. 644–66.

23. *Wang X.R., Jin J.Q., Li Y.Z.* The harmonic response analysis of workover rig platform base on ANSYS Workbench // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 945–949. – P. 766–769. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.766.

24. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeebea, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 30, iss. 12. – P. 1408–1411. – doi: 10.1080/10426914.2014.973595.

25. *Zhang X., Chen Y., Yao W.* Relationship between bridge natural frequencies and foundation scour depth based on IITD method // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 6, iss. 1. – P. 102–106.

26. Определение основных параметров технологического оборудования / Ю.И. Подгорный, Т.Г. Мартынова, В.Ю. Скиба, В.Н. Пушкин, Н.В. Вахрушев, Д.Ю. Корнев, Е.К. Зайцев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 3 (60). – С. 68–73.

27. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “Diamond Smoothing” / V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, D.V. Lobanov, A.K. Zhigulev, P.Yu. Skeebea // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 125. – P. 012031. – doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.

28. Методика уравнивания роторов технологических машин / Ю.И. Подгорный, Т.Г. Мартынова, В.Ю. Скиба, Д.В. Лобанов, А.А. Жирова, А.Н. Бредихина, А.С. Косилов, Н.С. Печоркина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 2 (71). – С. 41–50. – doi: 10.17212/1994-6309-2016-2-41-50.

29. Моделирование несущих систем технологических машин / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, В.Н. Пушкин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 2 (63). – С. 91–99.

30. 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.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4 (73), October – December 2016, Pages 24–33

Determination of the rigidity and deformation energy of the technological machine load-carrying systems**Podgornyj Yu. I.**^{1,2}, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: pjui@mail.ru**Skeeba V. Yu.**¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru**Kirillov A.V.**^{1,3}, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kirillovalvs@mail.ru**Maksimchuk O. V.**², Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ovmak@mail.ru**Martynova T.G.**¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: tatyana martynova1511@gmail.com**Lobanov D. V.**⁴, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mf_nauka@brstu.ru**Filatov I. S.**¹, Master's Degree student, e-mail: zaharchenko-ilya@mail.ru**Skeeba P. Yu.**¹, Student, skeeba@rambler.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 Federation³Novosibirsk State Pedagogical University, 28 Viluiskaya st., Novosibirsk, 630126, Russian Federation⁴Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation**Abstract**

Problems of determining deformation energy in load-carrying systems of technological machines and energetic relations between them during technological operations are discussed. The goal of this study is to develop recommendations for modernization of the construction of load-carrying systems using the STB loom for production of dense fabrics as an example. The analysis of scientific literature on this problem indicates that sufficient attention is not devoted to the effect of load-carrying system elements on the loom feeding system. This study is urgent due to the lack of a general approach making it possible to set the parameters of load-carrying systems with the account of technological requirements and quality of obtained product. To determine deformation energy, a computational model of a loom for production of dense fabrics including a stationary tension bar and a tension tube as a support for warp threads is examined. The deformation energies of the load-carrying and tension systems of STB-180 loom and movements of construction elements depending on the technological force varied in the range of 4000-10000 N is determined using SolidWorks CAD system and finite-element CAE complex ANSYS. The analysis of the calculation results indicates that the deformation energy of the load-carrying system and tension tubes is about 25% of the effective energy used for the fabric production. This fact indicates that it is necessary to improve the rigidity of the load-carrying and tension systems. An improved construction of the loom of production of dense fabrics is suggested based on the results of the studies. This model includes additional supports for the stationary tension bar and tension tube basing on the front tie. The analysis of the calculation results with the account of the suggested improvement of construction elements showed that the deformation energy for the modernized loom has been significantly reduced. The obtained results allowed us to suggest specific recommendations for improvement of the constructions of the load-carrying and tension systems in STB looms for production of dense and technical fabrics.

Keywords

load-carrying system, tension system, the loom feeding system, technological machine, finite-element method, deformation energy, the technological loading, STB loom.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-24-33

References

1. Podgornyj Yu.I. *Metody issledovaniya zapravok, ikh sintez i razrabotka kriteriev optimal'nosti uslovii ekspluatatsii tkatskikh stankov pri formirovanii plotnykh tkanei*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Research methods refills, their synthesis and development of criteria of optimality conditions looms in the formation of dense tissue. Dr. eng. sci. diss.]. Kostroma, 1990. 541 p.

2. Podgornyi Yu.I., Afanas'ev Yu.A. *Issledovanie i proektirovanie mekhanizmov tekhnologicheskikh mashin* [Research and design of production machines mechanisms]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2000. 191 p.

3. Podgornyi Yu.I., Afanas'ev Yu.A., Kirillov A.V. *Issledovanie i vybor parametrov pri sinteze i ekspluatatsii mekhanizmov tekhnologicheskikh mashin* [Research and selection of parameters in the synthesis and operation mechanisms of technological machines]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2002. 196 p.

4. Kirillov A.V. *Issledovanie i razrabotka konstruktivnykh elementov ostovov tkatskikh stankov STB*. Diss. kand. tekhn. nauk [Research and development of structural elements cores looms STB. PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2002. 187 p.

5. Savvin O.A. O deformatsii osnovnykh nitei na skale i duge ee rasprostraneniya [Warp threads' deformation on the warp guide beam and on its arc spreading]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2007, no. 2 (297), pp. 45–48.

6. Savvin O.A. Ponyatie geometricheskoi i real'noi deformatsii. Geometricheskaya deformatsiya vetvei osnovy pri postupatel'nom dvizhenii skala [Geometric and actual deformation of warp sheets in translation motion of beam]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2007, no. 3 (298), pp. 55–59.

7. Savvin O.A., Selezneva E.V., Sergeeva A.V. Opredelenie deformatsii vetvei osnovy, ogibayushchikh skalo, metodom elementarnykh peremeshchenii [Definition of warp branches' deformation under the forward motion of warp roller using the method of elementary movements]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2008, no. 4 (309), pp. 52–55.

8. Savvin O.A., Kuznetsov G.K., Gerasimova S.F. Sistema zapravki tkatskogo stanka kak mekhanicheskaya sistema s peremennymi parametrami [Feeding system of a loom as a mechanical system with variable parameters]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2009, no. 2 (314), pp. 33–36.

9. Savvin O.A. Vliyanie sil treniya osnovy po skalu na ego vzaimodeistvie s sistemoi zapravki tkatskogo stanka [Influence of friction forces between warp and warp roller on the roller interaction with the filling system of a loom]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2009, no. 3 (316), pp. 35–38.

10. Savvin O.A. Vliyanie sil sukhogo treniya v oporakh na dvizhenie skal'noi sistemy stanka STB-175 i o dopushchenii V.A. Gordeeva [The influence of dry friction forces on the movement of roller system of the STB-175 loom and on the V.A. Gordeyev's assumption]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2009, no. 4 (318), pp. 47–51.

11. Savvin O.A., Titov S.N., Gerasimova S.F. Osobennosti vychisleniya obobshchennykh sil i deformatsii vetvei osnovy pri izuchenii dinamiki skal'noi sistemy [Calculation features of generalized forces and deformations branches basis for studying the dynamics of the rock system]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2009, no. 4 (319), special issue, pp. 33–36.

12. Savvin O.A. Svyaz' mezhdu deformatsiei vetvi osnovy, ogibayushchei skalo, i plechom sily ee natyazheniya [Connection between deformation of a warp branch bending around a tension bar and a shoulder of force of its tension]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2011, no. 2 (331), pp. 34–37.

13. Stepanov S.G., Volkov I.I. Vliyanie sily priboya, dozirovki utочноi niti na parametry formirovaniya tkani i izmenenie etikh parametrov v techenie vremeni priboya [The influence of beating force and warp thread dosage on the fabrics' forming parameters and the changing of these parameters during the time of beating]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2008, no. 1 (305), pp. 30–35.

14. Seliverstov V.Yu., Grechukhin A.P. Issledovanie protsessa formirovaniya tkanei s peremennoi plotnost'yu po utku na stanke STB s tovarnym regulyatorom periodicheskogo deistviya [Process research of fabrics formation with variable weft density at the STB type loom with batch action cloth regulator]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2008, no. 4 (310), special issue, pp. 62–64.

15. Shlykov A.S., Bykadorov R.V., Bobyl'kova I.S., Sokerin N.M. Issledovanie i puti stabilizatsii natyazheniya nitei osnovy v protsesse formirovaniya tkani na beschelnochnom tkatskom stanke [Research and ways of stabilization of warp threads tension in the process of fabric forming on a shuttleless loom]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2011, no. 6 (335), pp. 42–48.
16. Makarov V.A., Khozina E.N., Kovaleva O.S. K voprosu o povyshenii proizvoditel'nosti tkatskikh mashin s malogabaritnymi prokladchikami utka [About the problem of increasing of shuttleless looms productivity]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2008, no. 2 (306), pp. 93–99.
17. Petrov V.V., Khozina E.N., Makarov V.A., Kovaleva O.S. Raspredelenie energii v sisteme prokladyvaniya utka tkatskikh mashin s malogabaritnymi prokladchikami v veroyatnostnom aspekte [Distribution of energy in the system of weft laying at the looms with small layers in the probabilistic aspect]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2008, no. 5 (311), pp. 83–89.
18. Stepanov O.S., Romanychev N.K., Motorin L.V. Tkan' iz vysokomodul'nykh tekhnicheskikh nitei [Fabric made of highly modular technical threads]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2009, no. 3 (316), pp. 41–44.
19. Chernyaeva O.E., Kareva T.Yu. Sravnitel'noe issledovanie napryazhennosti konstruktivno-zapravochnoi linii nitei osnovy v protsesse vyrabotki ballisticheskoi tkani na stankakh STB i Dornier [Comparative research of the strain of the constructional-setting up line for the warp threads during the manufacturing of the ballistic fabric on the looms STB and DORNIER]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2010, no. 1 (322), pp. 50–54.
20. Makarov V.A., Surkov B.A., Khozina E.N. Sila priboya kak chast' vektora summarnogo natyazheniya vetvei zeva osnovy, predely ee ogranicheniya [Effect of a beating as the part of the vector of total tension of the branches of a warp jaw, the bounds of its limitations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2013, no. 1 (343), pp. 120–125.
21. Nazarova M.V., Romanov V.Yu. Otsenka napryazhennosti zapravki tkatskogo stanaka pri izgotovlenii tkanei razlichnogo perepleteniya [Evaluation of weaving equipment tension during producing the fabrics of various interweaving]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2013, no. 2 (344), pp. 63–67.
22. Bogatyreva M.S., Starinets I.V. Issledovanie zhestkosti sistemy zapravki tkatskogo stanaka [The study of rigidity of the system filling looms]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, 2013, no. 3 (345), pp. 64–66.
23. Wang X.R., Jin J.Q., Li Y.Z. The harmonic response analysis of workover rig platform base on ANSYS Workbench. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 945–949, pp. 766–769. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.766
24. Skeebe V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 12, pp. 1408–1411. doi: 10.1080/10426914.2014.973595
25. Zhang X., Chen Y., Yao W. Relationship between bridge natural frequencies and foundation scour depth based on IITD method. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2013, vol. 6, iss. 1, pp. 102–106.
26. Podgorniy Yu.I., Martynova T.G., Skeebe 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 (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 3 (60), pp. 68–73.
27. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Zhigulev A.K., Skeebe P.Yu. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “diamond smoothing”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 125, p. 012031. doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012031
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. Metodika uravnoveshivaniya rotorov tekhnologicheskikh mashin [The methods of technological machines' rotors balance]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2016, no. 2 (71), pp. 41–50. doi: 10.17212/1994-6309-2016-2-41-50

29. Podgornyj Yu.I., Skeebe V.Yu., Kirillov A.V., Pushnin V.N., Erokhin I.A., Kornev D.Yu. Modelirovanie nesushchikh sistem tekhnologicheskikh mashin [Modeling of the technological machines support systems]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 2 (63), pp. 91–99.

30. Podgornyj Yu.I., Skeebe V.Yu., Kirillov A.V., Maksimchuk O.V., Lobanov D.V., Gleim V.R., Zhigulev A.K., Sakha O.V. Vybor konstruktivnykh parametrov nesushchikh sistem mashin s uchetom tekhnologicheskoi nagruzki [Selection of form factors of machine carrying systems in reliance on the process duty]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2015, no. 4 (69), pp. 51–60. doi: 10.17212/1994-6309-2015-4-51-60

Article history

Received 17 August 2016

Revised 23 September 2016

Accepted 18 October 2016

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ ПОРОШКОВОГО СПЛАВА Ti-40 Nb, ПОЛУЧЕННОГО МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИЕЙ*

*Ж.Г. КОВАЛЕВСКАЯ^{1,2}, канд. техн. наук, доцент,
ведущий инженер*

*Ю.П. ШАРКЕЕВ^{2,1}, доктор физ.-мат. наук,
заведующий лабораторией, профессор*

*М.А. КОРЧАГИН^{3,4}, доктор техн. наук, профессор,
ведущий научный сотрудник*

М.А. ХИМИЧ^{4,2}, аспирант, инженер

Е.А. ИБРАГИМОВ⁵, старший преподаватель

*А.А. САПРЫКИН⁵, канд. техн. наук,
заведующий кафедрой*

В.А. БАТАЕВ⁶, доктор техн. наук, профессор

(¹НИ ТПУ, г. Томск,

²ИФПМ СО РАН, г. Томск,

³ИХТТМ СО РАН, г. Новосибирск,

⁴НИ ТГУ, г. Томск,

⁵ЮТИ ТПУ, г. Юрга,

⁶НГТУ, г. Новосибирск)

Поступила 5 сентября 2016

Рецензирование 21 сентября 2016

Принята к печати 17 октября 2016

Ковалевская Ж.Г. – 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4,
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
e-mail: zhanna_kovalevskaya@mail.ru

В планетарной шаровой мельнице АГО-2С в защитной атмосфере аргона из смеси порошков в массовом соотношении 60 % Ti и 40 % Nb получен порошковый сплав Ti-Nb. В интервале времени активации от 3 до 20 мин преобладает процесс агломерации частиц до среднего значения 66 мкм. Форма частиц меняется с чешуек на окатыши. При времени активации 25 мин происходит уравнивание процессов агломерации и разрушения получаемых частиц, что приводит к снижению их среднего размера в два раза. С ростом времени активации в сплаве увеличивается доля общего твердого раствора компонентов Ti и Nb. При времени активации 20 мин рентгеноструктурно идентифицируется однофазный β-сплав. Таким образом, оптимальный для селективного лазерного сплавления гранулометрический и фазовый состав достигается при времени обработки 25 мин. Технологические ограничения по времени работы планетарной мельницы требуют дальнейшего поиска параметров механической активации.

Ключевые слова: титан, ниобий, смесь порошков, механическая активация, интенсивная пластическая деформация, агломерация, фазовый состав, сплав Ti-40 Nb.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-34-42

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-00191).

Введение

В аддитивной технологии, в том числе селективного лазерного спекания (СЛС), нашли применение порошки металлических сплавов, получаемые различными способами [1–3]. Обычно для изготовления порошка используется метод газовой атомизации [1]. Этим способом получают частицы, соответствующие требованиям СЛС-технологии – сферической формы с варьируемым гранулометрическим составом от 5 до 70 мкм. Сложность технологического процесса, большой парк необходимого оснащения и дороговизна оборудования ограничивают возможность использования данного метода.

Альтернативным методом получения порошка является механическая активация, или иначе механическое легирование [2–3]. Данный метод обеспечивает смешивание компонентов сплава, их взаимную диффузию и растворение, что в конечном итоге приводит к формированию сплава с фазовым составом, соответствующим аналогу, полученному металлургической плавкой [4, 5]. Получаемый материал может иметь широкий гранулометрический состав и форму частиц, близкую к сферической.

Обычно механическую активацию проводят в планетарных шаровых мельницах различных конструкций. Завершенность процесса определяется в первую очередь временем смешивания. Из литературных источников [6–10] известно, что при получении композитных порошков на основе Ti, в том числе системы Ti-Nb, время смешивания составляет от 20 до 40 часов. При использовании планетарной мельницы АГО-2С время смешивания можно сократить до нескольких десятков минут [11–16]. Тем самым затраты на производство порошка значительно снижаются.

Авторы статьи в ранее опубликованной работе показали [17], что при механической активации смеси порошков титана и ниобия в соотношении Ti – 40 мас. % Nb в планетарной мельнице АГО-2С на воздухе получается порошок двухкомпонентного сплава Ti-Nb. Вместо исходных фаз α -Ti и β -Nb формируется твердый раствор Ti и Nb – β -TiNb. С увеличением времени активации от 10 до 20 мин доля β -фазы возрастает. Однако полного фазового превращения не происходит. В получаемом порошке рентгенографически идентифицируется также α -фаза, характерная для Ti.

В данной работе продолжено исследование процесса механической активации порошков Ti и Nb в планетарной мельнице АГО-2С с целью получения однофазного β -сплава для СЛС.

Материал и методика исследования

В эксперименте смешивались порошки технически чистого титана марки ПТМ и ниобия марки НПБ-а в массовом соотношении 60 % Ti и 40 % Nb [17].

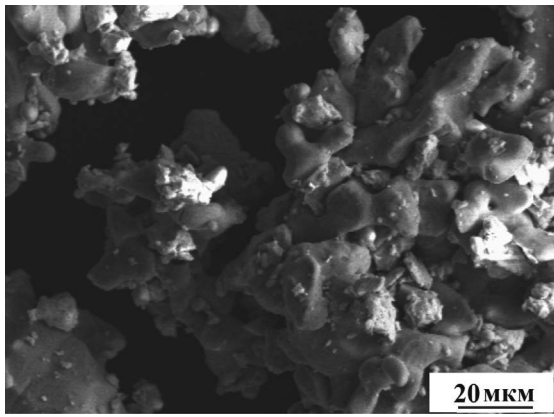
Механическая активация порошков проводилась в Институте химии твердого тела и механохимии СО РАН. Для этого использовалась планетарная мельница АГО-2С [11]. Активация осуществлялась в атмосфере аргона при центробежном ускорении мелющих тел 400 м/с^2 с продолжительностью от 3 до 25 мин. В роли агента, контролирующего процесс (АКП), в смесь порошков добавлялся этиловый спирт. Для проведения сравнительного анализа использовалась смесь порошков Ti и Nb, полученная при ручном растирании в ступке в течение 3 мин.

Исследования порошков проводились на растровом электронном микроскопе (РЭМ) LEO EVO 50 (Zeiss, Германия), оснащенном энергодисперсионным микроанализатором (ЭДМА). Рентгеноструктурный анализ (РСА) – на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4 (Буревестник, Россия) в монохроматическом CoK_α -излучении по схеме Брегга–Брентано. Исследования проводились в ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН (г. Томск), ЦКП «Лаборатория электронной микроскопии» НГТУ (г. Новосибирск) и ИХТТМ СО РАН (г. Новосибирск).

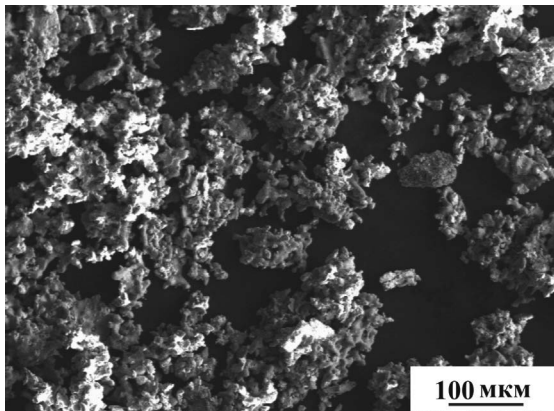
Результаты эксперимента

При ручном растирании в ступке порошки Ti и Nb успешно смешиваются. Мелкие (2...8 мкм) частицы Nb осколочной формы закрепляются в неровностях поверхности более крупных (до 20 мкм) губчатых частиц Ti (рис. 1, а). Образовавшаяся смесь агломерирует в крупные рыхлые фрагменты размером до 300 мкм (рис. 1, б).

Следовательно, при ручном перемешивании частицы Nb оказываются зажатыми внутри образовавшихся фрагментов или осаждаются на их внешней поверхности. Образовавшиеся связи между частицами Ti и Nb могут быть резуль-



а



б

Рис. 1. РЭМ-изображение смеси порошка Ti и Nb после растирания в ступке

татом механического зацепления, а также действия сил Ван-дер-Ваальса.

Как показал ЭДМА, разброс значений концентрации Nb на поверхности сформировавшихся фрагментов меняется от 2 до 96 %. По результатам картирования соотношение компонентов Ti и Nb составляет 70 и 30 % соответственно. При общем содержании ниобия 40 % можно предположить, что внутри фрагментов доля частиц Nb больше, чем на их поверхности.

При этом в образовавшейся смеси порошков взаимодействия компонентов не произошло. На дифрактограмме идентифицируются пики двух фаз α -Ti и β -Nb (рис. 2).

В процессе механической активации порошки Ti и Nb взаимодействуют между собой, формируя агломераты, размер и форма которых зависит от времени обработки (рис. 3 и 4).

После трех минут механической активации формируются частицы с размером в интервале от 10 до 100 мкм и средним значением 67 мкм (рис. 4, а). Большинство частиц имеют чешуйча-

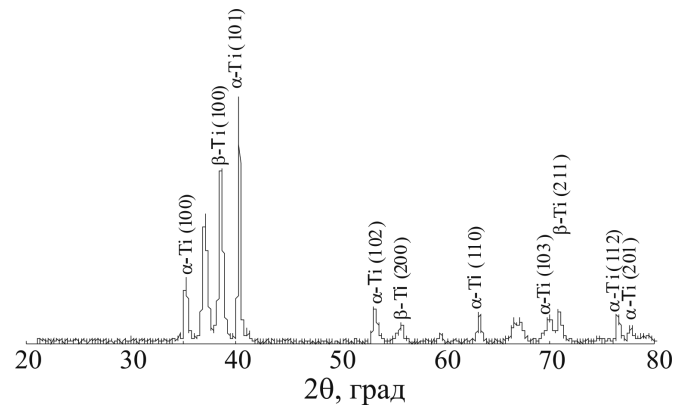


Рис. 2. Дифрактограмма смеси порошка Ti и Nb после растирания в ступке

тое строение (рис. 3, а). С увеличением времени обработки до 5 мин форма получаемых частиц не меняется (рис. 3, б). Средний размер частиц снижается до 45 мкм. Увеличивается доля частиц мелкой фракции – менее 30 мкм (рис. 4, б). При 10 мин обработки наряду с чешуйчатыми частицами наблюдаются частицы-агломераты, близкие к равноосной форме в виде окатышей (рис. 3, в). При этом средний размер частиц не меняется и составляет 41 мкм (рис. 4, в).

Дальнейшее увеличение времени до 15 мин характеризуется усилением тенденции к окатыванию частиц (рис. 3, г). Средний размер частиц увеличивается до 55 мкм в первую очередь за счет образования агломератов с размерами 80...100 мкм (рис. 4, г). Начинает проявляться эффект налипания порошкового материала к стенкам барабана. Для очистки барабанов вводилась дополнительная порция АКП с дополнительным перемешиванием в течение 30 с. Это приводило к очистке барабанов и полному выходу активированного порошка.

Активация в течение 20 мин также сопровождается эффектом налипания порошка и требует операции очистки. При этом получаемые частицы-агломераты увеличиваются до среднего размера 67 мкм (рис. 3, д и 4, д). Доля крупных частиц с размером от 80 до 110 мкм возрастает. При времени активации 25 мин получаемые частицы значительно измельчаются (рис. 3, е). Их средний размер уменьшается до 28 мкм (рис. 4, е). Размер основной части частиц составляет 5...40 мкм. При этом большинство частиц имеют форму окатышей.

Результаты ЭДМА показали, что с увеличением времени обработки сужается интервал разброса концентрации компонентов на поверх-

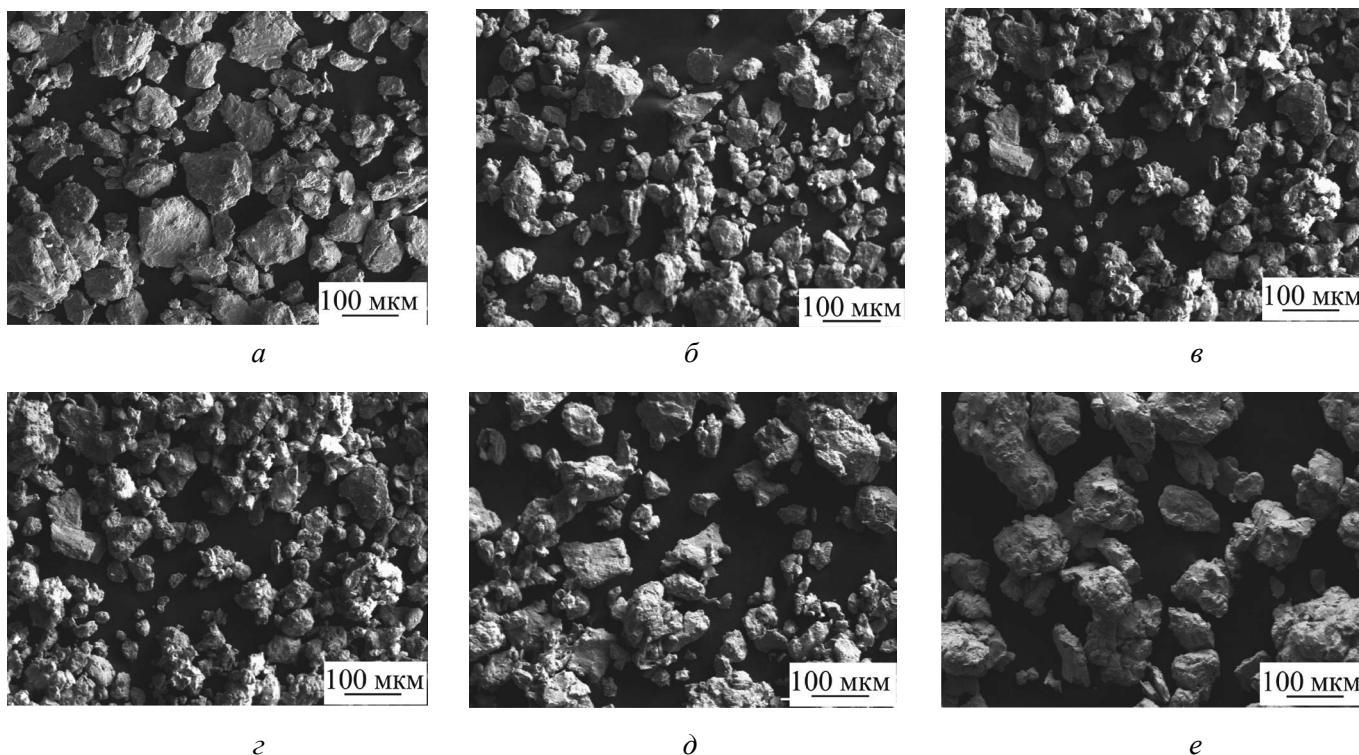


Рис. 3. РЭМ-изображение порошка после механоактивации:

a – в течение 3 мин; *б* – 5 мин; *в* – 10 мин; *г* – 15 мин; *д* – 20 мин; *е* – 25 мин

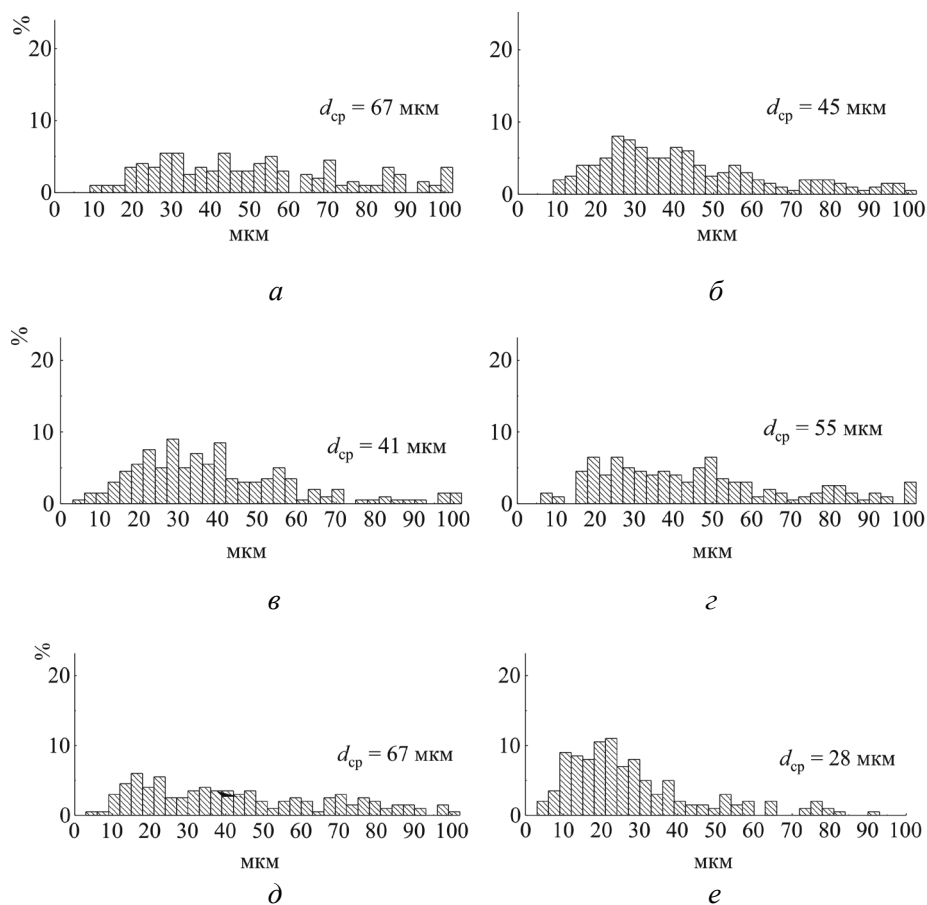


Рис. 4. Гистограммы распределения по размерам частиц порошка, полученного механической активацией:

a – в течение 3 мин; *б* – 5 мин; *в* – 10 мин; *г* – 15 мин; *д* – 20 мин; *е* – 25 мин

ности частиц-агломератов. При времени обработки 5 мин разброс значений концентрации Nb составляет 23...35 %. При времени обработки 20 мин – 32...40 %. Следовательно, с увеличением времени обработки взаимная растворимость компонентов друг в друге увеличивается. Это подтверждают результаты картирования. При времени активации 5 мин среднее количество Nb на поверхности частиц составляет 33 % и при увеличении времени активации до 20 мин возрастает до 37 %. Время обработки 25 мин дает тот же результат.

Механическая активация приводит к изменению фазового состава сплава. На дифрактограммах порошков-агломератов максимальная интенсивность характерна для пиков β -TiNb (рис. 5). Пики α -Ti присутствуют на дифрактограммах порошка, обработанного в интервале времени до 15 мин. С увеличением времени обработки их интенсивность снижается. На дифрактограмме порошка, обработанного в течение 20 мин, пики α -Ti исчезают. Таким образом, в порошке, механически активированном в течение 20 мин, рентгеноструктурно идентифицируется только одна фаза – твердый раствор Ti и Nb – β -TiNb (рис. 5).

При механической активации порошка наблюдается уширение пиков основной β -фазы, что свидетельствует об увеличении количества дефектов кристаллического строения и формировании внутренних напряжений. Подобные структурные превращения характерны для процессов, сопровождающихся

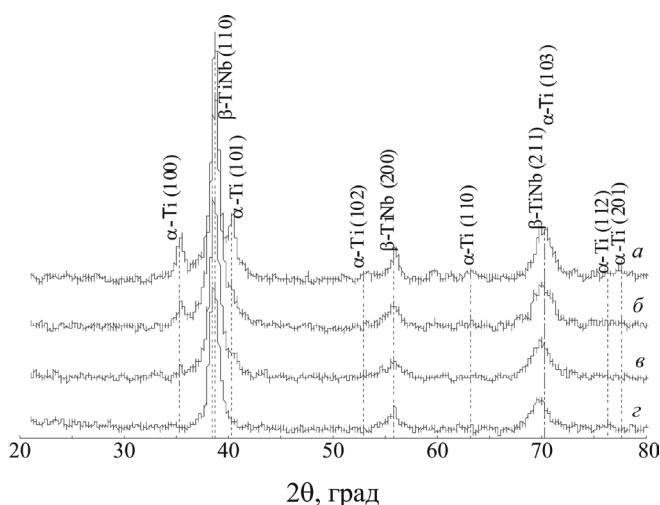


Рис. 5. Дифрактограммы порошка, полученного механической активацией:

а – в течение 5 мин; *б* – 10 мин; *в* – 15 мин; *г* – 20 мин

интенсивной пластической деформацией, к которым и относится механическая активация [3].

Обсуждение результатов

Анализ РЭМ-изображений и гранулометрических данных получаемых порошков показал, что форма и размер исходных частиц порошка Ti и Nb способствуют их смешиванию даже при ручном растирании в ступке. Более мелкие осколочные частицы Nb проникают в полости и углубления губчатых частиц Ti, равномерно распределяясь по их поверхности и внутри агломерированных фрагментов. Отсутствие сегрегации порошков двух исходных металлов обеспечивает их быстрое успешное взаимодействие и диффузию при последующей механической активации.

Механическая активация в течение 3 и 5 мин создает условия для формирования агломератов чешуйчатой формы. При этом средний размер частиц несколько снижается, скорее всего, за счет «долома» исходных агломерированных фрагментов. Увеличение времени активации в интервале от 10 до 20 мин приводит к формированию в получаемом порошке частиц-окатышей равноосной формы большего размера. В этом же временном интервале снижается выход порошка, что требует введения АКП для очистки барабана. Самые значительные изменения в форме и в размере получаемого порошка связаны с временем активации 25 мин. Порошок значительно измельчается, снижается разброс гранулометрического состава. Так, при изменении времени активации с 20 на 25 мин средний размер частиц уменьшается более чем в два раза – с 66 до 28 мкм.

При механической активации порошка на воздухе, описанной в работе [17], наблюдалась та же зависимость изменения формы и размера активированных частиц с той лишь разницей, что указанные превращения происходили при меньшем времени активации и получаемые частицы порошка во всем временном интервале обработки имели меньший размер. При активации на воздухе частицы приобретали средний размер 33 мкм при времени обработки 10 мин, а при 20 мин их размер снижался до 18 мкм. Как показали дальнейшие исследования, увеличение времени обработки до 30 мин приводило к ста-

билизации среднего размера частиц, который составлял 15 мкм.

Значительно больший размер частиц порошка, получаемого при обработке в защитной атмосфере, обусловлен изменением условий взаимодействия металлов при активации без доступа воздуха. С этим же связано увеличение времени обработки при получении порошка мелкой фракции.

Как известно, в основе процесса легирования в шаровой мельнице лежит механизм холодной сварки в условиях интенсивной пластической деформации. Механическая активация обеспечивает смешивание материала компонентов и формирование сильно дефектных структурных состояний с высокими значениями кривизны кристаллической решетки [14]. Это, в свою очередь, способствует значительному увеличению запасенной энергии деформации и создает условия для аномального массопереноса атомов компонентов в кристаллическую решетку друг друга и формирования общего твердого раствора [15].

Порошок сплава образуется за счет соединения все большего числа деформированных фрагментов частиц исходных компонентов (в нашем случае Ti и Nb), а степень пластической деформации до момента разрушения агломератов определяется условиями протекания процесса деформации. При механической активации в шаровой мельнице в защитной атмосфере аргона создаются условия пластической деформации, сопровождающейся релаксационными процессами диффузионного типа [14, 15]. Процесс агломерации начинает преобладать над процессом разрушения. Как следствие, с увеличением времени обработки увеличивается средний размер получившихся частиц порошка и наблюдается процесс налипания порошкового материала к стенкам барабана. При времени активации 25 мин происходит уравнивание процесса агломерации и разрушения, что приводит к снижению среднего размера получаемых частиц.

Условия получения легированного порошка меняются при механической активации с доступом воздуха. Примесные атомы, внедряющиеся в твердый раствор из газовой среды, подавляют релаксационные способности материала и уравнивают процесс агломерации и разрушения за меньший отрезок времени [16]. Однако пода-

вление диффузионных процессов ограничивает и процесс формирования сплава, что подтверждается в работе [17]. Формирования однофазного сплава Ti-Nb не происходит.

В случае механической активации в защитной среде при времени обработки 20 мин в порошке рентгеноструктурно идентифицируется одна фаза – твердый раствор β -TiNb. Таким образом, из порошка двух отдельных компонентов формируется однофазный порошковый β -сплав.

Для использования порошка в СЛС-технологии форма частиц должна быть близкой к сферической с размером от 10 до 50 мкм [18]. Всем перечисленным требованиям соответствует порошковый сплав, полученный при времени активации 25 мин. Однако использование данного времени работы шаровой мельницы является нерациональным: снижается выход готового продукта, увеличивается вероятность повреждения деталей корпуса мельницы. Для оптимизации производства порошкового сплава требуется снижение времени активации до 15 мин.

Выводы

С помощью механической активации порошков Ti и Nb в планетарной мельнице АГО-2С в защитной атмосфере аргона получен порошковый сплав Ti40Nb. Для получения однофазного состояния β -сплава требуется 20 мин времени обработки. В то же время оптимальный для селективного лазерного сплавления гранулометрический состав порошка (10...50 мкм) достигается при времени обработки 25 мин. Технологические ограничения по времени работы планетарной мельницы не более 15 мин требуют дальнейшей оптимизации параметров механической активации и дальнейших исследований.

Список литературы

1. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2013. – 222 с.
2. Saprykin A.A., Ibragimov E.A., Yakovlev V.I. Influence of mechanical activation of powder on SLS process // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 143–147. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.143.
3. Mechanical alloying of β -type Ti-Nb for biomedical applications / K. Zhuravleva, S. Scudino, M.S. Khoshkhoo, A. Gebert, M. Calin, L. Schultz.

Advanced Engineering Materials. – 2013. – Vol. 15, no. 4. – P. 262–268. – doi: 10.1002/adem.201200117.

4. *Suryanarayana C.* Mechanical alloying and milling // Progress in materials science. – 2001. – Vol. 46, iss. 1–2. – P. 1–184.

5. Механическое легирование / Ю.В. Кузьмич, И.Т. Колесникова, В.И. Сербя, Б.М. Фрейдин. – М.: Наука, 2005. – 213 с. – ISBN 5-02-033726-9.

6. *Maweja K., Phasha M., Berg N. van der.* Microstructure and crystal structure of an equimolar Mg-Ti alloy processed by simoloyer high-energy ball mill // Powder technology. – 2010. – Vol. 199, iss. 3. – P. 256–263. – doi: 10.1016/j.powtec.2010.01.014.

7. *Rhosroshahi R.A., Ahmadi N.P., Samadzaden S.* Effect of silicon on nanostructure TiAl(γ) formation kinetic via mechanical alloying method // Journal of Applied Sciences. – 2008. – Vol. 8, iss. 20. – P. 3727–3732.

8. Parametric optimization of Ti-Ni powder mixtures produced by mechanical alloying / F. Nevesa, F.M. Braz Fernandes, I. Martinsb, J.B. Correia // Journal of Alloys and Compounds. – 2011. – Vol. 509. – P. 271–274. – doi: 10.1016/j.jallcom.2010.11.036.

9. Structural evaluation of mechanically alloyed Ti-Nb powders / Y.A. Giffoni, E.C.T. Ramos, H.R.Z. Sandim, M.T.T. Pacheco, G. Silva, A.S. Ramos // Materials Science Forum. – 2008. – Vol. 591–593. – P. 141–146. – doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.591-593.141.

10. Preparation of Nb40Ti powders by high-energy milling / Y.A. Giffoni, E.C.T. Ramos, A.S. Ramos, H.R.Z. Sandim, M.T.T. Pacheco, G. Silva // Materials Science Forum. – 2005. – Vol. 498–499. – P. 146–151. – doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.498-499.146.

11. А. с. 975068 (СССР). Планетарная мельница / Е.Г. Аввакумов, А.Р. Поткин, О.И. Самарин. – № 3310409/29-43; опубли. 23.11.82, Бюл. № 43.

12. High temperature synthesis of single-phase Ti_3Al intermetallic compound in mechanically activated powder mixture / V.Y. Filimonov, M.A. Korchagin, N.Z. Lyakhov, I.A. Diitenberg, A.N. Tyumentsev //

Powder Technology. – 2013. – Vol. 235. – P. 606–613. – doi: 10.1016/j.powtec.2012.11.022.

13. Особенности структурно-фазовых переходов в механоактивированной порошковой смеси 3Ti+Al при высокотемпературном синтезе в условиях нагрева высокочастотными электромагнитными полями / В.Ю. Филимонов, А.А. Ситников, М.В. Логинова, А.З. Негодяев, В.И. Яковлев, Д.В. Шрейфер // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2015. – Т. 12, № 1. – С.16–25.

14. *Денисов К.И., Дитенберг И.А.* Комплексное изучение параметров микроструктуры и свойств порошка Nb в зависимости от интенсивности деформационного воздействия в планетарной шаровой мельнице // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53, № 11/3. – С. 46–49.

15. Peculiarities of the formation of high-defect states in mechanocomposites and powders of niobium and aluminum under severe deformation in planetary ball mills / I.A. Diitenberg, A.N. Tyumentsev, K.I. Denisov, M.A. Korchagin // Physical Mesomechanics. – 2013. – Vol. 16, N 1. – P. 84–92.

16. Особенности микроструктуры и упрочнения Nb после механической активации и последующей консолидации кручением под давлением / И.А. Дитенберг, К.И. Денисов, А.Н. Тюменцев, М.А. Корчагин, А.В. Корзников // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57, № 7. – С. 68–75.

17. Исследование строения и фазового состава порошков Ti и Nb после механической активации / Ю.П. Шаркеев, Ж.Г. Ковалевская, М.А. Химич, Е.А. Ибрагимов, А.А. Сапрыкин, В.И. Яковлев, В.А. Батаев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 1 (70). – С. 42–51. – doi: 10.17212/1994-6309-2016-1-42-51.

18. *Шишковский И.В.* Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. – М.: Физматлит, 2009. – 421 с. – ISBN 978-5-9221-1122-5.

ОБРАБОТКА METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(73), October – December 2016, Pages 34–42

Investigation of the structure of Ti-40Nb powder alloy obtained by mechanical activation

Kovalevskaya Zh.G.^{1, 2}, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, principal engineer, e-mail: zhanna_kovalevskaya@mail.ru

Sharkeev Yu.P.^{2, 1}, D.Sc. (Physics and Mathematics), Head of Laboratory, Professor, e-mail: sharkeev@ispms.tsc.ru

Korchagin M.A.^{3, 4} D.Sc. (Engineering), leading researcher, Professor, e-mail: korchag@solid.nsc.ru

Khimich M.A.^{4, 2}, Ph.D. student, Engineer, e-mail: khimich@ispms.tsc.ru

Ibragimov E.A.⁵, Senior Lecturer, e-mail: egor83@lisy.ru

Saprykin A.A.⁵, Ph.D. (Engineering), Head of FM, e-mail: sapraa@tpu.ru

Bataev V.A.⁶, D.Sc. (Engineering) Professor, e-mail: bataev@adm.nstu.ru

¹National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

²Institute of Strength Physics and Materials Science Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

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

⁴National Research Tomsk State University, 36 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

⁵Yurga Technical Institute of Tomsk Polytechnic University, 26 Leningradskaya st., Yurga, 652055, Russian Federation

⁶Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

Powder alloys obtained by mechanical activation are widely used in different fields. One of these fields is additive technology. The resulting material for such purpose should have a size distribution of 10...50 μm , nearly spherical particles shape and phase composition close to the composition of the alloy obtained by melting.

The powder Ti-Nb alloy is consisted of Ti and Nb powders mixture with weight ratio of 60:40 respectively, grind-ed in a planetary ball mill AGO-2C in argon atmosphere. The structure and phase composition of obtained powder alloy are defined by mechanical activation time and the presence of protective gas environment. The size of formed particles increases up to average value of 66 μm at activation time increasing from 3 to 20 minutes and it decreases twice at activation time of 25 minutes. The shape of particles changes from scaly to pellet. The quantity of total solid solution of Ti and Nb components increases in the alloy with increasing the activation time. The β -single phase alloy is identified by x-ray at activation time of 20 minutes. Plastic deformation is accompanied by relaxation processes of diffusion type and occurs during mechanical activation. The process of agglomeration begins to predominate over the process of destruction. As a result, the average size of resulting powder particles increases with increasing the treatment time and sticking of powder material to the vial walls is observed. The balancing of agglomeration and destruction process occurs at activation time of 25 minutes. This leads to the average size of obtained particles decreasing. Significant increment of accumulated strain energy creates conditions for abnormal mass transfer of components atoms into the crystal lattice of each other. Also it creates conditions for the formation of monophasic alloy, which consists of a total solid solution of β -TiNb. This solid solution exists in a range of concentrations. It is necessary to investigate ratio of technological parameters of mechanical activation, granulometric and phase composition of resulting powder in case when investigated powder is used in the process of selective laser melting.

Keywords

titanium, niobium, powder mixture, mechanical activation, severe plastic deformation, agglomeration, phase composition, Ti-40Nb alloy

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-34-42

References

1. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylyna I.N. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Additive technologies in engineering]. St. Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2013. 222 p.
2. Saprykin A.A., Ibragimov E.A., Yakovlev V.I. Influence of mechanical activation of powder on SLS process. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 143–147. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.143
3. Zhuravleva K., Scudino S., Khoshkhoo M.S., Gebert A., Calin M., Schultz L. Mechanical alloying of β -type Ti-Nb for biomedical applications. *Advanced Engineering Materials*, 2013, vol. 15, no. 4, pp. 262–268. doi: 10.1002/adem.201200117
4. Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling. *Progress in materials science*, 2001, vol. 46, iss. 1–2, pp. 1–184. doi: 10.1016/S0079-6425(99)00010-9
5. Kuz'mich Yu.V., Kolesnikova I.T., Serba V.I., Freidin B.M. *Mekhanicheskoe legirovanie* [Mechanical alloying]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 213 p. ISBN 5-02-033726-9
6. Maweja K., Phasha M., Berg N. van der. Microstructure and crystal structure of an equimolar Mg-Ti alloy processed by simoloyer high-energy ball mill. *Powder technology*, 2010, vol. 199, iss. 3, pp. 256–263. doi: 10.1016/j.powtec.2010.01.014

7. Rhosroshahi R.A., Ahmadi N.P., Samadzaden S. Effect of silicon on nanostructure TiAl(γ) formation kinetic via mechanical alloying method. *Journal of Applied Sciences*, 2008, vol. 8, iss. 20, pp. 3727–3732.
8. Nevesa F., Fernandes F.M. Braz, Martinsb I., Correiab J.B. Parametric optimization of Ti-Ni powder mixtures produced by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, pp. 271–274. doi: 10.1016/j.jallcom.2010.11.036
9. Giffoni Y.A., Ramos E.C.T., Sandim H.R.Z., Pacheco M.T.T., Silva G., Ramos A.S. Structural evaluation of mechanically alloyed Ti-Nb powders. *Materials Science Forum*, 2008, vol. 591–593. pp. 141–146. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.591-593.141
10. Giffoni Y.A., Ramos E.C.T., Ramos A.S., Sandim H.R.Z., Pacheco M.T.T., Silva G. Preparation of Nb₄₀Ti powders by high-energy milling. *Materials Science Forum*, 2005, vol. 498–499. pp. 146–151. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.498-499.146
11. Avvakumov E.G., Potkin A.R., Samarin O.I. *Planetarnaya mel'nitse* [Planetary ball mill]. Inventor's Certificate USSR, no. 975068, 1982.
12. Filimonov V.Y., Korchagin M.A., Lyakhov N.Z., Diitenberg I.A., Tyumentsev A.N. High temperature synthesis of single-phase Ti₃Al intermetallic compound in mechanically activated powder mixture. *Powder Technology*, 2013, vol. 235, pp. 606–613. doi: 10.1016/j.powtec.2012.11.022
13. Filimonov V.Yu., Sitnikov A.A., Loginova M.V., Yakovlev V.I., Negodyaev A.Z., Schreyfer D.V. Osobennosti struktural'no-fazovykh perekhodov v mekhanoaktivirovannoi poroshkovoii smesi 3Ti+Al pri vysokotemperaturnom sinteze v usloviyakh nagreva vysokochastotnymi elektromagnitnymi pol'yami [Features of the structural phase transition in the mechanically activated powder mixtures 3Ti + Al at high-temperature synthesis under heat of high-frequency electromagnetic fields]. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya – Basic Problems of Material Science*, 2015, vol. 12, no. 1, pp. 16–25.
14. Denisov K.I., Diitenberg I.A. Kompleksnoe izuchenie parametrov mikrostruktury i svoystv poroshka Nb v zavisimosti ot intensivnosti deformatsionnogo vozdeystviya v planetarnoi sharovoi mel'nitse [Complex study of the microstructure parameters and Nb powder properties depending on the intensity of strain effects in a planetary ball mill]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*, 2010, vol. 53, no. 11 (3), pp. 46–49. (In Russian)
15. Diitenberg I.A., Tyumentsev A.N., Denisov K.I., Korchagin M.A. Peculiarities of the formation of high-defect states in mechanocomposites and powders of niobium and aluminum under severe deformation in planetary ball mills. *Physical Mesomechanics*, 2013, vol. 16, no. 1, pp. 84–92. doi: 10.1134/S1029959913010098
16. Diitenberg I.A., Denisov K.I., Tyumentsev A.N., Korchagin M.A., Korznikov A.V. Osobennosti mikrostruktury i uprochneniya Nb posle mekhanicheskoi aktivatsii i posleduyushchei konsolidatsii krucheniem pod davleniem [Microstructural peculiarities and hardening of Nb after mechanical activation and subsequent consolidation by torsion under pressure]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*, 2014, vol. 57, no. 7, pp. 68–75. (In Russian)
17. Sharkeev Yu.P., Kovalevskaya Zh.G., Khimich M.A., Ibragimov E.A., Saprykin A.A., Yakovlev V.I., Baetaev V.A. Issledovanie stroeniya i fazovogo sostava poroshkov Ti i Nb posle mekhanicheskoi aktivatsii [Investigation of the structure and phase composition of Ti and Nb powders after mechanical activation]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2016, no. 1 (70), pp. 42–51. doi: 10.17212/1994-6309-2016-1-42-51
18. Shishkovskii I.V. *Lazernyi sintez funktsional'no-gradientnykh mezostruktur i ob'emnykh izdelii* [Laser synthesis of functionally graded mesostructures and bulk products]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 421 p. ISBN 978-5-9221-1122-5.

Funding

The investigation was performed by the grant of Russian Scientific Foundation (project No. 15-19-00191).

Article history

Received 5 September 2016

Revised 21 September 2016

Accepted 17 October 2016

МОРФОЛОГИЯ ИЗБЫТОЧНОЙ КАРБИДНОЙ ФАЗЫ В ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВАХ ТИПА БУЛАТ

Д.А. СУХАНОВ¹, канд. техн. наук
Л.Б. АРХАНГЕЛЬСКИЙ², президент
Н.В. ПЛОТНИКОВА³, канд. техн. наук, доцент
(¹ ООО «АСК-МСЦ», г. Москва,
² Союз кузнецов России, г. Москва,
³ НГТУ, г. Новосибирск)

Поступила 5 июля 2016

Рецензирование 10 октября 2016

Принята к печати 31 октября 2016

Суханов Д.А. – 117246, Москва, Научный проезд, 8, строение 1
ООО «АСК – МСЦ» (металлосервисный центр)
e-mail: suhanov7@mail.ru

Проведен анализ морфологии избыточных карбидов в нелегированных высокоуглеродистых сплавах типа булат в зависимости от степени переохлаждения расплава, термической обработки и пластической деформации материала. Показано, что процесс кристаллизации сплава с высоким содержанием углерода (2,25 % С) при больших степенях переохлаждения отличается особенностями, характерными для высокоуглеродистой стали, а также, что при горячей деформации булатной стали со структурой видманштеттова цементита не происходит его дробления. Пластины видманштеттова цементита расщепляются на отдельные слои толщиной 0,6...1,0 мкм. Однако образование такой структуры материала не обеспечивает высоких режущих свойств инструмента. В процессе высокотемпературного отжига исходной структуры при температуре 1150 °С в течение двух часов зафиксировано образование микрообъемов со структурой ледебурита, отличающегося по строению от ледебурита, характерного для белых чугунов. Зафиксированы два конкурирующих процесса формирования избыточных карбидов при деформации булатной стали, связанные со сфероидизацией и огранкой частиц. Рассмотрены три варианта образования ограненных эвтектических карбидов призматической формы в железоуглеродистых сплавах. Один из них предполагает термическое деление пластин вторичного цементита либо цементита ледебурита на отдельные микрообъемы. Второй вариант связан с дроблением кристаллов цементита в процессе деформации материала и образованием угловатых осколков. Третий вариант основан на превращении цементита метастабильного ледебурита в стабильные карбиды призматической морфологии. Показано, что карбидная неоднородность в нелегированных высокоуглеродистых сплавах типа булат представляет собой совокупность крупных ограненных эвтектических карбидов призматической формы. Ожидается, что образование морфологии избыточного цементита в виде ограненных призматических карбидов положительным образом отразится на режущих свойствах инструмента.

Ключевые слова: булат; инструментальная сталь; сталь ледебуритного класса.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-43-51

Введение

В настоящее время существует мнение, что булатная сталь утратила свое прежнее практическое значение. С нашей точки зрения, одним из объяснений этого является то, что у специалистов нет согласованных представлений о химическом составе и микроструктуре материалов

такого типа, которые определяли бы их технологические свойства и обосновывали область применения в современном промышленном производстве. Таким образом, для того чтобы объяснить причины сочетания отличной режущей способности булатного клинка с высокой упругостью материала, необходимо выявить истинную структуру материала и подчеркнуть

основополагающие, характерные для него признаки.

На основании анализа работ в области булатного оружия [1–12] нами был сделан вывод, что в некоторых образцах булатных сталей цементитные кристаллы имеют признаки, отличающие их от первичного и вторичного цементита, образующегося в типичных железоуглеродистых сплавах. Характерная особенность данного цементита заключается в аномальной крупности кристаллов, имеющих форму неправильных октаэдров и призм. С нашей точки зрения, цементит, присутствующий в булатных клинках, по морфологии близок к эвтектическим карбидам ледебуритных сталей [13, 14].

В периодической литературе нет единого мнения о терминологии, касающейся аномально крупных карбидных образований. При анализе легированных ледебуритных сталей для обозначения крупных карбидов, имеющих форму неправильных октаэдров и призм, встречаются такие термины, как «угловатые карбиды», «призматические карбиды», «ограниченные карбиды», «эвтектические карбиды» [15–19]. Последний термин встречается, вероятно, наиболее часто. Предполагается, что карбиды этого типа образуются из эвтектики путем перекристаллизации метастабильных соединений типа M_6C и M_3C в стабильные карбидные образования типа MC , M_2C и M_7C_3 с гексагональной структурой.

Механизм образования аномально крупных ограниченных карбидов в нелегированных железоуглеродистых сплавах типа булат до сих пор не выяснен. Вопрос о преобразовании цементита в угловатые карбиды ограниченной формы, с нашей точки зрения, является одним из наиболее интересных и важных в анализируемой проблеме. Он имеет не только научное, но и прикладное значение. Знание ответа на этот вопрос и влияние на процесс преобразования цементита позволяют управлять широким комплексом механических и физических свойств нелегированных высокоуглеродистых сплавов типа булат.

Цель данной работы – изучение нелегированных высокоуглеродистых сплавов ледебуритного класса и создание ресурсосберегающей технологии получения режущего инструмента, обладающего повышенной упругостью при динамических нагрузках. Механические свойства данных сплавов будут зависеть главным образом

от морфологических особенностей избыточных карбидов и способности перлитной матрицы воспринимать нагрузку.

Методика проведения исследований

Объектами исследования служили отливки из высокоуглеродистого сплава типа БУ22А, содержащего 2,25 % С; 0,065 % Si; 0,024 % Mn; 0,002 % P; 0,004 % S. Сплав был получен в вакуумной печи на научно-производственной базе ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина». Цифры и буквы и в маркировке сплава означают следующее: БУ – булат углеродистый, содержащий не выше 0,1 % марганца и кремния каждого в отдельности; 22 – средняя массовая доля углерода; А – высококачественный сплав.

Нагрев образцов в процессе термической обработки проводили в камерной лабораторной печи типа СНОЛ 6/11. Деформацию заготовок осуществляли методом косоугольной ковки (под углом 45°) в интервале температур от 850 до 650 °С. Металлографические исследования были выполнены на оптическом микроскопе МЕТАМ РВ-21-2 в диапазоне увеличений от 50 до 1100 крат. Для более глубоких структурных исследований использовали растровый электронный микроскоп Carl Zeiss EV0 50 XVP, оснащенный микроанализатором EDSX-Act. Химический состав сплава контролировали на оптико-эмиссионном спектрометре типа ARL 3460. Фазовый состав материала оценивали на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA. Дифракционные картины образцов были зарегистрированы с использованием в качестве источника излучения медной рентгеновской трубки при напряжении 40 кВ и токе 40 мА. Анализ образцов осуществляли в геометрии на отражение без монохроматизации падающего и отраженного излучения. Средняя величина длины волны пучка λ , фиксируемой энергодисперсионным Si(Li) детектором, составляла 0,15406 нм. Дифракционные картины регистрировали с шагом $\Delta 2\theta = 0,02$ и $0,05^\circ$ в режиме времени $t = 4 \dots 9$ с.

Результаты исследований и их обсуждение

Известно, что упругие свойства материала и режущая способность изготовленного из него инструмента в значительной степени зависят от

объемной доли избыточной карбидной фазы и ее морфологии. Основными технологическими параметрами, определяющими форму избыточного цементита в железоуглеродистых сплавах, являются температура нагрева, скорость охлаждения и степень деформации заготовок. В данной работе поставлен вопрос, в какой степени указанные технологические параметры способны изменить морфологию избыточных карбидов в заготовках из нелегированного железоуглеродистого сплава, содержащего 2,25 % углерода.

В выплавленных вакуумным методом и охлажденных на воздухе заготовках сплава БУ22А зафиксирована матрица из мелкодисперсного пластинчатого перлита с расположенными в

ней избыточными пластинами цементита видманштеттова типа, объемная доля которого составляет ~ 20 % (рис. 1, а). В условиях быстрого охлаждения отливок диффузионные процессы развиваться в полной мере не успевают. Явно выраженных участков с ледебуритной эвтектикой в структуре сплава не наблюдается. В результате материал, содержание углерода в котором соответствует чугуну, кристаллизуется с формированием структуры, характерной для высокоуглеродистой стали. При дальнейшем охлаждении сплава вся избыточная карбидная фаза из пересыщенного углеродом аустенита выделяется преимущественно в виде вторичного цементита видманштеттова типа, как показано на рис. 1, а.

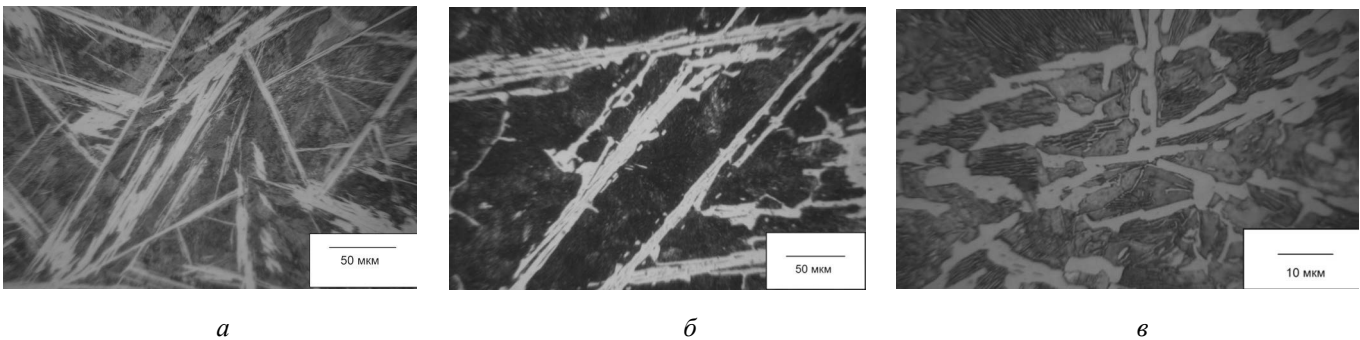


Рис. 1. Морфология избыточного цементита сплава БУ22А:

а – вакуумная плавка, охлаждение на воздухе; б – отжиг при 700 °С, выдержка 2 ч; в – отжиг при 1150 °С, выдержка 2 ч

Одной из задач, решаемых в данной работе, является оценка преобразований цементита, происходящих в процессе нагрева образцов при температуре ниже линии A_1 (при 700 °С), а также при нагреве выше температуры эвтектического преобразования (при 1150 °С). В процессе отжига при 700 °С в структуре сплава фазовых превращений не происходит. В перлитной матрице снимаются остаточные напряжения, возникшие на этапе кристаллизации расплава. Микроструктурные исследования показали, что на поверхности пластин видманштеттова цементита появляются выступы в виде шипов (рис. 1, б). В работе [20] отмечалось, что угол раскрытия шипов-выступов составляет около 60°, а их наличие связывалось с разделением пластин видманштеттова цементита на части и запуском процесса сфероидизации карбидов. В данных условиях отжига зафиксированы аналогичные структурные изменения цементитных кристаллов (рис. 1, б).

В процессе нагрева и выдержке при 1150 °С в течение двух часов сплав подвергается фазо-

вым превращениям, для морфологии избыточного цементита характерны значительные изменения. В результате медленного охлаждения с печью матрица сплава БУ22А приобретает структуру перлита с межпластинчатым расстоянием ~0,6...1,0 мкм (см. рис. 1, в). В плоскости шлифа наблюдаются конгломераты грубых карбидных образований (рис. 1, в), распределенных в пластинчатом перлите. Металлографические признаки позволяют идентифицировать эти структурные образования как метастабильный ледебурит. Характерной морфологической особенностью такого ледебурита является то, что по сравнению с пластинчатым и сотовым ледебуритом белого чугуна он не обладает ярко выраженной слоистостью [21].

В целях оценки влияния горячей пластической деформации на морфологию избыточной карбидной фазы заготовки из сплава БУ22А деформировали бойками по схеме крестовой ковки в интервале температур от 850 до 650 °С. Деформации были подвергнуты образцы двух типов.

В образцах первого типа избыточная фаза была представлена пластинами цементита видманштеттова типа (рис. 2, *а*). В структуре образцов второго типа присутствовали микрообъемы ледебурита (рис. 3, *а*).

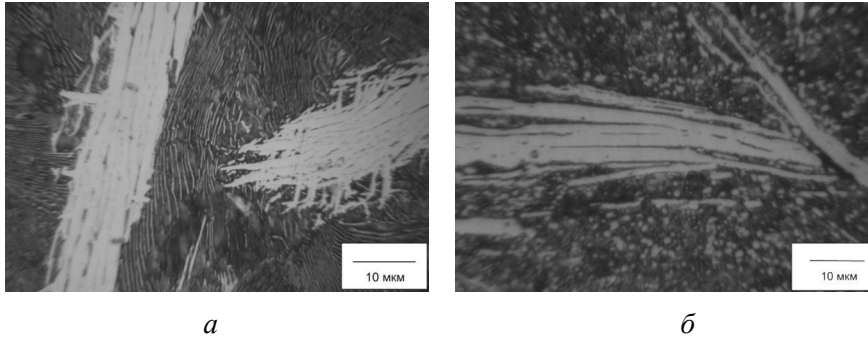


Рис. 2. Структура видманштеттова цементита в сплаве БУ22А до (*а*) и после (*б*) пластической деформации

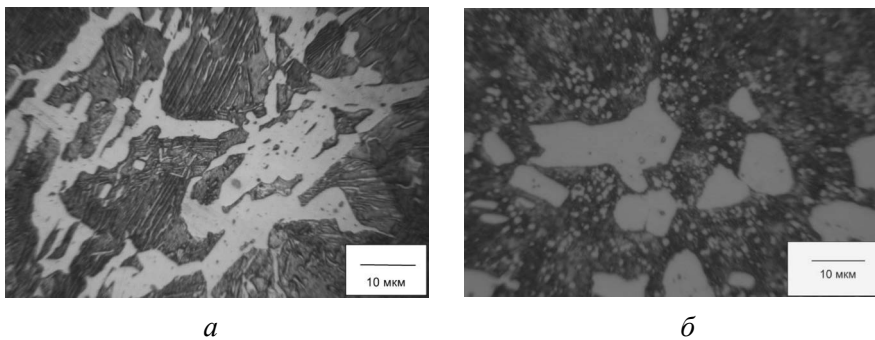


Рис. 3. Формирование в сплаве БУ22А карбидов призматической формы:

а – структура сплава после отжига при 1150 °С; *б* – структура сплава после горячей пластической деформации

Форму избыточного цементита определяли путем построения зависимости площади их сечения от степени вытянутости кристаллов. Характер распределения измеренных значений позволяет определить анализируемые кристаллы цементита, как пластины. С увеличением вытянутости пластин площадь их сечения уменьшается. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными, представленными в работе [22].

Во время деформации цементитные пластины видманштеттова типа не разрушаются хрупко, как полагали ранее [23]. Многие из пластин деформируются, расщепляясь по поверхностям сопряжения слоев (рис. 2, *б*). О присутствии такого рода слоев в цементите видманштеттова типа отмечали Ю.Н. Таран и В.И. Новик [24]. Слоистое строение цементита отчетливо просматривается при изучении деформированных

образцов из сплава БУ22А (рис. 2, *б*). Толщина пластин видманштеттова цементита составляет $\sim 7 \dots 10$ мкм. В пределах каждой пластины может находиться до десяти и более слоев толщиной $\sim 0,6 - 1,0$ мкм. Авторы работы [24] полагают, что на границах между слоями концентрируются дефекты, в том числе дислокации. Слои, как правило, состоят из блоков, разориентированных между собой на угол $1' \dots 2'$. Границы блоков представляют собой дислокационные сетки. Природа их происхождения связана с релаксацией напряжений, возникающих в процессе роста кристаллов цементита. Для цементита видманштеттова типа характерна низкая термическая стабильность. В присутствии карбидов пластинчатой формы сплав существенно охрупчивается. Для обеспечения упругости и высоких режущих свойств клинка необходима другая морфология карбидов, обеспечивающая термическую и механическую стабильность материала.

Отмеченным выше требованиям удовлетворяют ограниченные карбиды призматической формы, возникающие в структуре высокоуглеродистых нелегированных сплавов в процессе деформации ковкой. При деформации сплава БУ22А с колониями ледебурита (рис. 3, *а*) методом косойковки в интервале температур от 850 до 650 °С в сплаве происходят существенные структурные преобразования. Пластины цементита, находящиеся внутри аустенитной матрицы, испытывают сжимающие и сдвиговые напряжения. Вокруг карбидных конгломератов накапливаются дефекты в виде дислокаций [16]. При достижении критического значения этих дефектов менее стабильные карбидные образования ледебурита превращаются в более устойчивые трудно деформируемые карбиды призматической формы (рис. 3, *б*). Возможный механизм такого рода преобразования описан в работе [16]. Рост возникших при деформации образцов карбидов возможен в процессе диф-

фузионного перераспределения углерода между структурными составляющими сплава.

Особенности строения полученного таким образом материала, зафиксированные методом растровой электронной микроскопии, представлены на рис. 4, *а, б*. Данные рентгеноструктур-

ного анализа, деформированного ковкой сплава БУ22А, свидетельствуют о том, что основными фазами в исследуемом материале являются α -железо и цементит (рис. 5, *а*). Присутствия графита и каких-либо аномалий фазового состава сплава не зафиксировано.

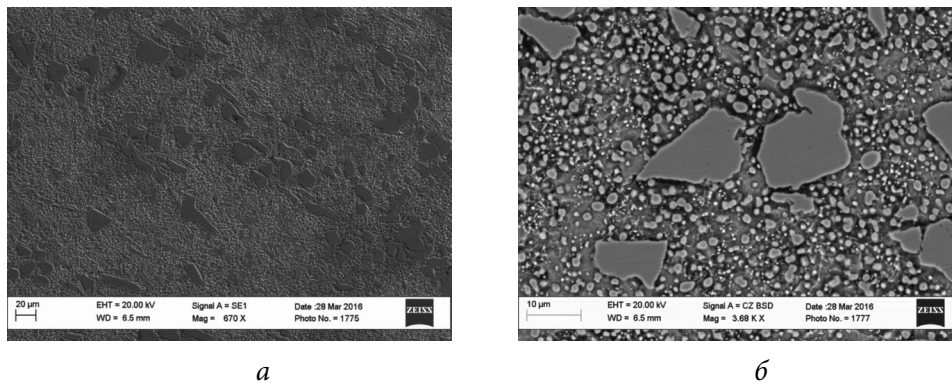


Рис. 4. Особенности тонкого строения цементитной фазы в сплаве БУ22А

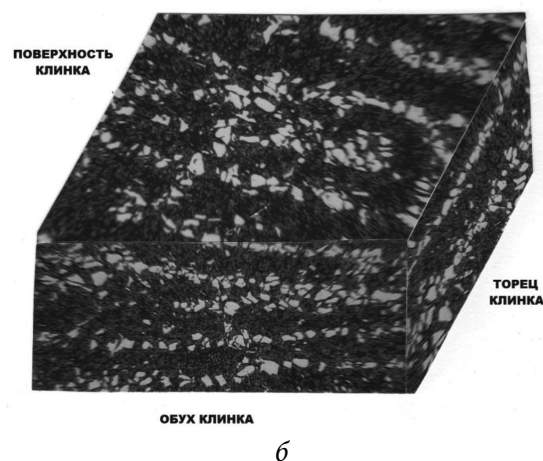
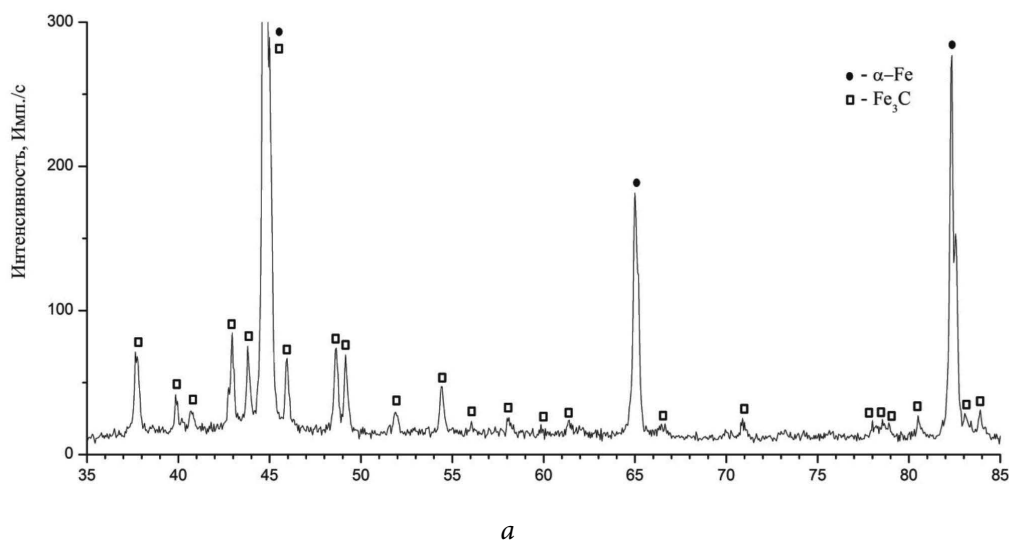


Рис. 5. Результаты рентгенофазового анализа (*а*) и трехмерная схема структуры фрагмента клинка из сплава БУ22А с избыточной фазой в виде ограниченных призматических карбидов (*б*)

По мнению авторов работы, можно выделить три варианта объяснения преобразований карбидной фазы, происходящих при деформации анализируемого сплава. В первом случае необходимо учитывать подробно описанный в работе [20] процесс термического деления грубых цементитных образований на отдельные изолированные блоки. Авторами показано, что в процессе отжига на поверхности цементита в местах примыкания границ либо субграниц аустенита появляются характерные выступы в виде шипов. Рост этих образований обусловлен повышенной скоростью диффузии углерода в зонах выхода границ зерен. В процессе изотермической выдержки пластины цементита между шипами утоняются вплоть до разделения на отдельные части. Возникшие таким образом карбидные образования являются угловатыми. Как правило, они расположены вдоль бывших цементитных пластин.

Второй вариант объяснения основан на процессе механического дробления грубых цементитных кристаллов. Такое представление структурных преобразований пластически деформируемого сплава, характерное для описания механизма формирования карбидов угловатой формы, подробно отражено в работе [15]. Этот механизм предполагает, что анализируемые карбиды являются результатом измельчения цементитных блоков (пластин) с формированием множества изолированных друг от друга осколков. Чем больше степень деформации во времяковки, тем сильнее дробятся присутствующие в сплаве карбиды. Дробление карбидных конгломератов сопряжено с процессами скопления дислокаций [21].

Суть третьей гипотезы заключается в перекристаллизации цементита ледебурита в процессе пластической деформации железоуглеродистого сплава [16]. В результате перестройки решетки метастабильного цементита формируются более устойчивые остроконечные карбиды. По мнению П.Ф. Нижниковской, происходящие при этом преобразования сопровождаются образованием обедненных углеродом участков цементита и ослаблением барьеров Пайерлса–Наббаро [25].

По-видимому, все три механизма преобразования цементита ледебурита в карбиды призматической формы в той или иной степени могут проявляться на практике. Приведенных объяс-

нений было бы достаточно, если бы не встречались обстоятельства, не согласующиеся с отмеченными выше аргументами. Речь идет о том, что некоторые карбиды призматической формы превышают размеры ледебуритных колоний либо соизмеримы с ними. Это может означать, что преобразование карбидов ледебурита происходит не дроблением их при деформировании заготовки, а путем перестройки кристаллов. Деформация лишь ускоряет процессы перекристаллизации ледебурита и образования карбидов остроконечной формы.

Результаты структурных исследований высокоуглеродистого нелегированного сплава типа булат свидетельствуют о явно выраженной неравномерности распределения эвтектической карбидной фазы в объеме перлитной матрицы (рис. 5, б). Этот вывод соответствует представлениям И.Н. Голикова о химической неоднородности инструментальных сталей [21].

Выводы

1. В результате неравновесной кристаллизации структура сплава БУ22А с содержанием углерода 2,25 % представляет собой мелкодисперсный пластинчатый перлит с избыточным цементитом видманштеттова типа. Образования четко выраженных колоний эвтектики, характерных для доэвтектических чугунов, в данном сплаве не зафиксировано.

2. Термическая обработка сплава БУ22А при температуре 700 °С не приводит к существенным изменениям исходной структуры. На пластинах цементита образуются выступы в виде шипов, однако морфология избыточного цементита не изменяется. В процессе горячей пластической деформации образцов из сплава БУ22А характерного разрушения пластин видманштеттова цементита не происходит. Кристаллы данного типа расщепляются на слои толщиной 0,6...1,0 мкм. Однако такая структура материала не обеспечивает высоких режущих свойств инструмента.

3. Нагрев и выдержка сплава с исходной структурой при температуре 1150 °С в течение двух часов обеспечивают образование в локальных областях сплава микрообъемов ледебурита, отличающегося по строению от ледебурита, характерного для белых чугунов. При горячей деформации сплава БУ22А, в структуре которого

присутствуют микрообъемы ледебурита, происходит кардинальное изменение морфологии карбидной фазы. Образуются карбиды призматической формы, которые повышают режущие свойства инструмента.

Список литературы

1. Русские ученые-металловеды / общ. ред. и вступ. очерки Д.М. Нахимова и А.Г. Рахштадта. – М.: Машгиз, 1951. – 504 с.
2. Гаев И.С. Булат и современные железоуглеродистые сплавы // МиТОМ. – 1965. – № 9. – С. 17–24.
3. Электронно-микроскопические исследования булатной стали / Ф.Н. Тавадзе, Б.Г. Амаглобели, Г.В. Инанишвили, Т.В. Этерашвили // Сообщения АН ГССР. – 1984. – № 3. – С. 601–604.
4. Радиационная повреждаемость и свойства сплавов / Г.Г. Бондаренко, Н.Б. Кириллов, А.М. Паршин, А.Н. Тихонов. – СПб.: Политехника, 1995. – 300 с.
5. Гуревич Ю.Г. Инструмент из булатной стали // Технология машиностроения. – 2007. – № 12. – С. 35–37.
6. Архангельский Л.Б. Секреты булата. – М.: Металлургиздат, 2007. – 164 с. – ISBN 978-5-902194-23-1.
7. Счастливцев В.М., Герасимов В.Ю., Родионов Д.П. Структура трех златоустовских булатов // Физика металлов и материаловедение. – 2008. – Т. 106, № 2. – С. 182–188.
8. Таганов И. Закат легенд о булате // Калашников. Оружие, боеприпасы, снаряжение. – 2009. – № 11. – С. 92–97.
9. Структура булата / В.М. Счастливцев, В.Н. Урцев, А.В. Шмаков, В.Н. Дегтярев, А.Я. Наконечный, Е.Д. Мокшин, И.Л. Яковлева // Физика металлов и материаловедение. – 2013. – Т. 114, № 7. – С. 650–657. – doi: 10.7868/S0015323013070103.
10. Verhoeven J.D., Pendray A.H., Gibson E.D. Wootz damascus steel blades // Materials Characterization. – 1996. – Vol. 37, iss. 1. – P. 9–22. – doi: 10.1016/S1044-5803(96)00019-8.
11. Wadsworth J., Sherby O.D. Response to Verhoeven comments on Damascus steel // Materials Characterization. – 2001. – Vol. 47. – P. 163–165. – doi: 10.1016/S1044-5803(01)00184-X.
12. Barnett M.R., Sullivan A., Balasubramaniam R. Electron backscattering diffraction analysis of an ancient wootz steel blade from central India // Materials Characterization. – 2009. – Vol. 60, iss. 4. – P. 252–260. – doi: 10.1016/j.matchar.2008.10.004.
13. Суханов Д.А. Булат – нелегированная сталь карбидного класса // Металлург. – 2014. – № 2. – С. 93–96.
14. Sukhanov D.A., Arkhangelskiy L.B. Damascus steel microstructure // Metallurgist. – 2016. – Vol. 59, iss. 9. – P. 818–822. – doi: 10.1007/s11015-016-0178-x.
15. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1968. – 568 с.
16. Нижниковская П.Ф. Карбидные превращения в эвтектиках железоуглеродистых сплавов // Известия Академии наук СССР. Металлы. – 1982. – № 6. – С. 105–110.
17. Влияние деформации и отжига на структуру эвтектического цементита / Ю.Н. Таран, П.Ф. Нижниковская, Е.В. Пирогова, Т.М. Миронова, А.А. Бурбелко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 3. – С. 76–78.
18. Кремнев Л.С., Заболоцкий В.К. Крупные карбиды в структуре быстрорежущих сталей // МиТОМ. – 1969. – № 1. – С. 54–56.
19. Буров С.В., Худорожкова Ю.В., Рыжков М.А. Особенности распада аустенита при непрерывном охлаждении перегретой заэвтектоидной стали // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 4 (61). – С. 65–70.
20. Особенности превращения первородного аустенита белого чугуна при охлаждении / К.П. Бунин, И.Е. Лев, М.И. Притоманова, М.Ф. Евсюков // Известия вузов. Черная металлургия. – 1969. – № 2. – С. 121.
21. Голиков И.Н. Дендритная ликвация в стали. – М.: Металлургиздат, 1958. – 206 с.
22. Плотникова Н.В. Роль морфологии цементита в обеспечении конструктивной прочности углеродистых заэвтектоидных сталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2004. – 19 с.
23. Бунин К.П., Малиночка Я.Н., Таран Ю.Н. Основы металлографии чугуна. – М.: Металлургия, 1969. – 415 с.
24. Таран Ю.Н., Новик В.И. Строение цементита белого чугуна // Литейное производство. – 1967. – № 1. – С. 34–38.
25. Нижниковская П.Ф. Структура и пластичность железоуглеродистых сплавов эвтектического типа // МиТОМ. – 1984. – № 9. – С. 5–9.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4 (73), October – December 2016, Pages 43–51

The morphology of the carbides in high-carbon alloys such as damascus steel**Sukhanov D.A.**¹, Ph.D. (Engineering), e-mail: suhanov7@mail.ru**Arkhangelskiy L.B.**², president, tigram.korolev@mail.ru**Plotnikova N.V.**³, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: n.plotnikova@corp.nstu.ru¹ ASK-MSC Company, 8 Nauchny proezd, build. 1, Moscow, 117246, Russian Federation² MOO “Soyuz Kuznetsov”, 6 Tamozhennyi proezd, Moscow, 111033, Russian Federation³ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation**Abstract**

Analysis of changes in the morphology of carbides of the unalloyed high-carbon alloys such as damascus steel depending on the degree of supercooling of the melt, treatment and plastic deformation is conducted. It is shown that the crystallization process of the alloy with high carbon content (2.25 % C) at high degrees of supercooling is characterized by features typical for high-carbon steel. It is shown that the hot deformation of damascus steel with the structure of Widmannstätten cementite does not lead to its crushing. Plates of Widmannstätten cementite split into separate layers with a thickness 0.6...1.0 μm. However, the formation of such materials' structure does not provide good cutting properties of the tool. Formation of ledeburite structure which is similar to ledeburite of white cast iron is found after high temperature annealing of the initial structure at 1150 °C for 2 hours. Two competing processes of forming proeutectoid carbides at strain of damascus steel, associated with spheroidization and particles faceting, are determined. Three alternatives of the formation of eutectic carbides with faceted prismatic shape in iron-carbon alloys are considered. One of them involves thermal division of plates of secondary cementite or ledeburite cementite into separate microvolumes. The second alternative involves crushing of cementite crystals during deformation of the material and the formation of angular fragments. The third option is based on the conversion of metastable ledeburite cementite into stable carbides having prismatic morphology. It is shown that carbide heterogeneity in the unalloyed high-carbon steels such as damaskus is an aggregate of large faceted eutectic carbides with prismatic shape. It is expected that the formation of proeutectoid cementite with faceted prismatic form will have positive effect on the properties of cutting tool.

Keywords

Damascus steel, bulat, Wootz steel, Indian steel.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-43-51

References

1. Nakhimov D.M., Rakhshadt A.G., eds. *Russkie uchenye-metallovedy* [Russian scientists-metallurgists]. Moscow, Mashgiz Publ., 1951. 504 p.
2. Gaev I.S. Bulat i sovremennye zhelezouglerodistyie splavy [Damascus steel and modern iron-carbon alloys]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 1965, no. 9, pp. 17–24. (In Russian)
3. Tavazde F.N., Amaglobeli B.G., Inanishvili G.V., Eterashvili T.V. Elektronno-mikroskopicheskie issledovaniya bulatnoi stali [Electron microscopy studies of damask steel]. *Soobshcheniya Akademii nauk Gruzinskoi SSR – Bulletin of the Academy of Sciences of the Georgian SSR*, 1984, no. 3, pp. 601–604.
4. Bondarenko G.G., Kirillov N.B., Parshin A.M., Tikhonov A.N. *Radiatsionnaya povrezhdaemost' i svoistva splavov* [Radiation damage and the properties of the alloys]. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 1995. 300 p.
5. Gourevich Yu.G. Instrument iz bulatnoi stali [Damascus steel tool]. *Tekhnologiya mashinostroeniya – Technology of Mechanical Engineering*, 2007, no. 12, pp. 35–37.
6. Arkhangel'skii L.B. *Sekrety bulata* [Secrets of damascus steel]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 2007. 164 p. ISBN 978-5-902194-23-1.

7. Schastlivtsev V.M., Gerasimov V.Yu., Rodionov D.P. Struktura trekh zlatoustovskikh bulatov [Structure of three Zlatoust bulats (damascus-steel blades)]. *Fizika metallov i metallovedenie – The Physics of Metals and Metallography*, 2008, vol. 106, no. 2, pp. 182–188. (In Russian)
8. Taganov I. Zakat legend o bulate [Sunset legends about damascus steel]. *Kalashnikov. Oruzhie, boepripasy, snaryazhenie – Kalashnikov. Weapons, ammunition and equipment*, 2009, no. 11, pp. 92–97.
9. Schastlivtsev V.M., Urtsev V.N., Shmakov A.V., Degtyarev V.N., Nakonechnyi A.Ya., Mokshin E.D., Yakovleva I.L. Struktura bulata [Structure of bulat]. *Fizika metallov i metallovedenie – The Physics of Metals and Metallography*, 2013, vol. 114, no. 7, pp. 650–657. doi: 10.7868/S0015323013070103 (In Russian)
10. Verhoeven J.D., Pendray A.H., Gibson E.D. Wootz damascus steel blades. *Materials Characterization*, 1996, vol. 37, iss. 1, pp. 9–22. doi: 10.1016/S1044-5803(96)00019-8
11. Wadsworth J., Sherby O.D. Response to Verhoeven comments on Damascus steel. *Materials Characterization*, 2001, vol. 47, iss. 2, pp. 163–165. doi: 10.1016/S1044-5803(01)00184-X
12. Barnett M.R., Sullivan A., Balasubramaniam R. Electron backscattering diffraction analysis of an ancient wootz steel blade from central India. *Materials Characterization*, 2009, vol. 60, iss. 4, pp. 252–260. doi: 10.1016/j.matchar.2008.10.004
13. Sukhanov D.A. Bulat – nelegirovannaya stal' karbidnogo klassa [Damask is a non-alloyed steel of carbide grade]. *Metallurg – Metallurgist*, 2014, no. 2, pp. 93–96. (In Russian)
14. Sukhanov D.A., Arkhangel'skiy L.B. Damascus steel microstructure. *Metallurgist*, 2016, vol. 59, iss. 9, pp. 818–822. doi: 10.1007/s11015-016-0178-x
15. Geller Yu.A. *Instrumental'nye stali* [Tool steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1968. 568 p.
16. Nizhnikovskaya P.F. Karbidnye prevrashcheniya v evtektikakh zhelezouglerodistykh splavov [Carbide transformations in eutectic iron-carbon alloys]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Metally – News of Academy of Sciences of the USSR. Metals*, 1982, no. 6, pp. 105–110.
17. Taran Y.N., Nizhnikovskaya P.F., Pirogova E.V., Mironova T.M., Burbelko A.A. Vliyanie deformatsii i otzhiga na strukturu evtekticheskogo tsementita [Effect of deformation and annealing on the structure of the eutectic cementite]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya – Steel in Translation*, 1991, no. 3, pp. 76–78. (In Russian)
18. Kremnev L.S., Zabolotskiy V.K. Krupnye karbidy v strukture bystrorezhushchikh staley [Large carbides in the structure of high-speed steels]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 1969, no. 1, pp. 54–56. (In Russian)
19. Burov S.V., Khudorozhkova Yu.V., Ryzhkov M.A. Osobennosti raspada austenita pri nepreryvnom okhlazhdenii peregretoi zaevtektoidnoi stali [Peculiarities of austenite transformation under continuous cooling of hypereutectoid steel]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 4 (61), pp. 65–70.
20. Bunin K.P., Lev I.E., Pritomanova M.I., Evsyukov M.F. Osobennosti prevrashcheniya pervorodnogo austenita belogo chuguna pri okhlazhdenii [Features original transformation of austenite on cooling white iron]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya – Steel in Translation*, 1969, no. 2, p. 121. (In Russian)
21. Golikov I.N. *Dendritnaya likvatsiya v stali* [Dendritic segregation in the steel]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1958. 206 p.
22. Plotnikova N.V. *Rol' morfologii tsementita v obespechenii konstruktivnoi prochnosti uglerodistykh zaevtektoidnykh staley*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [The role of the morphology of the cementite to provide structural strength carbon steels hypereutectoid. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2004. 19 p.
23. Bunin K.P., Malinochka Ya.N., Taran Yu.N. *Osnovy metallografii chuguna* [Fundamentals of iron metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969. 415 p.
24. Taran Yu.N., Novik V.I. Stroenie tsementita belogo chuguna [The structure of white iron cementite]. *Liteinoe proizvodstvo – Foundry. Technologies and Equipment*, 1967, no. 1, pp. 34–38.
25. Nizhnikovskaya P.F. Struktura i plastichnost' zhelezouglerodistykh splavov evtekticheskogo tipa [Structure and ductility of eutectic type iron-carbon alloys]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 1984, no. 9, pp. 5–9. (In Russian)

Article history

Received 5 July 2016

Revised 10 October 2016

Accepted 31 October 2016

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОПЛАВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ*

Е.Е. КОРНИЕНКО¹, канд. техн. наук, доцент

А.А. НИКУЛИНА¹, канд. техн. наук, доцент

А.Г. БАННОВ¹, канд. техн. наук, доцент

В.И. КУЗЬМИН², канд. техн. наук, доцент

М. МИЛЬДЕБРАХ³, инженер

В.А. БЕЗРУКОВА¹, студент

А.А. ЖОЙДИК¹, студент

(¹НГТУ, г. Новосибирск

²ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск,

³Ганновский университет им. Вильгельма Лейбница,

г. Гарбсен)

Поступила 5 октября 2016

Рецензирование 21 октября 2016

Принята к печати 15 ноября 2016

Корниенко Е.Е. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: kornienko_ee@mail.ru

Покрyтия из самофлюсующегося порошка марки ПР-Н77Х15С3Р2 (система Ni-Cr-Si-B) наносили на подложку из низкоуглеродистой стали 20 при помощи плазменного напыления. С целью изучения влияния температуры оплавления на структурные и фазовые превращения образцы с покрытиями оплавливали в печи при температурах от 1030 до 1100 °С. Структурные исследования проводили с использованием оптической и растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного и рентгенофазового анализов. Кроме того, в статье приведены результаты измерений микротвердости, а также износостойкости в условиях трения скольжения со смазочным материалом по схеме диск–плоскость. В работе показано, что основными структурными составляющими покрытий после оплавления являются дендриты γ -Ni, включения Cr_7C_3 и эвтектика Ni-Ni₃B. Для покрытий, оплавленных ниже 1070 °С, характерно также наличие включений CrB и эвтектики Ni₃B-Ni₆Si₂B, для покрытий, оплавленных при 1100 °С, включений CrB₂ и эвтектики (γ -Ni)-CrB. Выявлено, что с повышением температуры оплавления объемная доля твердых фаз (эвтектики, а также карбидов и боридов хрома) увеличивается, что приводит к росту микротвердости и износостойкости.

Ключевые слова: самофлюсующиеся сплавы на основе никеля, сплавы системы Ni-Cr-Si-B, плазменное напыление, оплавление.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-52-62

Введение

Одной из наиболее актуальных проблем современного материаловедения является разработка новых конструкционных материалов,

обладающих высокими технологическими свойствами и способных выдерживать все более жесткие условия работы. Известно, что эксплуатация деталей машин является причиной их износа, а это, в свою очередь, требует заме-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-50197 мол_нр.

ны и увеличивает себестоимость выпускаемой продукции. Кроме того, изготавливать деталь целиком из дорогостоящего износостойкого материала нецелесообразно, так как это связано с высокой стоимостью и трудностью обработки поверхности. Увеличить срок службы ответственных деталей можно путем образования на их поверхности слоя или покрытия, обладающих высоким уровнем требуемых свойств.

Для формирования покрытий, стойких к абразивному износу, используют различные материалы. Известно, что самофлюсующиеся сплавы на основе никеля, а именно сплавы системы Ni-Cr-Si-B, обладают комплексом высоких свойств. Никель характеризуется достаточно высокими показателями пластичности и прочности [1]. Высокая коррозионная стойкость на воздухе, в пресной и морской воде, а также во многих кислотах объясняется образованием на поверхности никеля плотной тонкой пленки NiO [2]. Для повышения стойкости к окислительным средам, а также жаростойкости в никель вводят хром [2, 3]. Добавки бора и углерода (который также присутствует в этих сплавах в небольшом количестве – от 0,3 до 1,2 % в зависимости от марки порошка [4]) обеспечивают формирование разнообразных химических соединений в никелевой матрице, например, боридов хрома и никеля и карбидов хрома, что способствует повышению твердости и износостойкости [3, 5]. Кроме того, введение бора и кремния снижает температуру плавления сплавов и улучшает самофлюсующиеся свойства [2, 3, 6]. Сочетание высокой износостойкости, коррозионной стойкости и жаростойкости обуславливает применение сплавов системы Ni-Cr-Si-B в таких отраслях промышленности, как аэрокосмическая и самолетостроение [7], атомная [8], нефтяная, химическая и металлургия [9].

Существуют различные способы нанесения покрытий из самофлюсующихся сплавов: наплавка (лазерная [10, 11] и плазменно-дуговая [12]) и термическое напыление (плазменное [13–19], пламенное [20, 13], высокоскоростное кислородно-топливное [14]). Наиболее широкое применение нашла технология плазменного напыления, которой в последнее время уделяется повышенное внимание. Данная технология позволяет не только формировать покрытия на поверхностях любой сложности, но и восста-

навливать наиболее изношенные участки деталей. Несмотря на перечисленные достоинства, для плазменных покрытий характерно наличие различного рода дефектов, например, оксидных пленок, пор, нерасплавившихся частиц [12, 21–23]. Перечисленные недостатки ограничивают применение плазменных покрытий в агрессивных средах и способствуют снижению износостойкости [24, 25]. Кроме того, покрытия, полученные по этой технологии, характеризуются структурной и фазовой неоднородностью [25, 26].

Одним из способов повышения качества плазменных покрытий является последующее оплавление [27, 28]. На сегодняшний день выполнено значительное количество работ, посвященных технологии плазменного напыления самофлюсующихся сплавов, но практически не говорится о структурных превращениях, происходящих в результате оплавления сплавов выбранной системы. Таким образом, целью данной работы является исследование влияния температуры оплавления на структуру и свойства самофлюсующихся покрытий.

Материалы и методы исследований

В качестве напыляемого материала в настоящей работе предлагается использование коммерческого самофлюсующегося порошка марки ПР-Н77Х15С3Р2, химический состав которого приведен в табл. 1. Порошок представлял собой сферические частицы размерами 40...100 мкм.

Плазменное напыление выполняли на установке «Термоплазма 50-01» с кольцевым вводом порошка в Институте прикладной и теоретической механики СО РАН. В качестве подложки использовали образцы прямоугольной формы размером 30 × 10 × 10 мм из низкоуглеродистой стали марки 20. Ранее были определены оптимальные режимы плазменного напыления для выбранного порошка: сила тока – 140 А и напряжение – 265 В [23]. Дистанция напыления составляла 170 мм. В качестве плазмообразующего

Таблица 1

Химический состав напыляемого порошка, мас. %

Ni	Cr	B	Si	Fe	Другие
77,6	15,1	2	3,2	2,1	Остальное

газа использовали воздух. Функцию защитного, транспортирующего и фокусирующего газов выполняла смесь воздуха и пропан-бутана. Перед напылением покрытий поверхность стальных заготовок очищали при помощи пескоструйной обработки. В качестве подслоя на очищенную поверхность заготовок наносили порошок марки ПН85Ю15.

С целью изучения влияния температуры оплавления на структурные и фазовые превращения, происходящие в покрытиях, образцы нагревали до температур 1030, 1050, 1070 и 1100 °С (время выдержки 10 мин, охлаждение на воздухе). Для проведения термической обработки использовали лабораторные электрические печи камерного типа СНОЛ-1,6.2,5.1/11-ИЗ.

Образцами для структурных исследований, а также измерений микротвердости являлись поперечные микрошлифы, подготовленные по стандартной методике: механическое шлифование и полирование с применением суспензии, содержащей частицы Al_2O_3 . Для травления микроструктуры использовали раствор следующего состава: 10 мл HCl, 0,1 мл HNO_3 и 10 г $FeCl_3$. Микроструктуру образцов исследовали с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m, а также растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 XVP с микроанализатором EDS X-Act. Фазовый состав изучали, используя рентгеновский дифрактометр ARL X'TRA в CuK_{α} -излучении. Дифрактограммы регистрировали в режиме времени $t = 3$ с и шагом $\Delta 2\theta = 0,05^\circ$. Микротвердость структурных составляющих покрытий оценивали на микротвердомере Wolpert Group 402MVD при нагрузке 10 г. Анализ ДСК порошка ПР-Н77Х15С3Р2 проводили на синхронном термическом анализаторе STA 449C Netzch в среде аргона и воздуха. Порошок охлаждали в графитовом тигле от 1100 до 60 °С, скорость охлаждения составляла 10 °С/мин.

Изнашивание образцов с покрытиями проводили в условиях трения скольжения со смазочным материалом по схеме диск-плоскость. Для проведения исследований поверхность образцов со стороны нанесенного покрытия полировали до шероховатости не грубее $Ra = 0,32$ мкм. В качестве индентора использовали диск из закаленной и отпущенной стали 45 (HRC 50). Нагрузка на индентор составляла 400 Н, скорость вращения диска – 150 об/мин, время изнашивания – три часа.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены результаты термического анализа самофлюсующегося порошка системы Ni-Cr-Si-B при его охлаждении от температуры 1100 °С. Видно, что в диапазоне температур 1100...1011 °С наблюдается сросшийся экзотермический пик, который характеризует процесс кристаллизации исследуемого материала. Пик имеет максимум при температуре 1025 °С и два плеча в районе температур 1038 и 1096 °С, что характеризует множественный процесс кристаллизации.

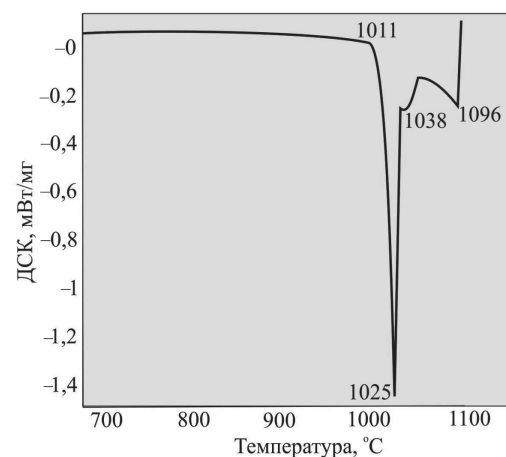
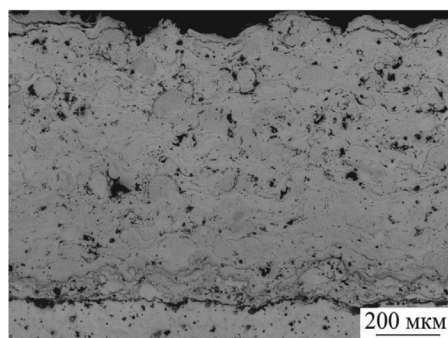


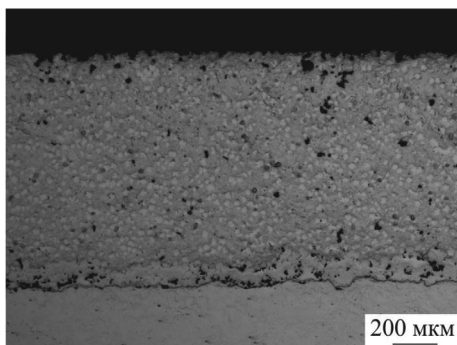
Рис. 1. ДСК-анализ исходного порошка

Согласно полученным данным были подобраны температуры оплавления плазменных покрытий: 1030 и 1100 °С. Кроме того, проводили оплавление и при промежуточных температурах: 1050 и 1070 °С.

Плазменные покрытия до и после оплавления (температура 1030 °С) изображены на рис. 2. Как было показано ранее [23], в основном покрытия состоят из расплавленных в плазменной струе или пластически деформированных частиц. В формировании покрытий участвуют также и исходные (не нагретые) частицы порошка (рис. 2, а). Структура покрытий после оплавления однородна по всему сечению (рис. 2, б). Видно, что оплавление снижает пористость покрытий, но не позволяет полностью избавиться от нее. Стоит отметить, что при подготовке некоторых образцов, нагретых до 1070 °С и выше, для микроструктурного анализа наблюдалось отслоение покрытия и подслоя от подложки, что косвенно может свидетельствовать об их низкой адгезии.

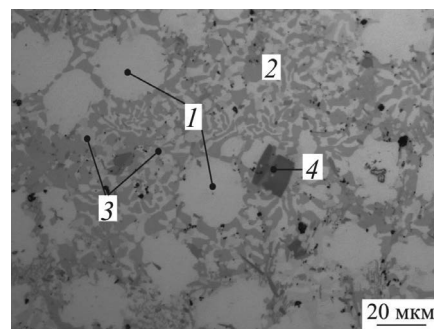


а



б

Рис. 2. Структура самофлюсующихся покрытий до (а) и после (б) оплавления при 1030 °С



а

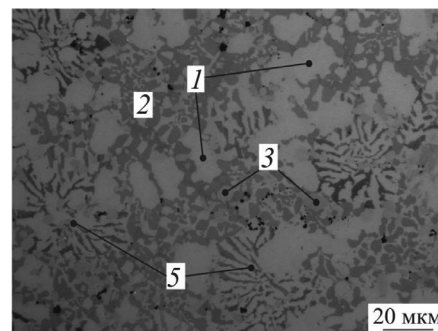


Рис. 3. Структура самофлюсующихся покрытий после оплавления при температуре 1030 (а) и 1100 °С (б)

Согласно данным, полученным при помощи оптической микроскопии, было выявлено, что структура самофлюсующихся покрытий, оплавленных при температурах 1030, 1050 и 1070 °С, подобна, и отличается от структуры покрытий, оплавленных при 1100 °С. В качестве примера на рис. 3 изображены структуры покрытий после оплавления при 1030 и 1100 °С. И в том и в другом случае видны светлые области (1, рис. 3), в основном имеющие округлую форму, пространство между которыми заполнено эвтектикой (2, рис. 3) и светло-серыми включениями (3, рис. 3). Кроме того, в покрытиях наблюдаются темно-коричневые включения: при температурах оплавления ниже 1070 °С включения имеют правильную форму (4, рис. 3, а), при 1100 °С – форму «цветка» (5, рис. 3, б). Нужно отметить, что с увеличением температуры от 1030 до 1070 °С объемная доля фазы 1 уменьшается, а эвтектики 2 и включений 3–5 увеличивается.

На рис. 4 изображены дифракционные картины, полученные от покрытий до оплавления, а также оплавленных при температурах 1070 и 1100 °С. Согласно полученным данным фазовый состав всех покрытий идентичен. Основными фазами являются: γ -Ni, Ni₃B, CrB и Cr₇C₃.

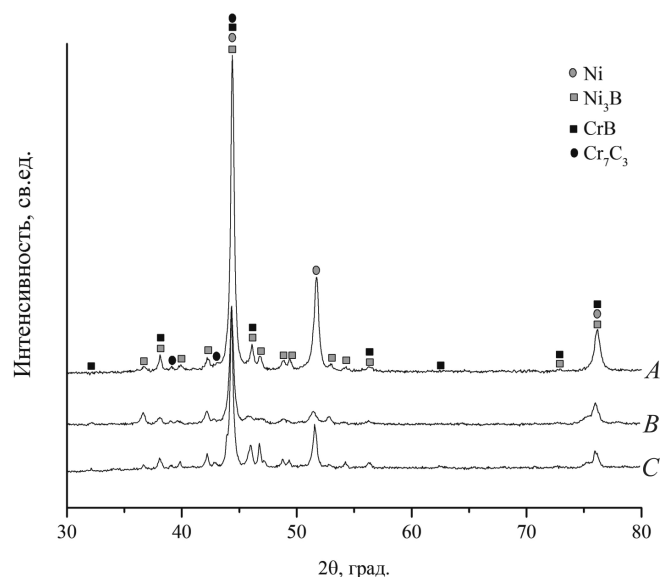
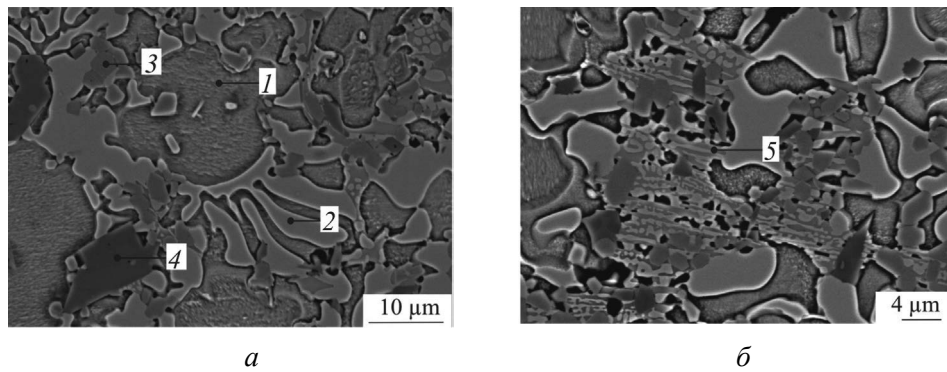
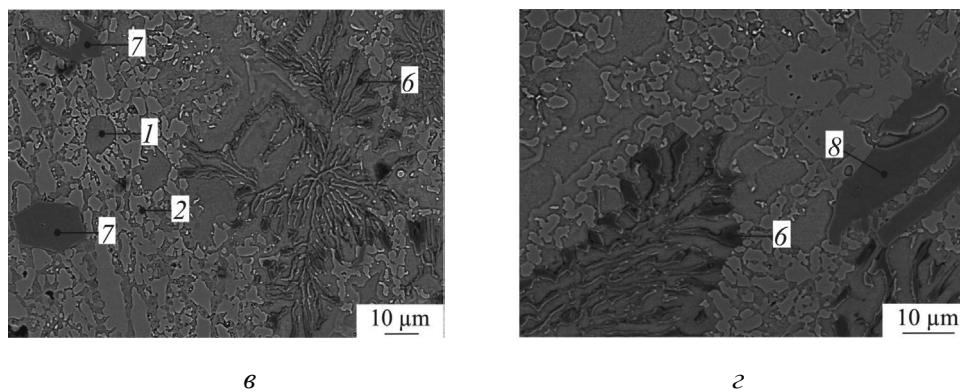


Рис. 4. Рентгенограммы покрытий до оплавления (А) и после оплавления при температурах 1070 °С (В) и 1100 °С (С)

Более детальные изображения структурных составляющих в покрытиях после оплавления, полученные при помощи растрового электронного микроскопа в обратноотраженных электронах, а также результаты микрорентгеноспектрального анализа представлены на рис. 5.



Результаты локального химического анализа, ат. %						
Участок	Ni	Cr	Si	Fe	B	C
1	74,38	9,44	9,97	6,21	–	–
2	63,69	3,68	1,63	1,88	29,12	–
3	12,39	55,29	0,64	2,25	–	29,43
4	2,21	41,48	–	–	56,31	–
5	57,66	4,78	16,1	1,88	19,58	–



Результаты локального химического анализа, ат. %						
Участок	Ni	Cr	Si	Fe	B	C
1	77,11	7,57	9,87	5,45	–	–
2	66,19	2,95	0,56	1,66	28,64	–
6	33,89	39,61	0,78	1,49	24,24	–
7	7,9	30,41	–	–	61,68	–
8	5,37	62,93	–	2,02	–	29,69

Рис. 5. Изображения микроструктуры и данные микрорентгеноспектрального анализа покрытий, оплавленных при температурах 1050 °С (а, б) и 1100 °С (в, з)

Согласно полученным данным оплавленные покрытия состоят из дендритов твердого раствора Cr, Si и Fe в γ -Ni (1, рис. 5, а, в). Междендритное пространство заполнено эвтектикой типа Ni-Ni₃B (2, рис. 5, а, в), в которой наблюдаются светло-серые гексагональные включения (3, рис. 5, а). Микрорентгеноспектральным анализом показано, что атомное соотношение Cr и C

в этих включениях примерно 7:3. Можно предположить, что это карбиды хрома с химической формулой Cr₇C₃, что подтверждается данными рентгенофазового анализа. В покрытиях, оплавленных при 1100 °С, выделяются также карбиды хрома (Cr₇C₃) неправильной формы (8, рис. 5, з). Согласно данным микрорентгеноспектрального анализа, темно-серые ромбические включения

(4, рис. 5, а), которые наблюдаются в структуре покрытий, оплавленных при температурах ниже 1070 °С, представляют собой бориды хрома. Рентгенофазовым анализом показано, что это бориды хрома с химической формулой CrB.

Как было отмечено выше, покрытия, оплавленные при 1100 °С, характеризуются наличием эвтектических областей, имеющих форму «цветка» (5, рис. 3, б). При помощи микрорентгено-спектрального анализа было выявлено, что эти области состоят преимущественно из никеля, хрома и бора (6, рис. 5, в, з). Анализ тройной диаграммы состояния Ni-Cr-B [30] позволяет предположить, что данные области представляют собой эвтектику (γ -Ni)-CrB, что согласуется с данными, полученными авторами работы [31]. Темно-серые прослойки эвтектики – это карбид бора (CrB), светлые – твердый раствор на основе γ -Ni. Стоит отметить, что в покрытиях, оплавленных при этой температуре, наблюдаются также гексагональные включения карбида бора CrB₂ (7, рис. 5, в). Недостаток бора в материале покрытия проявляется в

формировании дефектных кристаллов CrB₂, которые представляют собой пустотелые или недостроенные гексагональные каркасы.

Методом растровой электронной микроскопии было выявлено, что в междендритном пространстве покрытий, оплавленных при температурах ниже 1070 °С, выделяется пластинчатая эвтектика (5, рис. 5, б). Согласно данным локального химического анализа повышенное содержание кремния и бора в этой области может свидетельствовать о присутствии фаз с этими элементами. Анализ тройной диаграммы состояния Ni-Si-B, а также данных работы [29] позволяют предположить, что эта область может представлять собой двойную эвтектику Ni₃B-Ni₆Si₂B. Поскольку объемная доля фазы Ni₆Si₂B мала, ее рефлексы не были зафиксированы на рентгенограмме. Стоит отметить, что эвтектики такого типа в покрытиях, оплавленных при 1100 °С, не встречается.

Влияние температуры оплавления на микротвердость покрытий представлено в табл. 2.

Таблица 2

Средние значения микротвердости покрытий

Без нагрева	После оплавления при температурах (°С):			
	1030	1050	1070	1100
705±133 HV	650,5±125 HV	701,6±139 HV	752,5±151 HV	953,4±255 HV

Согласно полученным данным видно, что микротвердость покрытий возрастает с увеличением температуры оплавления, что можно связать со структурными изменениями. Как было уже сказано, повышение температуры оплавления приводит к увеличению объемной доли твердых фаз (эвтектики, а также карбидов и боридов хрома). Максимальные значения микротвердости соответствует покрытиям, структура которых характеризуется наличием эвтектики Ni – CrB.

Результаты триботехнических испытаний покрытий в условиях трения скольжения со смазкой представлены на рис. 6. Испытанию подвергали образцы с покрытиями до оплавления, а также после оплавления при температурах 1030 и 1100 °С.

Покрытия без оплавления со временем изнашиваются более интенсивно по сравнению с оплавленными покрытиями, что можно объяснить слабой когезией напыленных частиц.

Минимальный объем изношенного материала зафиксирован при испытаниях покрытий, оплавленных при температуре 1100 °С. Таким образом, можно отметить, что повышение микротвердости способствует снижению износа покрытий данного состава в реализованных условиях трения-скольжения.

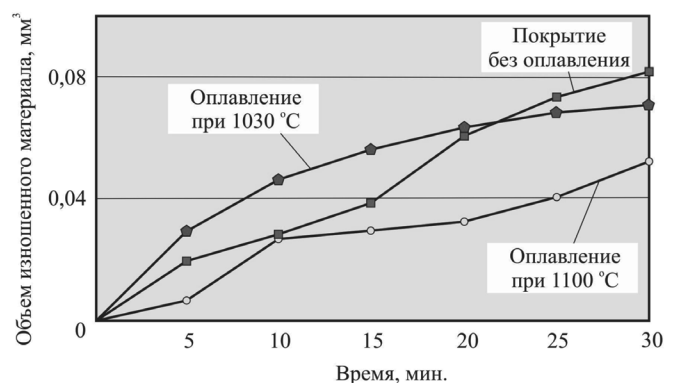


Рис. 6. Износ покрытий до оплавления и после оплавления при температуре 1030 и 1100 °С

Выводы

1. Рентгенофазовым анализом показано, что фазовый состав плазменных покрытий до и после оплавления одинаковый. Основными фазами являются γ -Ni, Ni₃B, CrB и Cr₇C₃.

2. Методами оптической и растровой электронной микроскопии выявлено, что покрытия системы Ni-Cr-Si-B после оплавления при температурах ниже 1070 °С состоят из дендритов на основе твердого раствора γ -Ni, включений Cr₇C₃ и CrB и двух эвтектик – Ni-Ni₃B и Ni₃B-Ni₆Si₂B. Структура покрытий, оплавленных при 1100 °С, представляет собой дендриты на основе твердого раствора γ -Ni, включения Cr₇C₃ и CrB₂ и две эвтектики (γ -Ni)-CrB и Ni-Ni₃B.

3. Установлено, что с повышением температуры оплавления объемная доля твердых фаз (эвтектики, а также карбидов и боридов хрома) увеличивается, что приводит к росту микротвердости покрытий. Максимальные значения микротвердости (953 HV) соответствуют покрытиям, структура которых характеризуется наличием эвтектики (γ -Ni)-CrB.

4. Минимальный износ характерен для покрытий, оплавленных при температуре 1100 °С, максимальный – для покрытий без оплавления.

5. С точки зрения получения покрытий с максимальной твердостью и износостойкостью необходимо повышать температуру их оплавления. В то же время высокие температуры нагрева могут способствовать отслоению покрытий. Таким образом, наиболее оптимальными температурами оплавления плазменных покрытий системы Ni-Cr-Si-B с подслоем из Ni₃Al являются температуры, не превышающие 1050 °С.

Список литературы

1. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов. – М.: МИСиС, 2005. – 432 с.

2. Zeng Z., Kuroda S., Era H. Comparison of oxidation behavior of Ni-20Cr alloy and Ni-base self-fluxing alloy during air plasma spraying // *Surface & Coatings Technology*. – 2009. – Vol. 204. – P. 69–77.

3. Miguel J.M., Guilemany J.M., Vizcaino S. Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes // *Tribology International*. – 2003. – Vol. 36. – P. 181–187.

4. Газотермическое напыление: учебное пособие / Л.Х. Балдаев, В.Н. Борисов, В.А. Вахалин,

Г.И. Ганноченко, А.Е. Затока, Б.М. Захаров, А.В. Иванов, В.М. Иванов, В.И. Калита, В.В. Кудинов, А.Ф. Пузряков, Ю.П. Сборщиков, Б.Г. Хамицев, Э.Я. Школьников, В.М. Ярославцев; под общ. ред. Л.Х. Балдаева. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с. ISBN 978-5-7958-0146-9.

5. Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni-Cr-Si-B alloy on AISI 304L stainless steel / C. Sudha, P. Shankar, R.V. Subba Rao, R. Thirumurugesan, M. Vijayalakshmi, B. Raj // *Surface & Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202. – P. 2103–2112. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.08.063.

6. Microstructures of metallic NiCrBSi coatings manufactured via hybrid plasma spray and in situ laser remelting process / N. Serres, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade, F. Machi // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2011. – Vol. 20 (1–2). – P. 336–343. – doi: 10.1007/s11666-010-9565-1.

7. A study on microstructure and flame erosion mechanism of a graded Ni-Cr-B-Si coating prepared by laser cladding / H.-F. Xuan, Q.-Y. Wang, S.-L. Bai, Z.-D. Liu, H.-G. Sun, P.-C. Yan // *Surface & Coatings Technology*. 2014. – Vol. 244. – P. 203–209. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.02.021.

8. Microstructures and environmental assessment of metallic NiCrBSi coatings manufactured via hybrid plasma spray process / N. Serres, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade, F. Machi // *Surface & Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205. – P. 1039–1046. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.03.048.

9. Zhang Z., Wang Z., Liang B. Wear characterization of thermal spray welded // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209. – P. 1368–1374. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.073.

10. Effect of Ni-to-Fe ratio on structure and properties of Ni-Fe-B-Si-Nb coatings fabricated by laser processing / R. Li, Z. Li, J. Huang, P. Zhang, Y. Zhu // *Applied Surface Science*. – 2011. – Vol. 257, iss. 8. – P. 3554–3557. – doi: 10.1016/j.apsusc.2010.11.073.

11. Hemmati I., Ocelik V., Hosson J.Th.M. de. Effects of the alloy composition on phase constitution and properties of laser deposited Ni-Cr-B-Si coatings // *Physics Procedia*. – 2013. – Vol. 41. – P. 302–311. – doi: 10.1016/j.phpro.2013.03.082.

12. Hemmati I., Ocelik V., Hosson J.Th.M. de. Advances in laser surface engineering: tackling the cracking problem in laser-deposited Ni-Cr-B-Si-C alloys // *JOM*. – 2013. – Vol. 65, iss. 6. – P. 741–748. – doi: 10.1007/s11837-013-0594-3.

13. Microstructural study of NiCrBSi coatings obtained by different processes / R. Gonzalez, M.A. Garcia, I. Penuelas, M. Cadenas, M. del R. Fernandez, A.H. Battez, D. Felgueroso // *Wear*. – 2007. – Vol. 263, iss. 1–6. – P. 619–624. – doi: 10.1016/j.wear.2007.01.094.

14. An investigation of the mechanical properties and wear resistance of NiCrBSi coatings carried out by in situ laser remelting / N. Serres, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade, F. Machi // *Wear*. – 2011. – Vol. 270, iss. 9–10. – P. 640–649. – doi: 10.1016/j.wear.2011.01.025.

15. *Saricimen H., Quddus A., Ul-Hamid A.* Hot corrosion behavior of plasma and HVOF sprayed Co- and Ni-based coatings at 900°C // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2014. – Vol. 50, iss. 3. – P. 391–399. – doi: 10.1134/S2070205114030162.

16. *Liyanaige T., Fisher G., Gerlich A.P.* Influence of alloy chemistry on microstructure and properties in NiCrBSi overlay coatings deposited by plasma transferred arc welding (PTAW) // *Surface & Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205, iss. 3. – P. 759–765. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.07.095.

17. *Gross K.A., Kovalevskis A.* Mold manufacture with plasma spraying // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 1996. – Vol. 5, iss. 4. – P. 469–475.

18. Microstructure and wear properties of nickel-based surfacing deposited by plasma transferred arc welding / C. Guoqing, F. Xuesong, W. Yanhui, L. Shan, Z. Wenlong // *Surface & Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 228. – P. 276–282. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.05.125.

19. *Kesavan D., Kamaraj M.* The microstructure and high temperature wear performance of a nickel base hardfaced coating // *Surface & Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 204. – P. 4034–4043. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.05.022.

20. Corrosion mechanism of NiCrBSi coatings deposited by HVOF / W. Zhao, Y. Wang, L. Dong, K. Wu, J. Xue // *Surface & Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 190. – P. 293–298. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.04.057.

21. Comparative examination of the microstructure and high temperature oxidation performance of NiCrBSi flame sprayed and pack cementation coatings / D. Chaliampalias, G. Vourlias, E. Pavlidou, S. Skolianos, K. Chrissafis, G. Stergioudis // *Applied Surface Science*. – 2009. – Vol. 255, iss. 6. – P. 3605–3612. – doi: 10.1016/j.apsusc.2008.10.006.

22. *Чесов Ю.С., Зверев Е.А., Плохов А.В.* Структура плазменных покрытий из порошкового материала

марки ПГ-С27 // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2010. – № 1. – С. 14–18.

23. *Kornienko E., Smirnov A., Kuz'min V.* Researches structure and properties of self-fluxing coating, obtained by air-plasma // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 698. – P. 405–410. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.405.

24. *Sidhu T.S., Prakash S., Agrawal R.D.* Hot corrosion and performance of nickel-based coatings // *Current Science*. – 2006. – Vol. 90, iss. 1. – P. 41–47.

25. Microstructures and mechanical properties of metallic NiCrBSi and composite NiCrBSi-WC layers manufactured via hybrid plasma/laser process / N. Serresa, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade, F. Machi // *Applied Surface Science*. – 2011. – Vol. 257, iss. 12. – P. 5132–5137. – doi: 10.1016/j.apsusc.2010.11.062.

26. Rolling contact fatigue mechanism of a plasma-sprayed and laser-remelted Ni alloy coating / X.C. Zhang, B.S. Xu, S.T. Tu, F.Z. Xuan, Y.K. Zhang, H.D. Wang, Y.X. Wu // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2009. – Vol. 32. – P. 84–96. – doi: 10.1111/j.1460-2695.2008.01305.x.

27. Handbook of thermal spray technology / ed. by J.R. Davis. – Materials Park, OH: ASM International, 2004. – 338 p. – ISBN-10: 0871707950. – ISBN-13: 978-0871707956.

28. Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser / R. Gonzalez, M. Cadenas, R. Fernandez, J.L. Cortizo, E. Rodriguez // *Wear*. – 2007. – Vol. 262. – P. 301–307.

29. *Tokunaga T., Nishio K., Hasebe M.* Thermodynamic study of phase equilibria in the Ni-Si-B system // *Journal of Phase Equilibria*. – 2001. – Vol. 22, N 3. – P. 291–299.

30. Liquidus surface of B-Cr-Ni system / Sh. Omori, K. Koyama, Y. Hashimoto, K. Yamada // *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials*. – 1985. – Vol. 49, N 11. – P. 935–939.

31. *Hemmati I., Ocelik V., Hosson J.Th.M. de.* Electron microscopy characterization of Ni-Cr-B-Si-C laser deposited coatings // *Microscopy and Microanalysis*. – 2013. – Vol. 19. – P. 120–131. – doi: 10.1017/S1431927612013839.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4 (73), October – December 2016, Pages 52-62

The influence of flowing temperature on the structure and properties of the self-fluxing coatings

Kornienko E.E.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kornienko_ee@mail.ru
Nikulina A.A.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: _aelita27@mail.ru
Bannov A.G.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: bannov_a@mail.ru
Kuz'min V.I.², Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: vikuzmin57@mail.ru
Mildebrath M.³, Engineer, e-mail: mildebrath@iw.uni-hannover.de
Bezrukova V.A.¹, student, e-mail: vikabezrukova1995@mail.ru
Zhoidik A.A.¹, student, e-mail: sashazhoidik@gmail.com

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

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

³ Leibniz University of Hannover, 2 University str., Garbsen, 30823, Germany

Abstract

The coatings made of self-fluxing powder of the Ni-Cr-Si-B system (Ni – base; 15.1 wt. % Cr; 2.0 wt. % Si; 2.0 wt. % B; 0.4 wt. % C) are deposited on low carbon steel substrate (0.2 wt. % C) by plasma spraying. The study considers the influence of flowing temperature on structure and properties of the specified materials. The samples with coatings are heated in furnace up to 1030, 1050, 1070 and 1100 °C for 1 hour with the following air cooling. The structure and phase composition of the coatings is investigated using optical and scanning electron microscopy, and X-ray diffractometry. Moreover, the results of microhardness measuring and wear-resistance testing in conditions of sliding friction are demonstrated. X-ray diffractometry showed that the major phases of the coatings before fluxing and after one are the following: γ -Ni, Ni₃B, CrB и Cr₇C₃. The results obtained using optical and scanning electron microscopy brought out that the coatings fluxed at 1030, 1050 and 1070 °C consist of dendrites of solid solution of Cr, Si and Fe in γ -Ni, Cr₇C₃, CrB inclusions and Ni-Ni₃B, Ni₃B-Ni₆Si₂B eutectics. The coatings fluxed at 1100 °C consist of dendrites of solid solution of Cr, Si and Fe in γ -Ni, Cr₇C₃, CrB₂ inclusions and (γ -Ni)-CrB, Ni-Ni₃B eutectics. A quantity of hard phases (eutectic, chromium carbides and chromium borides) increases with the rise of temperature. It leads to increase of microhardness and wear-resistance of the coatings. The results of the experiments demonstrate that the coatings fluxed at 1100 °C have maximum microhardness (953 HV) and wear resistance. Unfortunately, high fluxing temperatures can promote to layer separation.

Keywords

self-fluxing alloys on the Ni base, Ni-Cr-Si-B system alloys, plasma spraying, fluxing.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-52-62

References

1. Kolachev B.A., Elagin V.I., Livanov V.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i splyavov* [Metallurgy and heat treatment of nonferrous metals and alloys]. Moscow, MISIS Publ., 2005. 432 p. ISBN 5-87623-128-2.
2. Zeng Z., Kuroda S., Era H. Comparison of oxidation behavior of Ni-20Cr alloy and Ni-base self-fluxing alloy during air plasma spraying. *Surface & Coatings Technology*, 2009, vol. 204, iss. 1, pp. 69–77. doi: 10.1016/j.surfcoat.2009.06.036
3. Miguel J.M., Guilemany J.M., Vizcaino S. Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes. *Tribology International*, 2003, vol. 36, pp. 181–187.
4. Baldaev L.Kh., Borisov V.N., Vakhalin V.A., Gannochenko G.I., Zatoka A.E., Zakharov B.M., Ivanov A.V., Ivanov V.M., Kalita V.I., Kudinov V.V., Puzryakov A.F., Sborshchikov Yu.P., Khamitsev B.G., Shkol'nikov E.Ya., Yaroslavtsev V.M. *Gazotermicheskoe napylenie* [Thermal spray]. Moscow, Market DS Publ., 2007. 344 p. ISBN 978-5-7958-0146-9.

5. Sudha C., Shankar P., Rao R.V. Subba, Thirumurugesan R., Vijayalakshmi M., Raj B. Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni–Cr–Si–B alloy on AISI 304L stainless steel. *Surface & Coatings Technology*, 2008, vol. 202, pp. 2103–2112. doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.08.063
6. Serres N., Hlawka F., Costil S., Langlade C., Machi F. Microstructures of metallic NiCrBSi coatings manufactured via hybrid plasma spray and in situ laser remelting process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20 (1–2), pp. 336–343. doi: 10.1007/s11666-010-9565-1
7. Xuan H.-F., Wang Q.-Y., Bai S.-L., Liu Z.-D., Sun H.-G., Yan P.-C. A study on microstructure and flame erosion mechanism of a graded Ni-Cr-B-Si coating prepared by laser cladding. *Surface & Coatings Technology*, 2014, vol. 244, pp. 203–209. doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.02.021
8. Serres N., Hlawka F., Costil S., Langlade C., Machi F. Microstructures and environmental assessment of metallic NiCrBSi coatings manufactured via hybrid plasma spray process. *Surface & Coatings Technology*, 2010, vol. 205, pp. 1039–1046. doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.03.048
9. Zhang Z., Wang Z., Liang B. Wear characterization of thermal spray welded. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, iss. 3, pp. 1368–1374. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.073
10. Li R., Li Z., Huang J., Zhang P., Zhu Y. Effect of Ni-to-Fe ratio on structure and properties of Ni-Fe-B-Si-Nb coatings fabricated by laser processing. *Applied Surface Science*, 2011, vol. 257, iss. 8, pp. 3554–3557. doi: 10.1016/j.apsusc.2010.11.073
11. Hemmati I., Ocelik V., Hosson J.Th.M. de. Effects of the alloy composition on phase constitution and properties of laser deposited Ni-Cr-B-Si coatings. *Physics Procedia*, 2013, vol. 41, pp. 302–311. doi: 10.1016/j.phpro.2013.03.082
12. Hemmati I., Ocelik V., Hosson J.Th.M. de. Advances in laser surface engineering: tackling the cracking problem in laser-deposited Ni-Cr-B-Si-C alloys. *JOM*, 2013, vol. 65, iss. 6, pp. 741–748. doi: 10.1007/s11837-013-0594-3
13. Gonzalez R., Garcia M.A., Penuelas I., Cadenas M., Fernandez M. del R., Battez A.H., Felgueroso D. Microstructural study of NiCrBSi coatings obtained by different processes. *Wear*, 2007, vol. 263, iss. 1–6, pp. 619–624. doi: 10.1016/j.wear.2007.01.094
14. Serres N., Hlawka F., Costil S., Langlade C., Machi F. An investigation of the mechanical properties and wear resistance of NiCrBSi coatings carried out by in situ laser remelting. *Wear*, 2011, vol. 270, iss. 9–10, pp. 640–649. doi: 10.1016/j.wear.2011.01.025
15. Saricimen H., Quddus A., Ul-Hamid A. Hot corrosion behavior of plasma and HVOF sprayed Co- and Ni-based coatings at 900 °C. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2014, vol. 50, iss. 3, pp. 391–399. doi: 10.1134/S2070205114030162
16. Liyanage T., Fisher G., Gerlich A.P. Influence of alloy chemistry on microstructure and properties in NiCrBSi overlay coatings deposited by plasma transferred arc welding (PTAW). *Surface & Coatings Technology*, 2010, vol. 205, iss. 3, pp. 759–765. doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.07.095
17. Gross K.A., Kovalevskis A. Mold manufacture with plasma spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1996, vol. 5, iss. 4, pp. 469–475.
18. Guoqing C., Xuesong F., Yanhui W., Shan L., Wenlong Z. Microstructure and wear properties of nickel-based surfacing deposited by plasma transferred arc welding. *Surface & Coatings Technology*, 2013, vol. 228, pp. 276–282. doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.05.125
19. Kesavan D., Kamaraj M. The microstructure and high temperature wear performance of a nickel base hardfaced coating. *Surface & Coatings Technology*, 2010, vol. 204, pp. 4034–4043. doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.05.022
20. Zhao W., Wang Y., Dong L., Wu K., Xue J. Corrosion mechanism of NiCrBSi coatings deposited by HVOF. *Surface & Coatings Technology*, 2005, vol. 190, pp. 293–298. doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.04.057
21. Chaliampalias D., Vourlias G., Pavlidou E., Skolianos S., Chrissafis K., Stergioudis G. Comparative examination of the microstructure and high temperature oxidation performance of NiCrBSi flame sprayed and pack cementation coatings. *Applied Surface Science*, 2009, vol. 255, iss. 6, pp. 3605–3612. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.10.006
22. Chosov Yu.S., Zverev E.A., Plokhov A.V. Struktura plazmennyykh pokrytii iz poroshkovogo materiala marki PG-S27 [Structure of plasma wear-resistant coatings of powdered ПГ-C27]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2010, no. 1, pp. 14–18.
23. Kornienko E., Smirnov A., Kuz'min V. Researches structure and properties of self-fluxing coating, obtained by air-plasma. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 698, pp. 405–410. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.405
24. Sidhu T.S., Prakash S., Agrawal R.D. Hot corrosion and performance of nickel-based coatings. *Current Science*, 2006, vol. 90, iss. 1, pp. 41–47.

25. Serresa N., Hlawka F., Costil S., Langlade C., Machi F. Microstructures and mechanical properties of metallic NiCrBSi and composite NiCrBSi-WC layers manufactured via hybrid plasma/laser process. *Applied Surface Science*, 2011, vol. 257, iss. 12, pp. 5132–5137. doi: 10.1016/j.apsusc.2010.11.062
26. Zhang X.C., Xu B.S., Tu S.T., Xuan F.Z., Zhang Y.K., Wang H.D., Wu Y.X. Rolling contact fatigue mechanism of a plasma-sprayed and laser-remelted Ni alloy coating. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2009, vol. 32, pp. 84–96. doi: 10.1111/j.1460-2695.2008.01305.x
27. Davis J.R., ed. *Handbook of thermal spray technology*. Materials Park, OH, ASM International, 2004. 338 p. ISBN-10: 0871707950. ISBN-13: 978-0871707956.
28. Gonzalez R., Cadenas M., Fernandez R., Cortizo J.L., Rodriguez E. Wear behaviour of flame sprayed NiCrB-Si coating remelted by flame or by laser. *Wear*, 2007, vol. 262, pp. 301–307.
29. Tokunaga T., Nishio K., Hasebe M. Thermodynamic study of phase equilibria in the Ni-Si-B system. *Journal of Phase Equilibria*, 2001, vol. 22, no. 3, pp. 291–299.
30. Omori Sh., Koyama K., Hashimoto Y., Yamada K. Liquidus surface of B-Cr-Ni system. *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials*, 1985, vol. 49, no. 11, pp. 935–939.
31. Hemmati I., Ocelik V., Hosson J.Th.M. de. Electron microscopy characterization of Ni-Cr-B-Si-C laser deposited coatings. *Microscopy and Microanalysis*, 2013, vol. 19, pp. 120–131. doi: 10.1017/S1431927612013839

Funding

The research was funded by RFBR, according to the research project No. 16-38-50197 mol_nr.

Article history

Received 5 October 2016

Revised 21 October 2016

Accepted 15 November 2016

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СЛОЕВ TiB-TiC-Ti, ПОЛУЧЕННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА VT1-0 МЕТОДОМ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ*

О.Г. ЛЕНИВЦЕВА¹, канд. техн. наук, с.н.с., доцент

Е.А. ДРОБЯЗ¹, канд. техн. наук, доцент

А.С. ГОНТАРЕНКО^{1,2}, мл. научный сотрудник, ассистент

Т.А. ЗИМОГЛЯДОВА¹, аспирант

Л.В. ЧУЧКОВА¹, магистрант

(¹НГТУ, г. Новосибирск

²Ганноверский университет им. Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен)

Поступила 12 октября 2016

Рецензирование 21 октября 2016

Принята к печати 15 ноября 2016

Ленивцева О.Г. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: lenivtseva_olga@mail.ru

Исследовано влияние режимов вневакуумной электронно-лучевой обработки на структуру и свойства износостойких слоев борид титана-карбид титана-титан, полученных на заготовках из титанового сплава VT1-0. В качестве наплавочного материала использовали смесь титана с карбидом бора и сварочными флюсами. Структурные исследования проводили с использованием оптической и растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного и рентгенофазового анализов. В результате проведенных экспериментов были получены слои толщиной до 3,4 мм, состоящие из фаз α (α')-Ti, карбида и моноборида титана. Структурные исследования показали, что высокая объемная доля упрочняющих фаз TiC и TiB способствует формированию трещин в наплавленных слоях. Изменение технологических режимов электронно-лучевой обработки оказывает влияние на твердость наплавленных слоев. При токе пучка 22 мА средний уровень микротвердости слоя, полученного при наплавке 20 % вес. карбида бора составляет 582 HV, что в ~3,5 раза выше твердости основного металла. Повышение тока пучка до 23 мА способствует снижению уровня микротвердости до 543 HV. Средний уровень микротвердости образцов, полученных при наплавке 12 % вес. карбида бора, составляет 436 HV.

Для оценки износостойкости полученные материалы испытывались на трение в условиях нежестко закрепленных абразивных частиц. Лучшие показатели достигнуты при испытании слоев, сформированных в процессе наплавки 20 % вес. карбида бора. Интенсивность изнашивания образцов с покрытием в восемь раз меньше по сравнению с титаном VT1-0.

Ключевые слова: электронно-лучевая наплавка, титан, карбиды титана, бориды титана, микротвердость, износостойкость.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-63-74

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-33-60066 мол_а_дк

Введение

Титан и сплавы на его основе широко используются в авиастроении, судостроении, химической промышленности и медицине. Распространенность титановых сплавов в промышленности обусловлена комплексом их уникальных свойств, таких как высокая удельная прочность, пластичность, отличная коррозионная стойкость и биосовместимость [1]. Однако при контакте с другими конструкционными материалами титановые сплавы подвержены сильному адгезионному изнашиванию [2–4]. Процесс трения титановых сплавов характеризуется высоким и нестабильным коэффициентом трения и сопровождается схватыванием и переносом частиц титана на поверхность контртела. Этот перенос материала в первую очередь приводит к истиранию поверхности титана и сопровождается сильным абразивным изнашиванием. Таким образом, в большинстве случаев при трении наблюдаются одновременно два механизма изнашивания титановых сплавов: абразивный и адгезионный [2, 5].

Известно, что повышение прочности и твердости приводит к повышению износостойкости, но это не всегда характерно для титановых сплавов. Авторы работы [2] отмечают, что термическая обработка (ТО) титановых сплавов Ti-Nb-Ta-Zr (β -Ti) и Ti-6Al-4V (α + β -Ti) не приводит к повышению износостойкости. Кроме того, вызывает интерес тот факт, что потеря массы высокопрочного титанового сплава Ti-6Al-4V в условиях воздействия нежестко закрепленных абразивных частиц выше, чем технически чистого титана [6]. Скорость абразивного изнашивания титановых сплавов примерно в семь раз выше скорости изнашивания углеродистой стали 1080. Таким образом, ТО не позволяет повысить триботехнические свойства титана и его сплавов, что ограничивает возможность их применения для изготовления деталей, эксплуатирующихся в условиях абразивного изнашивания.

Одним из перспективных методов, позволяющих повысить износостойкость титановых сплавов, является поверхностное упрочнение [7–16]. Данный подход позволяет увеличить уровень твердости, износостойкости, улучшить высокотемпературные свойства титана и снизить коэффициент трения. При этом свойства основного металла не изменяются. В настоящее время

можно выделить две основные технологии поверхностного упрочнения, используемые для повышения износостойкости титановых сплавов: лазерная и электронно-лучевая обработка. Данные методы позволяют получать материал типа упрочняющие частицы–титановая матрица с высоким комплексом свойств. В качестве упрочняющих частиц обычно используются карбиды, бориды или силициды [9, 17–22]. Первые работы по лазерной наплавке на титановые сплавы появились в 80-х годах прошлого века, и интерес к данной технологии не исчез в настоящее время [23, 24]. Работ по использованию электронного луча в качестве источника энергии для обработки титановых сплавов значительно меньше. Традиционные электронно-лучевые установки оснащены вакуумной камерой, которая позволяет не только защитить обрабатываемый материал от окисления, но и выполняет функцию радиационной защиты. Часто для получения качественного слоя необходимо делать несколько проходов электронным лучом, осуществляющим предварительный прогрев заготовок.

В конце 1990-х годов в научной литературе стали появляться работы по повышению износостойкости титана и сплавов на его основе методами электронно-лучевой наплавки в воздушной среде [15, 16, 25].

Использование в качестве наплавляемого материала карбида бора было показано в работах [26, 27]. Авторами этих работ были получены покрытия толщиной 1,6 мм, содержащие частицы карбида и бориды титана, а также отмечено, что получение композитов TiC-TiB-Ti позволяет повысить высокотемпературную твердость материалов.

В настоящей работе рассматриваются возможности получения на титановых сплавах износостойких слоев толщиной до 3,4 мм методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошков карбида бора и титана. Особое внимание уделяется исследованию влияния режимов обработки на структуру и триботехнические свойства наплавленных слоев.

Материалы и методы исследования

В работе в качестве упрочняемого материала использовался титановый сплав ВТ1-0. Заготовки размером 50 × 100 мм вырезались из листа титана толщиной 12 мм методом гидроабразивной

резки на установке OMAX 5555 JetMachining Center.

В качестве наплавочной смеси использовались порошки титана (производства ООО Химмет, г. Гатчина) и карбида бора марки М20 (ООО ИПК ЮМЭКС, г. Уфа). Концентрации карбида бора в порошковой насыпке в образцах, полученных по режимам 1, 2, 3, составляла 20 % вес., для образца 4 – 12 % вес. (см. таблицу). Для защиты расплава от воздействия воздушной атмосферы использовались сварочные флюсы (30 % вес. CaF_2 и 10 % вес. LiF). Перед нанесением порошковой смеси на поверхность титановой заготовки порошки просушивались в печи для удаления влаги при температуре 150...200 °С и равномерно перемешивались между собой. Плотность порошковой насыпки составляла 0,33 г/см³. Электронно-лучевая обработка материалов осуществлялась в Институте ядерной физики

им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск). Схема промышленного ускорителя электронов приведена в работах [28, 29].

Параметры обработки (см. таблицу) выбирались таким образом, чтобы наплавляемые материалы успели раствориться и равномерно распределиться в ванне расплава.

Для анализа структуры наплавленных слоев были подготовлены поперечные шлифы. Характер распределения и размеры частиц упрочняющих фаз исследовались на нетравленных шлифах с использованием оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m и программы ImageJ. Микроструктура титановой матрицы выявлялась химическим травлением раствором Кролла (H_2O – 18,4 мл, HNO_3 – 1,2 мл и HF – 0,4 мл). Особенности микроструктуры изучались на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP.

Состав наплавляемой смеси и режимы наплавки

Номер режима	1	2	3	4
Состав наплавляемой смеси, % вес.	40Ti + 20B ₄ C + 30CaF ₂ + 10LiF			48Ti + 12B ₄ C + 30CaF ₂ + 10LiF
Скорость перемещения образцов, мм/с	10			
Частота сканирования, Гц	50			
Расстояние от выпускного окна до заготовки, мм	90			
Энергия электронов, МэВ	1,4			
Ток пучка, мА	22	23	24	23

Распределение микротвердости по глубине наплавленного слоя оценивалось с использованием микротвердомера Wolpert Group 402MVD. Каждая точка на представленных в работе графиках получена на основании пяти измерений. Нагрузка на алмазный индентор составляла 0,98 Н. Фазовый состав слоев оценивался с использованием дифрактометра ARL X'TRA. Дифракционные картины были получены в $\text{Cu K}\alpha$ -излучении в пошаговом режиме с шагом 0,05 град. и временем накопления 5 с на точку.

Триботехнические испытания материалов, полученных при электронно-лучевой наплавке, проводились в соответствии с ГОСТ 23.208–79 в условиях воздействия нежестко закрепленных абразивных частиц. Для испытаний была использована схема, приведенная в работе [30], и

были подготовлены плоские образцы размером 50 × 25 × 10 мм. Нагрузка на образцы составляла 44 Н, общее время испытаний 100 с, скорость вращения резинового ролика 60 об/мин. Степень износа оценивалась по потере веса образца. Общая длина пути трения составила 942,5 м. После изнашивания поверхность образцов исследовалась на растровом электронном микроскопе.

Результаты и обсуждение

Структурные исследования, проведенные на оптическом микроскопе, показали, что в процессе наплавки смеси порошков титана с карбидом бора при токе пучка 22 мА на поверхности титановых заготовок формируются слои толщиной 3 мкм с градиентным строением (рис. 1, а). Повыше-

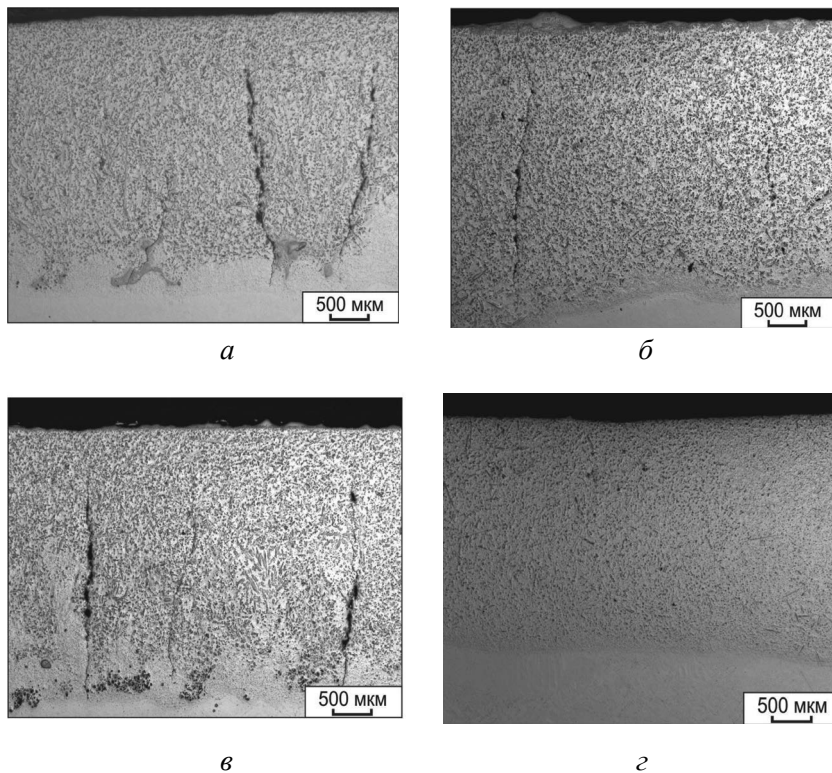


Рис. 1. Структура поверхностных слоев титана, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки смеси порошков титана и 20 % вес. карбида бора (а–в) и смеси порошков титана и 12 % вес. карбида бора (г):

а – ток пучка 22 мА; б, г – ток пучка 23 мА; в – ток пучка 24 мА

ние тока пучка электронов в процессе наплавки на 1 мА способствует увеличению толщины слоев на 0,2 мм. Толщина слоя, полученного при наплавке 48 % титана и 12 % карбида бора, составляет 2,6 мм. В слоях, полученных при наплавке 20 % вес. карбида бора, были обнаружены трещины (рис. 1, а–в). Одной из причин распространения трещин является возникновение в процессе ускоренной кристаллизации растягивающих напряжений. Вторая причина данного явления – хрупкие выделения боридов титана, объемная доля которых составляет ~25 %. Суммарная объемная доля карбидов и боридов титана в наплавленных слоях, полученных при наплавке 20 % вес. B_4C , составляет 37...40 %.

Повышение тока пучка до 24 мА приводит к формированию неоднородной структуры наплавленного слоя (рис. 1, в). В структуре данного образца присутствуют участки с высоким содержанием упрочняющих фаз (до 55 % об.). Для данных зон характерно скопление мелкодисперсных частиц и появление трещин.

Рядом с этими участками присутствуют области доэвтектического состава, где не происходило выделения первичных кристаллов боридов и карбидов титана (объемная доля упрочняющих фаз ~20 %).

В процессе взаимодействия электронов с образцом выделяется большое количество тепла, которое приводит к плавлению наплавочной смеси и материала основы. При этом частицы карбида бора растворяются в ванне расплава. В соответствии с диаграммой состояния системы Ti-C-B в богатых титаном сплавах этой системы возможно появление фаз TiB и TiC. Эти фазы могут появляться как в виде крупных первичных кристаллов, так и в виде мелкодисперсной эвтектики (рис. 1 и 2).

Из рис. 1, в видно, что в связи с кратковременностью процесса наплавки полного растворения частиц B_4C может не произойти. В возникающей ванне расплава частицы карбида бора являются центрами кристаллизации, это наглядно видно на

рис. 2, а. Учитывая высокие скорости нагрева и охлаждения, не все частицы карбида бора успевают прореагировать с жидким титаном. В нижней зоне покрытий, полученных при наплавке 20 % вес. карбида бора, обнаружены скопления нерастворившихся частиц карбида бора (рис. 1, в; 2, в). Данные EDX анализа показали, что в составе частиц зафиксированы только бор и углерод (рис. 2, в). Снижение концентрации карбида бора в исходной порошковой насыпке на 8 % вес.

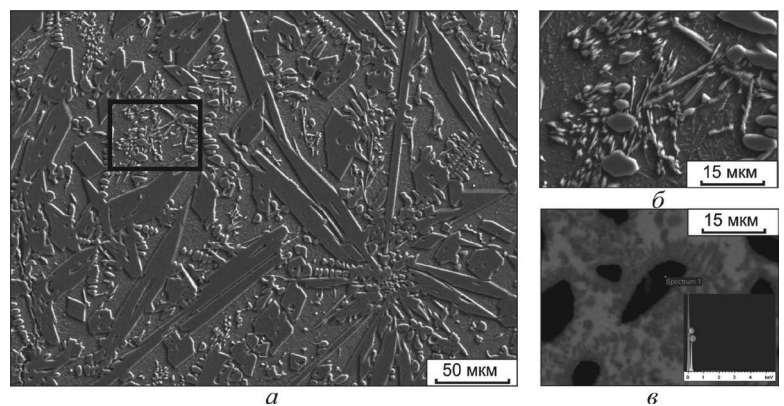
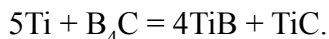
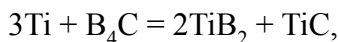


Рис. 2. Растровая электронная микроскопия наплавленных слоев (а, б) и EDX-анализ частиц карбида бора (в)

позволяет исключить образование трещин в наплавленных слоях и способствует полному растворению порошка карбида бора (рис. 1, в).

При взаимодействии титана с карбидом бора возможно протекание следующих реакций:



Следует отметить, что в условиях присутствия большого количества титана фаза TiB является более стабильной, чем TiB₂. На это также указывают данные работ [31–33].

На рис. 3 показана типичная рентгенограмма полученных образцов. Основными фазами, присутствующими в наплавленных слоях, является α-титан (α'-Ti), карбид титана и моноборид титана. Полученные данные хорошо согласуются с результатами работ по электронно-лучевой [26, 27] и лазерной наплавке карбида бора [32–34].

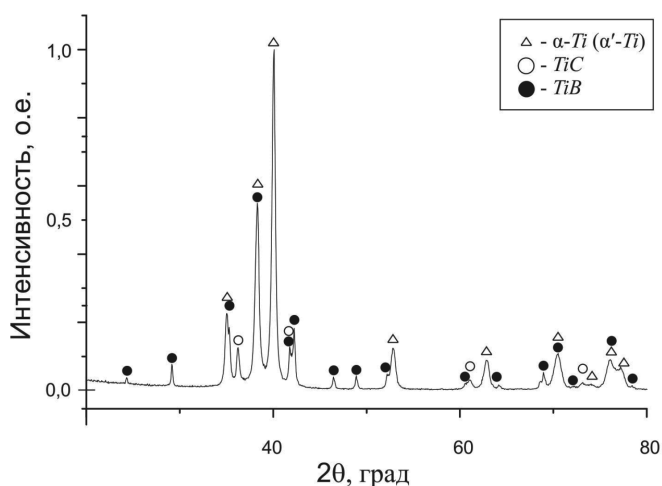


Рис. 3. Типичная дифракционная картина, снятая с наплавленного слоя TiC–TiB–Ti

Анализ диаграммы состояния Ti–B–C [35] показал, что в процессе первичной кристаллизации вначале происходит выделение кристаллов борида титана. Поперечное сечение кристаллов моноборида титана, как правило, имеет форму, близкую к гексагональной (рис. 4, а–д). Следует отметить, что характерным для TiB является ускоренный рост в осевом направлении 010 и медленный рост в поперечном направлении [36–38]. Длина кристаллов борида титана составляет 120...400 мкм, а диаметр 5...30 мкм. В наплавленном слое, полученном при минимальных значениях тока пучка (21 мА), длина TiB достигает 600 мкм. В образце, полученном

при наплавке 48 % Ti–12 % B₄C, толщина первичных выделений борида титана не превышала 15 мкм. Следует отметить, что все кристаллы моноборида титана имели полую сердцевину (рис. 4, а–д). При анализе тонкой структуры композитов системы Ti–B–C авторы работы [39] показали, что борид титана внутри заполнен титаном. Учитывая незначительную разницу в коэффициентах линейного расширения между боридом титана и титаном, при охлаждении не формируется каких-либо дефектов. При приближении к зоне термического влияния морфология первичных кристаллов борида титана все больше отличается от правильной (рис. 4, д). Это обусловлено нехваткой атомов бора для построения идеальных кристаллов. В нижней области наплавленных слоев наблюдается доэвтектическая область с объемной долей упрочняющих частиц ~16 % (рис. 4, е). В данной области наблюдаются только дисперсные эвтектические выделения борида титана в виде тонких полых игл длиной до 20 мкм. Данные частицы, собранные в конгломераты, также можно наблюдать в других зонах образца (рис. 1, а, б).

Для кристаллов карбида титана характерна сферическая и дендритная морфология (рис. 4). При кристаллизации зарождение и рост карбидов титана происходит на плоскостях боридов титана таким образом, чтобы уменьшить поверхностную энергию зародыша. Как правило, такими плоскостями являются (101) и (10-1) [38].

Большой интерес представляет структура титановой матрицы. В поверхностном слое толщиной до 1 мм титановая матрица имеет грубое пластинчатое строение (рис. 4, а). На глубине 1 мм наблюдаются типичная для наплавленных слоев структура закаленного сплава титана (рис. 4, в, з), представляющая собой пластины из α'-фазы титана. Очевидно, что различная скорость охлаждения, а также различия в концентрациях бора и углерода в объемах материала, находящихся на разном расстоянии от поверхности, оказывают влияние на структуру матрицы после охлаждения. Измельчение пластин альфа-титана, возможно, связано с большой концентрацией бора, а также повышенной скоростью охлаждения в данных областях. Авторы работы [40] указывают, что добавки бора в титановые сплавы способствуют измельчению зерна.

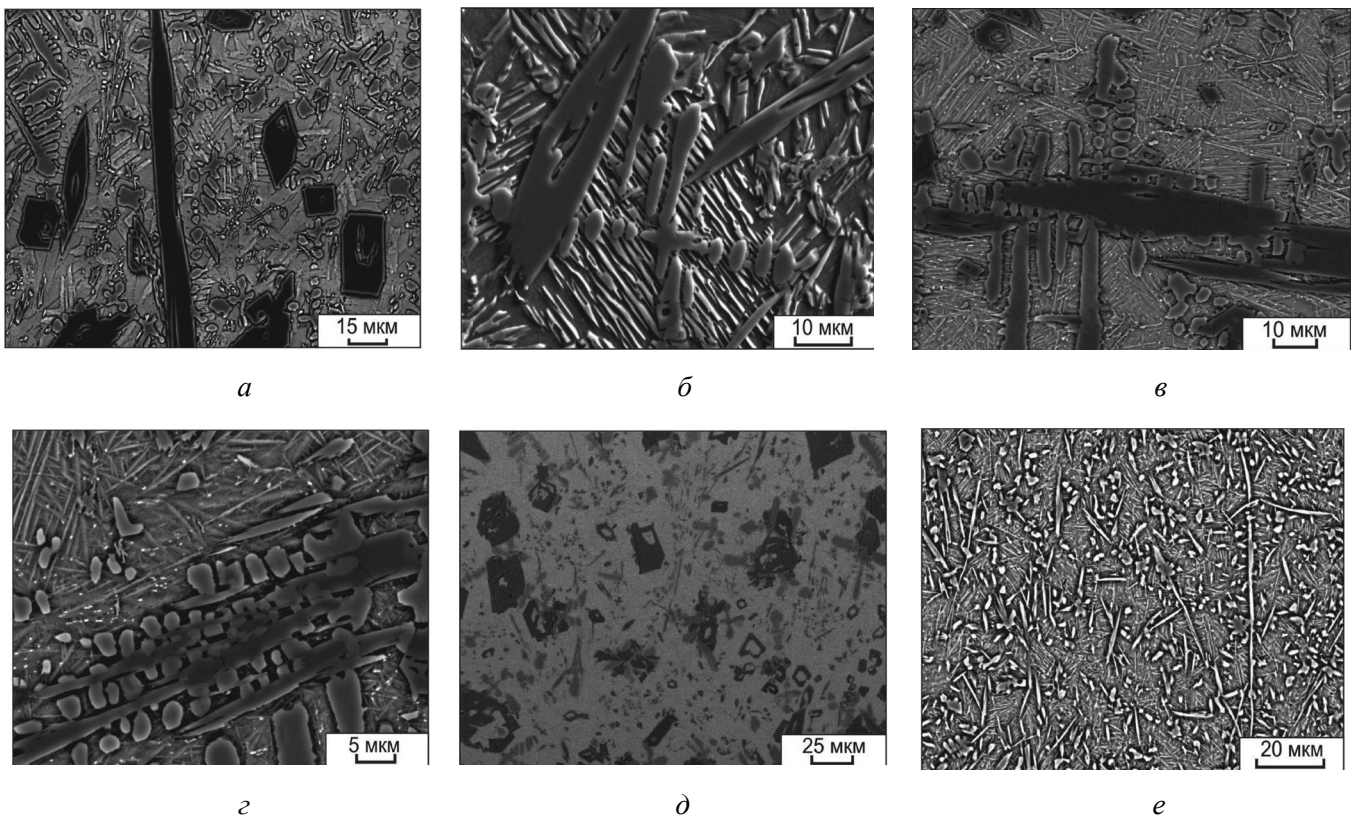


Рис. 4. Микроструктура наплавленных слоев титана, наблюдаемая методом растровой электронной микроскопии:

a – верхняя зона слоев; *б-г* – средняя зона слоев; *д-е* – нижняя зона слоев

Распределение микротвердости по глубине наплавленных слоев приведено на рис. 5. Средний уровень микротвердости слоев, полученных при наплавке 20 % вес. B_4C при токах пучка 22, 22 и 24 мА, составляет 582, 543, 679 HV соответственно. Повышение тока пучка приводит к более значительному разбавлению наплавленного слоя основным металлом, что должно приводить к снижению концентрации упрочняющих фаз и твердости образцов. Однако образец, полученный при наплавке 20 % вес. карбида бора с током пучка 24 мА, имеет более высокий уровень микротвердости, что связано с локальным увеличением объемной доли упрочняющих фаз до 55 %. Средний уровень микротвердости образцов, полученных при наплавке 12 % карбида бора, составляет 436 HV. Это обусловлено небольшой объемной долей борида и карбида титана 17 и 10 % соответственно.

Износостойкость оценивалась по результатам испытаний на трение в условиях воздействия нежестко закрепленных абразивных частиц по потере массы образцов после каждого цикла изнашивания. На рис. 6 представлены

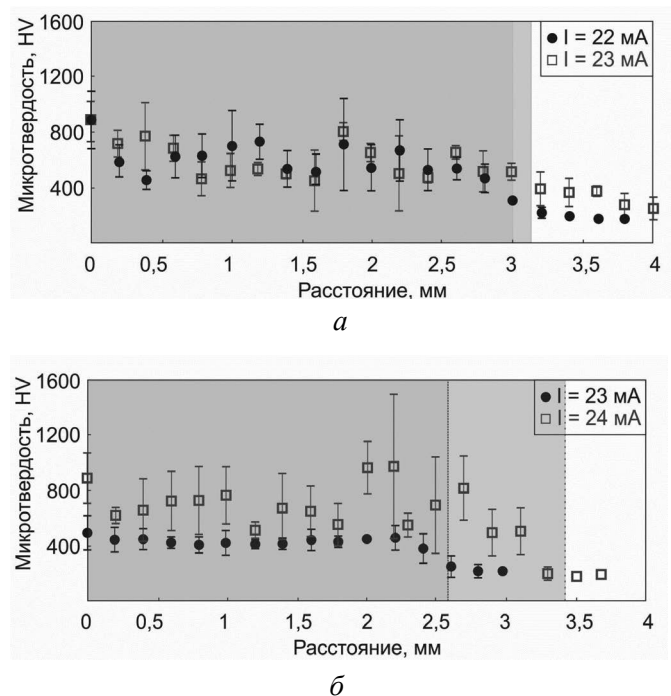


Рис. 5. Распределение микротвердости по глубине материала:

a – наплавка 20 % вес. карбида бора при токах пучка 22 и 23 мА; *б* – наплавка 20 % вес. карбида бора при токе пучка 24 мА и наплавка 12 % вес. карбида бора при токе пучка 24 мА

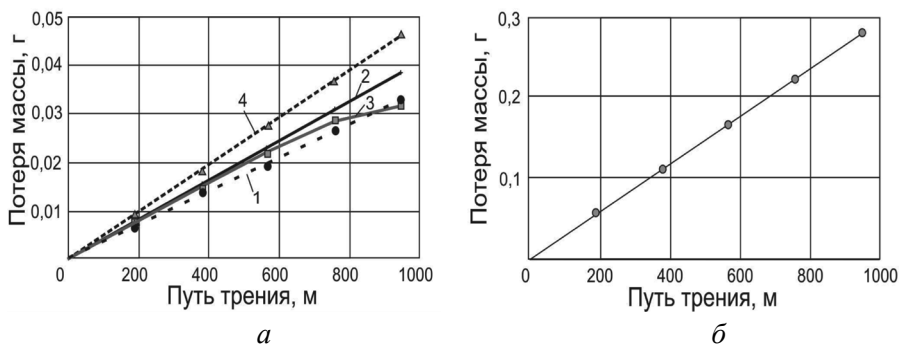


Рис. 6. Потеря массы наплавленных слоев (а) и технически чистого титана (б) при трении в условиях воздействия нежестко закрепленных абразивных частиц:

1 – наплавка 20 % карбида бора при токе пучка 22 мА; 2 – наплавка 20 % карбида бора при токе пучка 23 мА; 3 – наплавка 20 % карбида бора при токе пучка 24 мА; 4 – наплавка 12 % карбида бора при токе пучка 23 мА

результаты испытаний. Полученные данные коррелируют с результатами по оценке микротвердости. Наплавленный слой, у которого наибольшее среднее значение микротвердости, имеет меньшие потери материала при изнашивании. Максимальной износостойкостью обладает образец 3, полученный при наплавке порошков карбида бора и титана с током пучка 24 мА. Его износостойкость в 8,4 раза выше износостойкости технически чистого титана. Однако скорость потери массы образца была нелинейной, что

указывает на неравномерный характер изнашивания. Наименьшей износостойкостью обладает образец 4, имеющий самую низкую твердость и объемную долю упрочняющих фаз. Следует тем не менее отметить, что даже относительно невысокое содержание упрочняющих фаз в образце 4 (27 %) способствует повышению уровня износостойкости в шесть раз по сравнению с необработанным материалом.

На рис. 7 показаны микрофотографии поверхности материалов после изнашивания. На поверхности титана наблюдаются глубокие канавки, идущие в направлении изнашивания (рис. 7, а).

Анализ изношенной поверхности наплавленных слоев показал, что упрочняющие частицы являются эффективным барьером,

препятствующим интенсивному изнашиванию титановой матрицы. На это указывают многочисленные выделения частиц боридов титана. Следует отметить, что данные частицы прочно связаны с титаном и не выкрашиваются в процессе изнашивания.

Выводы

Проведенные исследования показали, что электронно-лучевая наплавка смеси порошков титана и карбида бора позволяет сформировать на поверхности сплава ВТ1-0 качественные слои толщиной 2,6 мм, не содержащие пор, трещин и нерастворившихся частиц порошка. Основными типами упрочняющих частиц в наплавленных слоях являются карбиды и бориды титана. Разные скорости нагрева и охлаждения разных объемов материала в процессе наплавки приводят к различному строению титановой матрицы. В середине наплавленного слоя зафиксировано формирование закалочных структур.

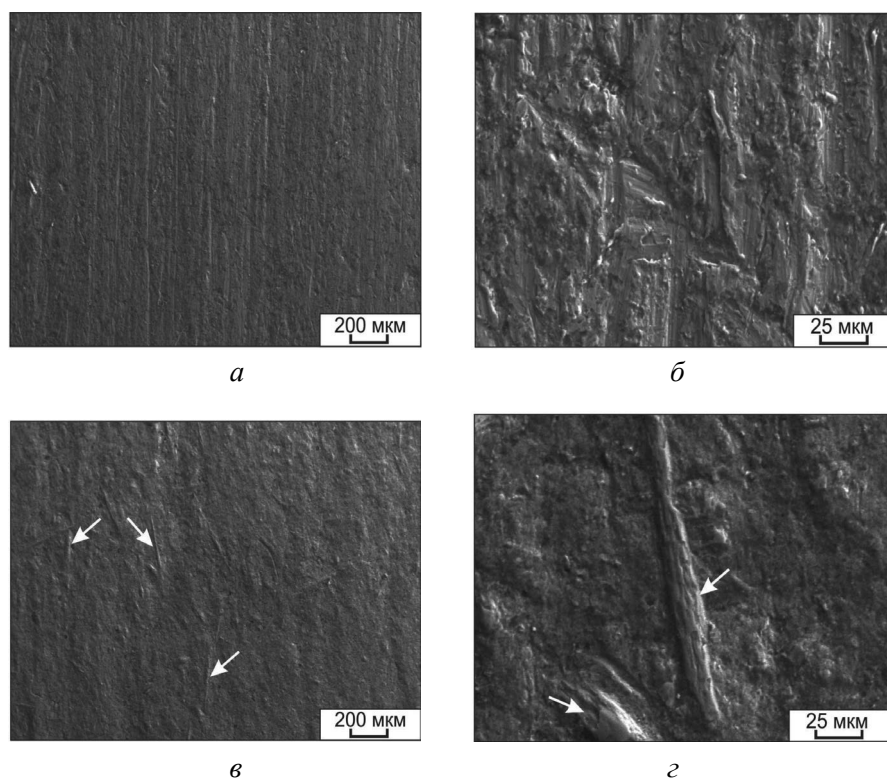


Рис. 7. Растровая электронная микроскопия поверхности после износа титанового сплава ВТ1-0 (а, б) и наплавленного слоя (образец 2) (в, г). Стрелками показаны частицы упрочняющих фаз

ДюрOMETрические исследования показали, что среднее значение микротвердости поверхностных слоев титана после наплавки повышается до 436...679 HV и зависит от режимов обработки.

Выделение в наплавленных слоях упрочняющих фаз с объемной долей выше 35 % способствует повышению уровня износостойкости более чем в восемь раз выше по сравнению с титановым сплавом ВТ1-0, однако способствует возникновению трещин. Снижение концентрации карбида бора в наплавочной смеси до 12 % позволяет сформировать качественные покрытия, уровень износостойкости которых в шесть раз выше по сравнению с необработанным титаном.

Список литературы

1. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications / ed. by C. Leyens and M. Peters. – Weinheim: Wiley-VCH, 2005. – 532 p.
2. Dong H. Tribological properties of titanium-based alloys // Surface Engineering of Light Alloys. – Oxford: Woodhead Publishing, 2010. – P. 58–80. – ISBN 978-1-845-69945-1.
3. Miller P.D., Holladay J.W. Friction and wear properties of titanium // Wear. – 1958. – Vol. 2. – P. 133–140. – doi: 10.1016/0043-1648(58)90428-9.
4. Rabinowicz E. Friction properties of titanium and its alloys // Metal Progress. – 1954. – Vol. 65 (2). – P. 107–110.
5. Alam M.O., Haseeb A.S.M.A. Response of Ti–6Al–4V and Ti–24Al–11Nb alloys to dry sliding wear against hardened steel // Tribology International. – 2002. – Vol. 35, iss. 6. – P. 357–362. – doi: 10.1016/S0301-679X(02)00015-4.
6. Budinski K.G. Tribological properties of titanium alloys // Wear. – 1991. – Vol. 151, iss. 2. – P. 203–217. – doi: 10.1016/0043-1648(91)90249-T.
7. Sun R.L., Lei Y.W. Microstructure and wear resistance of laser clad layer of TiN on TC4 alloy // Journal of Tianjin Polytechnic University. – 2007. – Vol. 26, iss. 4. – P. 57–59.
8. Filip R., Sieniawski J., Pleszakov E. Formation of surface layers on Ti–6Al–4V titanium alloy by laser alloying // Surface Engineering. – 2006. – Vol. 22, iss. 1. – P. 53–57. – doi: 10.1179/174329406X84967.
9. Laser surface modification of titanium alloys – a review / Y.S. Tian, C.Z. Chen, D.Y. Wang, T.Q. Lei // Surface Review and Letters. – 2005. – Vol. 12, iss. 01. – P. 123–130. – doi: 10.1142/S0218625X0500686X.
10. Research progress on laser surface modification of titanium alloys / Y.S. Tian, C.Z. Chen, S.T. Li, Q.H. Huo // Applied Surface Science. – 2005. – Vol. 242, iss. 1–2. – P. 177–184. – doi: 10.1016/j.apsusc.2004.08.011.
11. Development of laser cladding wear-resistant coating on titanium alloys / R. Bao, H. Yu, C. Chen, B. Qi, L. Zhang // Surface Review and Letters. – 2006. – Vol. 13. – P. 645–654. – doi: 10.1142/S0218625X06008608.
12. Saleh A.F., Abboud J.H., Benyounis K.Y. Surface carburizing of Ti–6Al–4V alloy by laser melting // Optics and Lasers in Engineering. – 2010. – Vol. 48, iss. 3. – P. 257–267. – doi: 10.1016/j.optlaseng.2009.11.001.
13. Molian P.A., Hualun L. Laser cladding of Ti–6Al–4V with bn for improved wear performance // Wear. – 1989. – Vol. 130, iss. 2. – P. 337–352. – doi: 10.1016/0043-1648(89)90187-7.
14. Получение износостойких покрытий на титановых сплавах методом вневакуумной электронно-лучевой обработки / О.Г. Ленивцева, В.В. Самойленко, М.Г. Голковский, И.А. Батаев, Р.А. Достовалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 3 (60). – С. 103–109.
15. Hardness improvement of TiB₂/Ti surface-alloyed material fabricated by high-energy electron beam irradiation / J.C. Oh, K. Euh, S. Lee, Y. Koo, N.J. Kim // Scripta Materialia. – 1998. – Vol. 39, iss. 10. – P. 1389–1394. – doi: 10.1016/S1359-6462(98)00325-X.
16. Oh J.C., Choo D.-K., Lee S. Microstructural modification and hardness improvement of titanium-base surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron beam irradiation // Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 127, iss. 1. – P. 76–85. – doi: 10.1016/S0257-8972(99)00664-7.
17. Kühnle T., Partes K. In-situ formation of titanium boride and titanium carbide by selective laser melting // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 39. – P. 432–438. – doi: 10.1016/j.phpro.2012.10.058.
18. Baker T.N., Selamat M.S. Surface engineering of Ti–6Al–4V by nitriding and powder alloying using CW CO₂ laser // Materials Science and Technology. – 2008. – Vol. 24, iss. 2. – P. 189–200. – doi: 10.1179/174328407X226563.
19. WCp/Ti–6Al–4V graded metal matrix composites layer produced by laser melt injection / Y. Chen, D. Liu, F. Li, L. Li // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202, iss. 19. – P. 4780–4787. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2008.04.057.
20. Höche D., Schaaf P. Laser nitriding: investigations on the model system TiN. A review // Heat and Mass Transfer. – 2011. – Vol. 47, iss. 5. – P. 519–540. – doi: 10.1007/s00231-010-0742-z.
21. High-energy electron beam cladding of titanium and carbon on titanium alloy / O.G. Lenivtseva,

O.A. Butylenkova, E.D. Golovin, M.G. Golkovsky // The 8th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2013), Ulaanbaatar, Mongolia, 28 June – 1 July 2013. – Ulaanbaatar: MUST, 2013. – P. 152–155.

22. Structure and properties of titanium surface layers after electron beam alloying with powder mixtures containing carbon / O.G. Lenivtseva, I.A. Bataev, M.G. Golkovski, A.A. Bataev, V.V. Samoilenko, N.V. Plotnikova // Applied Surface Science. – 2015. – Vol. 355. – P. 320–326. – doi: 10.1016/j.apsusc.2015.07.043.

23. *Ayers J.D., Schaefer R.J., Robey W.P.* A laser processing technique for improving the wear resistance of metals // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. – 1981. – Vol. 33, iss. 8. – P. 19–23. – doi: 10.1007/BF03339467.

24. *Draper C.W., Ewing C.A.* Laser surface alloying: a bibliography // Journal of Materials Science. – 1984. – Vol. 19, iss. 12. – P. 3815–3825. – doi: 10.1007/BF00980743.

25. Improvement of hardness and wear resistance in SiC/Ti–6Al–4V surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation / J.C. Oh, E. Yun, M.G. Golkovski, S. Lee // Materials Science and Engineering: A. – 2003. – Vol. 351, iss. 1–2. – P. 98–108. – doi: 10.1016/S0921-5093(02)00821-3.

26. *Lee C.S., Oh J.C., Lee S.* Improvement of hardness and wear resistance of (TiC, TiB)/Ti–6Al–4V surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron-beam irradiation // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2003. – Vol. 34, iss. 7. – P. 1461–1471. – doi: 10.1007/s11661-003-0258-y.

27. *Yun E., Lee K., Lee S.* Improvement of high-temperature hardness of (TiC, TiB)/Ti–6Al–4V surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol. 184, iss. 1. – P. 74–83. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2003.10.017.

28. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovsky, A.Y. Teplykh, V.G. Burov, S.V. Veselov // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 207. – P. 245–253. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.081.

29. Structure of surface layers produced by nonvacuum 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.

30. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка углеродсодержащих порошковых смесей на заготовки из титана ВТ1-0 / О.Г. Ленивцева, И.А. Батаев, В.В. Иванцовский, Н.С. Белоусова, Е.Д. Головин, Т.А. Зимоглядова // Обработка металлов (технология,

оборудование, инструменты). – 2013. – № 4 (61). – С. 49–57.

31. In situ technique for synthesizing (TiB+TiC)/Ti composites / X. Zhang, W. Lü, D. Zhang, R. Wu, Y. Bian, P. Fang // Scripta Materialia. – 1999. – Vol. 41, iss. 1. – P. 39–46. – doi: 10.1016/S1359-6462(99)00087-1.

32. Microstructural characterization of titanium matrix composite coatings reinforced by in situ synthesized TiB + TiC fabricated on Ti6Al4V by laser cladding / J. Li, Z. Yu, H. Wang, M. Li // Rare Metals. – 2010. – Vol. 29, iss. 5. – P. 465–472. – doi: 10.1007/s12598-010-0151-y.

33. Study on microstructure of laser in situ formation of TiBX and TiC titanium composite coatings / J. Liang, S. Chen, C. Liu, F. Liu // Materials Science Forum. – 2011. – Vol. 686. – P. 646–653. – doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.686.646.

34. *Zhang Y., Sun J., Vilar R.* Characterization of (TiB + TiC)/TC4 in situ titanium matrix composites prepared by laser direct deposition // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211, iss. 4. – P. 597–601. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.11.009.

35. Handbook of ternary alloy phase diagrams / P. Villars, A. Prince, H. Okamoto, eds. – Materials Park, Ohio: ASM International, 1994. – ISBN 10: 0871705265. – ISBN 13: 9780871705266.

36. Microstructural characterization of TiB in in situ synthesized titanium matrix composites prepared by common casting technique / W. Lu, D. Zhang, X. Zhang, R. Wu, T. Sakata, H. Mori // Journal of Alloys and Compounds. – 2001. – Vol. 327, iss. 1–2. – P. 240–247. – doi: 10.1016/S0925-8388(01)01445-1.

37. Evolution of microstructure and phases in in situ processed Ti–TiB composites containing high volume fractions of TiB whiskers / S.S. Sahay, K.S. Ravichandran, R. Atri, B. Chen, J. Rubin // Journal of Materials Research. – 1999. – Vol. 14, iss. 11. – P. 4214–4223. – doi: 10.1557/JMR.1999.0571.

38. TEM characterization of symbiosis structure of in situ TiC and TiB prepared by reactive processing of Ti–B4C / D.R. Ni, L. Geng, J. Zhang, Z.Z. Zheng // Materials Letters. – 2008. – Vol. 62, iss. 4–5. – P. 686–688. – doi: 10.1016/j.matlet.2007.06.033.

39. *Kooi B.J., Pei Y.T., Hosson J.T.M. de.* The evolution of microstructure in a laser clad TiB–Ti composite coating // Acta Materialia. – 2003. – Vol. 51, iss. 3. – P. 831–845. – doi: 10.1016/S1359-6454(02)00475-5.

40. Grain refinement of cast titanium alloys via trace boron addition / S. Tamirisakandala, R.B. Bhat, J.S. Tiley, D.B. Miracle // Scripta Materialia. – 2005. – Vol. 53, iss. 12. – P. 1421–1426. – doi: 10.1016/j.scriptamat.2005.08.020.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4 (73), October – December 2016, Pages 63–74

Structure and properties of TiB-TiC-Ti layers fabricated on cp-titanium substrates by electron beam cladding

Lenivtseva O.G.¹, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, Associate Professor,
e-mail: lenivtseva_olga@mail.ru

Drobyaz E.A.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ekaterina.drobyaz@yandex.ru

Gontarenko A.S.^{2, 1}, Junior researcher, Assistant, e-mail: gontarenko@iw.uni-hannover.de

Zimogliadova T.A.¹, Ph.D. student, e-mail: zimogliadovatatiana@gmail.com

Chuchkova L.V.¹, Master's Degree student, e-mail: l_chuchkova@bk.ru

¹Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

²Leibniz University of Hannover, 2 University str., Garbsen, 30823, Germany

Abstract

The influence of non-vacuum electron beam treatment modes on the structure and properties of wear resistant TiB-TiC-Ti layers formed on the surface of VT1-0 titanium alloy is investigated. A mixture of titanium, boron carbide and flux powders is used as filler. The structure and phase composition of the layers are investigated by the means of optical microscopy and scanning electron microscopy, and X-ray diffractometry. The experiments resulted in the formation of layers with the thickness of 3.4 mm consisting of α (α')-Ti, titanium carbide and titanium monoboride. Structural investigations revealed a high volume fraction of TiC and TiB reinforcing compounds contributed in the formation of cracks in the cladded layers. Variation of technological regimes of the electron beam treatment affected the hardness of cladded layers. Treatment of the sample containing 20 wt. % of boron carbide in a filler with a beam current of 22 μ A led to the formation of the layer with hardness of 582 HV. This value was about 3.5-fold higher than titanium microhardness. Increase of a beam current by 1 μ A resulted in decrease of the microhardness level to 543 HV. Treatment of the sample containing 12 wt. % of boron carbide in a filler led to the formation of the layer with hardness of 436 HV.

Wear resistance of fabricated materials is estimated in the conditions of friction by non-rigidly fixed abrasive particles. The best characteristics possessed the layers obtained by cladding of 20 wt. % boron carbide. Intensity of wear of the coated samples was 8-fold lower comparing to cp-titanium.

Keywords

Electron beam cladding, titanium, titanium carbide, titanium boride, microhardness, wear resistance

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-63-74

References

1. Leyens C., Peters M., eds. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Weinheim, Wiley-VCH, 2005. 532 p. ISBN 978-3-527-30534-6.
2. Dong H. Tribological properties of titanium-based alloys. *Surface Engineering of Light Alloys*. Oxford, Woodhead Publishing, 2010, pp. 58–80. ISBN 978-1-845-69945-1.
3. Miller P.D., Holladay J.W. Friction and wear properties of titanium. *Wear*, 1958, vol. 2, pp. 133–140. doi: 10.1016/0043-1648(58)90428-9
4. Rabinowicz E. Friction properties of titanium and its alloys. *Metal Progress*, 1954, vol. 65 (2), pp. 107–110.
5. Alam M.O., Haseeb A.S.M.A. Response of Ti–6Al–4V and Ti–24Al–11Nb alloys to dry sliding wear against hardened steel. *Tribology International*, 2002, vol. 35, iss. 6, pp. 357–362. doi: 10.1016/S0301-679X(02)00015-4
6. Budinski K.G. Tribological properties of titanium alloys. *Wear*, 1991, vol. 151, iss. 2, pp. 203–217. doi: 10.1016/0043-1648(91)90249-T
7. Sun R.L., Lei Y.W. Microstructure and wear resistance of laser clad layer of TiN on TC4 alloy. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2007, vol. 26, iss. 4, pp. 57–59.

8. Filip R., Sieniawski J., Pleszakov E. Formation of surface layers on Ti–6Al–4V titanium alloy by laser alloying. *Surface Engineering*, 2006, vol. 22, iss. 1, pp. 53–57. doi: 10.1179/174329406X84967
9. Tian Y.S., Chen C.Z., Wang D.Y., Lei T.Q. Laser surface modification of titanium alloys – a review. *Surface Review and Letters*, 2005, vol. 12, iss. 01, pp. 123–130. doi: 10.1142/S0218625X0500686X
10. Tian Y.S., Chen C.Z., Li S.T., Huo Q.H. Research progress on laser surface modification of titanium alloys. *Applied Surface Science*, 2005, vol. 242, iss. 1–2, pp. 177–184. doi: 10.1016/j.apsusc.2004.08.011
11. Bao R., Yu H., Chen C., Qi B., Zhang L. Development of laser cladding wear-resistant coating on titanium alloys. *Surface Review and Letters*, 2006, vol. 13, pp. 645–654. doi: 10.1142/S0218625X06008608
12. Saleh A.F., Abboud J.H., Benyounis K.Y. Surface carburizing of Ti–6Al–4V alloy by laser melting. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, vol. 48, iss. 3, pp. 257–267. doi: 10.1016/j.optlaseng.2009.11.001
13. Molian P.A., Hualun L. Laser cladding of Ti–6Al–4V with bn for improved wear performance. *Wear*, 1989, vol. 130, iss. 2, pp. 337–352. doi: 10.1016/0043-1648(89)90187-7
14. Lenivtseva O.G., Bataev I.A., Golkovsky M.G., Samoilenko V.V., Dostovalov R.A. Poluchenie iznosostoi-kikh pokrytii na titanovykh splavakh metodom vnevakuumnoi elektronno-luchevoi obrabotki [Production of wear-resistance coatings on titanium alloys by the method of non-vacuum electron-beam cladding]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 3 (60), pp. 103–109.
15. Oh J.C., Euh K., Lee S., Koo Y., Kim N.J. Hardness improvement of TiB₂/Ti surface-alloyed material fabricated by high-energy electron beam irradiation. *Scripta Materialia*, 1998, vol. 39, iss. 10, pp. 1389–1394. doi: 10.1016/S1359-6462(98)00325-X
16. Oh J.C., Choo D.-K., Lee S. Microstructural modification and hardness improvement of titanium-base surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron beam irradiation. *Surface and Coatings Technology*, 2000, vol. 127, iss. 1, pp. 76–85. doi: 10.1016/S0257-8972(99)00664-7
17. Kühnle T., Partes K. In-situ formation of titanium boride and titanium carbide by selective laser melting. *Physics Procedia*, 2012, vol. 39, pp. 432–438. doi: 10.1016/j.phpro.2012.10.058
18. Baker T.N., Selamat M.S. Surface engineering of Ti–6Al–4V by nitriding and powder alloying using CW CO₂ laser. *Materials Science and Technology*, 2008, vol. 24, iss. 2, pp. 189–200. doi: 10.1179/174328407X226563
19. Chen Y., Liu D., Li F., Li L. WCp/Ti–6Al–4V graded metal matrix composites layer produced by laser melt injection. *Surface and Coatings Technology*, 2008, vol. 202, iss. 19, pp. 4780–4787. doi: 10.1016/j.surfcoat.2008.04.057
20. Höche D., Schaaf P. Laser nitriding: investigations on the model system TiN. A review. *Heat and Mass Transfer*, 2011, vol. 47, iss. 5, pp. 519–540. doi: 10.1007/s00231-010-0742-z
21. Lenivtseva O.G., Butylenkova O.A., Golovin E.D., Golkovsky M.G. High-energy electron beam cladding of titanium and carbon on titanium alloy. *The 8th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2013): proceedings*, Ulaanbaatar, Mongolia, 28 June – 1 July 2013, vol. 1, pp. 152–155.
22. Lenivtseva O.G., Bataev I.A., Golkovski M.G., Bataev A.A., Samoilenko V.V., Plotnikova N.V. Structure and properties of titanium surface layers after electron beam alloying with powder mixtures containing carbon. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 355, pp. 320–326. doi: 10.1016/j.apsusc.2015.07.043
23. Ayers J.D., Schaefer R.J., Robey W.P. A laser processing technique for improving the wear resistance of metals. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 1981, vol. 33, iss. 8, pp. 19–23. doi: 10.1007/BF03339467
24. Draper C.W., Ewing C.A. Laser surface alloying: a bibliography. *Journal of Materials Science*, 1984, vol. 19, iss. 12, pp. 3815–3825. doi: 10.1007/BF00980743
25. Oh J.C., Yun E., Golkovski M.G., Lee S. Improvement of hardness and wear resistance in SiC/Ti–6Al–4V surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, vol. 351, iss. 1–2, pp. 98–108. doi: 10.1016/S0921-5093(02)00821-3
26. Lee C.S., Oh J.C., Lee S. Improvement of hardness and wear resistance of (TiC, TiB)/Ti–6Al–4V surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron-beam irradiation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2003, vol. 34, iss. 7, pp. 1461–1471. doi: 10.1007/s11661-003-0258-y
27. Yun E., Lee K., Lee S. Improvement of high-temperature hardness of (TiC, TiB)/Ti–6Al–4V surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation. *Surface and Coatings Technology*, 2004, vol. 184, iss. 1, pp. 74–83. doi: 10.1016/j.surfcoat.2003.10.017
28. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Teplykh A.Y., Burov V.G., Veselov S.V. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 207, pp. 245–253. doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.081

29. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovski M.G., Krivizhenko D.S., Losinskaya A.A., Lenivtseva O.G. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 284, pp. 472–481. doi: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121
30. Lenivtseva O.G., Bataev I.A., Ivancivsky V.V., Belousova N.S., Golovin E.D., Zimoglyadova T.A. Vnevakuumnaya elektronno-luchevaya naplavka uglerodsoderzhashchikh poroshkovykh smesei na zagotovki iz titana VT1-0 [Atmospheric electron-beam overlay welding of carbon containing powder mixtures onto technically pure titanium VT1-0]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 4 (61), pp. 49–57.
31. Zhang X., Lü W., Zhang D., Wu R., Bian Y., Fang P. In situ technique for synthesizing (TiB+TiC)/Ti composites. *Scripta Materialia*, 1999, vol. 41, iss. 1, pp. 39–46. doi: 10.1016/S1359-6462(99)00087-1
32. Li J., Yu Z., Wang H., Li M. Microstructural characterization of titanium matrix composite coatings reinforced by in situ synthesized TiB + TiC fabricated on Ti6Al4V by laser cladding. *Rare Metals*, 2010, vol. 29, iss. 5, pp. 465–472. doi: 10.1007/s12598-010-0151-y
33. Liang J., Chen S., Liu C., Liu F. Study on microstructure of laser in situ formation of TiBX and TiC titanium composite coatings. *Materials Science Forum*, 2011, vol. 686, pp. 646–653. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.686.646
34. Zhang Y., Sun J., Vilar R. Characterization of (TiB + TiC)/TC4 in situ titanium matrix composites prepared by laser direct deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211, iss. 4, pp. 597–601. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.11.009
35. Villars P., Prince A., Okamoto H., eds. *Handbook of ternary alloy phase diagrams*. Materials Park, Ohio, ASM International, 1994. ISBN 10: 0871705265. ISBN 13: 9780871705266.
36. Lu W., Zhang D., Zhang X., Wu R., Sakata T., Mori H. Microstructural characterization of TiB in in situ synthesized titanium matrix composites prepared by common casting technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 2001, vol. 327, iss. 1–2, pp. 240–247. doi: 10.1016/S0925-8388(01)01445-1
37. Sahay S.S., Ravichandran K.S., Atri R., Chen B., Rubin J. Evolution of microstructure and phases in in situ processed Ti–TiB composites containing high volume fractions of TiB whiskers. *Journal of Materials Research*, 1999, vol. 14, iss. 11, pp. 4214–4223. doi: 10.1557/JMR.1999.0571
38. Ni D.R., Geng L., Zhang J., Zheng Z.Z. TEM characterization of symbiosis structure of in situ TiC and TiB prepared by reactive processing of Ti–B4C. *Materials Letters*, 2008, vol. 62, iss. 4–5, pp. 686–688. doi: 10.1016/j.matlet.2007.06.033
39. Kooi B.J., Pei Y.T., Hosson J.T.M. de. The evolution of microstructure in a laser clad TiB–Ti composite coating. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, iss. 3, pp. 831–845. doi: 10.1016/S1359-6454(02)00475-5
40. Tamirisakandala S., Bhat R.B., Tiley J.S., Miracle D.B. Grain refinement of cast titanium alloys via trace boron addition. *Scripta Materialia*, 2005, vol. 53, iss. 12, pp. 1421–1426. doi: 10.1016/j.scriptamat.2005.08.020

Funding

The reported study was funded by RFBR, according to the research project No. 16-33-60066 mol_a_dk

Article history

Received 12 October 2016

Revised 21 October 2016

Accepted 15 November 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,
Редакционный совет и редакция журнала
«Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)»*

ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

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

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

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

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

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

Пример авторского резюме на русском языке

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

Это же авторское резюме на английском языке

A considerable part of innovative plans concerning implementation of developments with underlying novelties either do not reach the implementing stage, or in fact yield less benefit than anticipated. One of the reasons of such failures is the fact that the manager lacks real tools for planning, evaluating and controlling innovations. The article brings forward the mechanism for a strategic planning of a company, based on the analysis of both inner company's resources, and outer competitive strength,

as well as on searching ways of using external opportunities with account taken of the company's specific character. Strategic planning is based on a code of regulations and procedures containing a series of methods, the use of which makes it possible for company's manager to ensure prompt measures of reaction to outer business environment changes. Such methods include: strategic segmentation; solving problems in real-time mode; diagnostics of strategic readiness to operate in the context of the future; working out a general plan of management; planning of the business position of the firm; strategic transformation of the company. Strategic planning process is presented as a closed cycle consisting of 9 successive stages, each of them represents a logical sequence of measures ensuring the dynamics of system development. The developed by the author strategic planning methods result in the recommendation to proceed to "interactive strategic management" which is conceptually based on the constructive potential of the collective body, on searching ways of its building on the basis of effective overcoming accelerating changes, increasing organizational complexity, and unpredictable changeability of the environment.

Пример структурированного авторского резюме из иностранного журнала в Scopus

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

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

Results: As an approach of noninvasive functional imaging, quantitative magnetic resonance spectroscopic imaging (MRSI) measured abnormalities of mitochondrial and energetic dysfunction (via ¹H or ³¹P spectroscopy) are related to several pathophysiologic indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative ¹³C-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 ³¹PMR, 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. 137 ВЦ, зам. гл. редактора Скиба В.Ю.) высылаются оригиналы авторского лицензионного договора и экспертного заключения о возможности открытого опубликования статьи.

Все рукописи рецензируются.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РУКОПИСЕЙ

Текст набирается в русифицированном редакторе *Microsoft Word*. Формат оригиналов – **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 непереводаемых названий собственных имен и других объектов, имеющих собственные названия; также не используется непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это также касается авторских аннотаций и ключевых слов;

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

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 язык публикации (**in Russian**);

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

* 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; исключение 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 smazochno-okhlazhdayushchie zhidkosti [Modern coolants]. *Vestnik mashinostroeniya - Russian Engineering Research*, 1996, no. 7, pp. 30–34.

Описание статьи из электронного журнала:

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

Если статья имеет DOI – обязательно указать его!

Описание статьи с DOI:

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

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

Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

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

Описание материалов конференций:

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

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

Sen’kin A.V. [Issues of vibration diagnostics of elastic spacecraft]. *Problemy teorii i praktiki v inzhernykh 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 aviatcionnykh materialov. Trudy MATI* [Thermal Phenomena and the Ease of Cutting of Aviation Materials: Proceedings of the Moscow Aviation Engineering Institute]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966, no. 64.

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

Описание переводной книги:

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

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



IV Международная научно-практическая конференция
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ»

IV International Scientific and Practical Conference
“ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING”

29 Марта/March 2017 г.

29 марта 2017 г., с 10-30 до 17-00 ч. – общее заседание в конференц-зале «ITE Сибирь» в рамках Международной выставки машиностроения и металлообработки MASHEX SIBERIA по адресу: г. Новосибирск, ул. Станционная, 104, МБК «Новосибирск Экспоцентр».

Тематика конференции

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

Публикация материалов

Материалы конференции войдут в номер журнала «Актуальные проблемы в машиностроении» (ISSN 2313-1020). Журнал представлен на сайте НГТУ: <http://journals.nstu.ru/machine-building> и <http://machine-building.conf.nstu.ru/>. Электронная версия издания доступна на платформе eLIBRARY. Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. Публикация статей бесплатная.

Организаторы конференции

- **Новосибирский государственный технический университет, научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология · оборудование · инструменты)», г. Новосибирск, Россия**
- **Выставочная компания «ITE Сибирь», г. Новосибирск, Россия**

Соорганизаторы

- **Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук, г. Рюссельсхайм, Федеративная Республика Германия;**
- **Ганноверский университет Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен, Федеративная Республика Германия;**
- **Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина;**
- **Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь;**
- **ОАО НПТ и ЭИ «Оргстанкинпром», г. Новосибирск, Россия;**
- **ООО НПКФ «Машсервисприбор», г. Новосибирск, Россия;**
- **Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия;**
- **Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия;**
- **Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия;**

- **Бийский технологический институт АлГТУ им. И.И. Ползунова**, г. Бийск, Россия;
- **Институт физики прочности и материаловедения СО РАН**, г. Томск, Россия;
- **Томский политехнический университет**, г. Томск, Россия;
- **Братский государственный университет**, г. Братск, Россия

Почетный комитет

Члены комитета: *Монико Грайф*, профессор, доктор, Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук (г. Рюссельсхайм), *Томас Хассел*, профессор, доктор, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница (г. Гарбсен), *Флориан Нюрнбергер*, профессор, доктор, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница (г. Гарбсен), *Буров В.Г.*, профессор, д.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), *Ковалевский С.В.*, проректор ДГМА (г. Краматорск), *Пантелеенко Ф.И.*, профессор, д.т.н., член-корреспондент НАН Беларуси, БНТУ (г. Минск), *Афанасьев В.К.*, академик РАЕН, профессор, д.т.н., зав. каф. СибГИУ (г. Новокузнецк), *Вандакуров А.Н.*, ген. директор АО «Новосибирский механический завод «Искра», (г. Новосибирск), *Герасенко А.Н.*, директор ООО НПФК «Машсервисприбор» (г. Новосибирск), *Гурьев А.М.*, профессор, д.т.н., зав. каф. АлГТУ (г. Барнаул), *Кирсанов С.В.*, профессор, д.т.н., ТПУ (г. Томск), *Марков А.М.*, профессор, д.т.н., зав. каф. АлГТУ (г. Барнаул), *Мещеракова Н.А.*, директор выставки, МВЦ «ИТЕ Сибирь» (г. Новосибирск), *Овчаренко А.Г.*, профессор, д.т.н., зав. каф. БТИ АлГТУ (г. Бийск), *Рахимьянов Х.М.*, профессор, д.т.н., зав. каф. НГТУ (г. Новосибирск), *Ситников А.А.*, д.т.н., профессор, ректор АлГТУ (г. Барнаул), *Янюшкин А.С.*, профессор, д.т.н., член-корреспондент САН ВШ, академик МАН ВШ, зав. каф. БГУ (г. Братск).

Программный комитет

- *Атапин В.Г.*, профессор, д.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), **сопредседатель**;
- *Батаев А.А.*, главный редактор журнала «*Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*», профессор, д.т.н., ректор НГТУ (г. Новосибирск), **сопредседатель**;
- *Коротков А.Н.*, академик РАЕ, профессор, д.т.н., КузГТУ (г. Кемерово), **сопредседатель**.

Члены программного комитета: *Иванцовский В.В.*, зам. главного редактора журнала «*Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*», профессор, д.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), *Ленивцева О.Г.*, к.т.н. (г. Новосибирск), *Лобанов Д.В.*, д.т.н., профессор, БГУ (г. Братск), *Трегубчак П.В.*, гл. технолог ОАО «Новосибирский стрелочный завод» (г. Новосибирск), *Янпольский В.В.*, к.т.н., доцент, декан МТФ НГТУ (г. Новосибирск)

Организационный комитет

- *Дашкова В.А.*, руководитель дирекции отраслевых выставок «ИТЕ Сибирь» (г. Новосибирск).
- *Скиба В.Ю.*, зам. главного редактора журнала «Обработка металлов», доцент, к.т.н., НГТУ (г. Новосибирск);

Секретариат конференции

Зверев Е.А., к.т.н., доцент, НГТУ (г. Новосибирск);
Мартынова Т.Г., к.т.н., доцент, НГТУ (г. Новосибирск).

Регистрация

Для участия в конференции необходимо в срок до **20 февраля 2017 г.** зарегистрировать свою рукопись на сайте журнала «Актуальные проблемы в машиностроении» <http://journals.nstu.ru/machine-building>.

Для того чтобы подать статью, автор и все соавторы должны быть зарегистрированы на сайте журнала (при регистрации профиля автора должны быть заполнены все поля). 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.

Для регистрации перейдите по ссылке: <http://journals.nstu.ru/machine-building/registration>

Обращаем Ваше внимание! Если Вы зарегистрированы на сайте научно-технического и производственного журнала «Обработка металлов (технология · оборудование · инструменты)», то для подачи своей работы на сайте журнала «Актуальные проблемы в машиностроении» необходимо использовать тот же логин и пароль.

Подготовка рукописи

Рукопись статьи готовится в соответствии с правилами оформления журнала (см. ниже) «Актуальные проблемы в машиностроении» в редакторе MS Word и прикрепляется в формате *.doc, *.docx.

Сканированные *Лицензионный договор с подписями авторов, Экспертное заключение о возможности открытого опубликования статьи и Заключение внутривузовской комиссии по экспортному контролю о возможности использования научных материалов при международном сотрудничестве (если предусмотрено вузом)* (цветной режим сканирования, разрешение не менее 300 dpi) необходимо также прикрепить на сайте журнала в разделе «*Подать статью*» в формате *.pdf, *.jpg, *.jpeg. Поскольку в оболочке при подаче статьи существует только одна опция «*Скан экспертного заключения*», необходимо «*Экспертное заключение о возможности открытого опубликования статьи*» и «*Заключение внутривузовской комиссии по экспортному контролю о возможности использования научных материалов при международном сотрудничестве*» объединить в один документ (многостраничный) и загрузить сформированный файл.

По окончании всех работ обязательно нажать кнопку «*Отправить в редакцию*».

Обращаем внимание, что авторы должны дополнительно отправить заявку на участие, в которой указать фамилию, имя и отчество (**Ф.И.О. полностью**), должность, ученую степень, звание, тематику доклада (*Инновационные технологии в машиностроении; Технологическое оборудование, оснастка и инструменты; Материаловедение в машиностроении; Экономика и организация инновационных процессов в машиностроении*), название организации, адрес, телефон, факс, e-mail. Заявку можно отправить на e-mail: metal_working@mail.ru либо написать «*Сообщение*» в своем авторском профиле.

Бронированием мест в гостиницах участники занимаются самостоятельно. На сайте конференции в разделе «*Контакты*» (<http://machine-building.conf.nstu.ru/archive/>) представлены адреса возможных гостиниц для размещения участников конференции в г. Новосибирске.

Одновременно со статьей высылаются оригиналы всех перечисленных документов на почтовый адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 137 ВЦ, зам. гл. редактора Скибе В.Ю.

Правила оформления материалов (<http://journals.nstu.ru/machine-building/rules>)

Текст набирается в русифицированном редакторе *Microsoft Word*; формат А4 (210×297 мм); ориентация – книжная, все поля 2 см; без переносов; шрифт Times New Roman, размер шрифта основного текста – 14 пт, через 1 интервал, абзацный отступ – 1,25 см, страницы не нумеруются. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть включены в текст работы. Объем до 4–6 машинописных страниц.

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

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

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

Рисунки. Рекомендуемые размеры рисунков: 60 × 150, 60 × 70 мм с разрешением не менее 300 dpi.

Библиографический список, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка», составляется по ходу упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Ссылки в тексте на литературу даются в квадратных скобках, например, [1], [2, 3], [4–7], [4, стр. 23–28].

Англоязычный блок должен включать в себя следующую информацию: *Заглавие работы; Фамилию И.О. (всех авторов); Аффiliation всех авторов; Аннотация (Abstract) 100–150 слов; Ключевые слова (Keywords).*

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 7.9-95 – сжатый обзор содержания работы (по ГОСТу 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, она включает в себя 100–250 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** (краткий обзор по состоянию проблемы с цитатами или ссылками на актуальную литературу; в конце раздела необходимо сформулировать цель или задачу нового исследования и то, как вы это сделали).

5. **Теория** (для теоретических работ) или **методика** экспериментального исследования (для экспериментальных работ). Следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

6. **Результаты и обсуждение.**

7. **Выводы** (по результатам работы, описанной в данной статье; следует быть лаконичным).

8. **Список литературы:** не менее 15–25 наименований источников (оформлять 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]. Внимание, авторы: в работе не должно быть более 30 % собственных статей, не менее 50 % – литература за последние 10 лет, обязательно включайте иностранные источники (желательно не менее 50 %).

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** (пример оформления представлен ниже).

Правила оформления англоязычного блока статьи

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, включает в себя **100–250 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).

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).

**Материалы, присланные после 20 февраля 2017 года,
к опубликованию не принимаются.**

Для посещения международной выставки и конференции участникам будет необходимо пройти регистрацию посетителей на сайте <http://www.masheх-siberia.ru/ru-RU>.

Заранее заполните регистрационную форму и получите электронный билет. Распечатайте билет и возьмите с собой на выставку. Электронный билет дает право бесплатного посещения выставки специалистами в течение всех дней ее работы.

Без электронного билета вход на выставку осуществляется по билетам, приобретенным в кассе. На один e-mail можно получить только один электронный пригласительный билет.

При посещении выставки и конференции регистрация обязательна!

Внимание! За дополнительной информацией следите на сайте конференции <http://machine-building.conf.nstu.ru/> и на сайтах журналов http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov и <http://journals.nstu.ru/machine-building>.

Адрес для направления материалов конференции:

Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корп. 5, к. 137 ВЦ

Новосибирский государственный технический университет,

заместитель главного редактора журнала

«Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)»:

Скиба Вадим Юрьевич

тел. (383) 346-17-79

e-mail: metal_working@mail.ru

Пример оформления статьи

УДК 621.9.06:518.4

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В.Г. ИВАНОВ¹, доктор техн. наук, профессор,
В.С. ПЕТРОВ², аспирант,
(¹ НГТУ, г. Новосибирск, ² БрГУ, г. Братск)

Иванов В.Г. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: metal_working@mail.ru

Аннотация

Ключевые слова

<желательная структура текста представляемого материала >

1. Введение

2. Теория или методика экспериментального исследования или материалы и методы и др.

3. Результаты и обсуждение

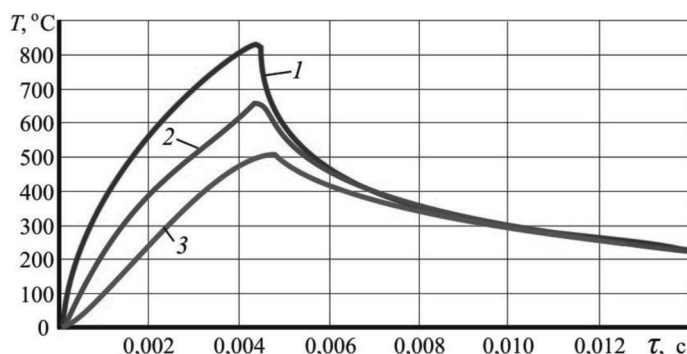


Рис. 1. Пример оформления рисунка

Таблица 1

Пример оформления таблицы

Зерни- стость, Z	$\sigma_\epsilon \alpha_\epsilon$, мм^{-1}	$A_{\text{ср}} \times 10^{-3}$, $\text{кгс} \times \text{мм}$	Износ гранул, I , г	Интенсив- ность износа, J , г/мин	Износостой- кость, $\gamma \times 10^{-2}$	Коэффициенты пропорциональности	
						$\gamma/A_{\text{ср}}$	$\gamma/\sigma_\epsilon \alpha_\epsilon \times 10^{-2}$
	4,138	1,698	650	10,833	9,231	54,36	2,231
12	6,317	2,593	430	7,167	13,958	53,83	2,209

4. Выводы

5. Список литературы

Choice of design parameters of base details at the design stage

Ivanov V.G.¹, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ivanov@mail.ru

Petrov V.S.², Post-graduate Student, e-mail: petrov@gmail.com

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

Abstract (100–250 слов)

Keywords

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

²Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, г. Братск, 665709, 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... (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.

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

²Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, 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.

Пример оформления лицензионного договора

Лицензионный договор на публикацию статьи «Выбор конструктивных параметров базовых деталей на этапе проектирования» (авторы В.Г. Иванов, В.С. Петров,) в сборнике материалов международной конференции «Актуальные проблемы в машиностроении»

1. Автор с момента заключения настоящего договора передает Издателю на безвозмездной основе права на издание произведения (далее – Статья), одобренного и принятого к опубликованию редколлегией (редакцией) журнала «Актуальные проблемы в машиностроении» (далее – Журнал) на срок – до выхода Журнала со Статьей Автора в свет печатном и (или) электронном виде и его использования и распространения по подписке или отдельным заказам на территории России и всего мира.

2. В соответствии с настоящим договором права использования Статьи, предоставленные Автором Издателю, включают:

2.1. Анонсирование (предварительное оповещение или публичное сообщение сведений о произведении), аннотирование (краткое изложение содержания и иных сопутствующих сведений) и рекламу Статьи в Журнале и иных средствах массовой информации, в том числе путем публикации фрагментов Статьи за счет Издателя;

2.2. Использование Статьи в электронной (цифровой) форме в базах данных Издателя, в том числе в электронно-библиотечной системе НГТУ, в том числе в сети Интернет со свободным или ограниченным доступом пользователей.

3. Автор гарантирует:

3.1. Рукопись является оригинальной работой автора с соавторами (если таковые имеются) и никогда не была опубликована в представленном виде.

3.2. Он имеет согласие всех соавторов Статьи, права на издание и распространение которой передаются Издателю по настоящему договору.

3.3. Он не публиковал Статью в объеме более 50 % в других печатных и (или) электронных изданиях, кроме публикации Статьи в виде препринта.

3.4. Статья содержит все предусмотренные действующим законодательством об авторском праве ссылки на цитируемых авторов и (или) издания, а также используемые в статье результаты и факты, полученные другими авторами или организациями.

3.5. Статья не включает материалы, не подлежащие опубликованию в открытой печати, в соответствии с действующими нормативными актами.

4. Автор обязуется:

4.1. Внести в текст статьи исправления, предложенные рецензентами и принятые редколлегией Журнала.

4.2. Читать корректуру статьи в сроки, предусмотренные графиком выхода Журнала.

4.3. Не публиковать статью в объеме более 50 % в других печатных и (или) электронных изданиях до выхода в свет Журнала со статьей Автора, являющейся предметом настоящего договора.

4.4. Представить оригинал Статьи в электронном виде с распечаткой на бумаге, а в случае отсутствия таких возможностей – в форме, согласованной с редакцией Журнала.

4.5. Вносить в корректуру Статьи только тот минимум правки, который связан с необходимостью исправления допущенных в оригинале Статьи ошибок и (или) внесения фактографических изменений.

4.6. Не использовать в коммерческих целях и в других изданиях без согласия Издателя электронный оригинал-макет Статьи, подготовленный Издателем, в случае его передачи Автору.

5. Издатель обязуется:

5.1. За свой счет обеспечить рецензирование Статьи, научное, литературное и художественно-техническое редактирование, изготовление и (или) обработку иллюстративного материала, изготовление бумажного и электронного оригинала-макета, полиграфическое воспроизведение Журнала со статьей Автора и его распространение в соответствии с условиями настоящего договора, а также проведение подписной кампании и сбору заявок на тираж Журнала, включая рекламные мероприятия.

5.2. Согласовать с Автором вносимую в Статью правку с учетом условий пп. 3.4 и 4.1 настоящего договора.

5.3. Предоставить Автору корректуру верстки Статьи и внести обоснованную правку в нее с учетом условий п. 4.5 настоящего договора.

6. Издатель гарантирует, что без согласия Автора:

6.1. Не будет использовать Статью или ее отдельные части ни в одном из других печатных и (или) электронных изданий.

6.2. Не передаст права на опубликование Статьи, бумажный или электронный оригинал-макет третьей стороне.



7. Издатель имеет право:

7.1. Допечатывать тираж Журнала со Статьей Автора при поступлении дополнительных заявок.

7.2. Настоящий договор вступает в силу с момента решения редколлегии Журнала о принятии Статьи для публикации в Журнала.

Если Статья не принята к публикации, настоящий договор не вступает в силу, и Издатель извещает об этом Автора в течение 45 календарных дней.

Авторы:

 / В.Г. Иванов /  / В.С. Петров /

Дата: 1 февраля 2017 года

МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ НГТУ

Кафедры:

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

Научная деятельность:

выполнение фундаментальных и прикладных исследований в области:

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

Производственная деятельность:

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

Образовательные услуги:

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

Центры, лаборатории:

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

Адрес:

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

Тел./факс: +7 (383) 346-51-92

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

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

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

Тел.: 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.

