

ОБРАБОТКА

ISSN 1994-6309

ОМ МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

№ 1 (74) ЯНВАРЬ–МАРТ 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

The collage features several scientific images and a software interface:

- Top left: Two optical micrographs showing surface textures with scale bars of 20 μm and 20 мкм.
- Bottom left: Two optical micrographs showing surface textures with scale bars of 1 мм and 200 мкм.
- Center: A grid of SEM images with labels: «Идеальные режущие грани» (20 μm), Макроотверстия (100 μm), Микроотверстия (50 μm), Микроскоп вершины (5 μm), Нанослой роста (10-300 nm) (5 μm), Площадка износа (140 μm), Слой выработанного сплава, Налип (100 μm), Стружка (150 μm).
- Right: A software interface window titled «Параметры» with fields for material type (Полимерная, Сталостеклянист), processing parameters (Temperature, Time, etc.), and a small image of a yellow material.
- Bottom right: A 3D schematic of a processing chamber with labels: Разоренные слои сетки, Platelets (L=1-10 μm), Voidites (L=1-100 nm), Сдвинутые, and Voidites (L=1-100 nm).

НОВОСИБИРСК

МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ НГТУ

Кафедры:

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

Научная деятельность:

выполнение фундаментальных и прикладных исследований в области:

- создания новых материалов с уникальными свойствами;
- исследования структурных превращений в металлических материалах;
- технологий производства керамики и керамических композитов;
- исследования процесса образования водорода и нановолокнистого углерода каталитическим разложением углеводородов при давлениях выше атмосферного;
- исследования способов модификации углеродных нанотрубок и нановолокон;
- управления качеством поверхностного слоя деталей машин при интеграции поверхностной термической и механической 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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309

№ 1 (74) ЯНВАРЬ–МАРТ 2017 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

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

Члены совета

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

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

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

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

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

Журнал вошел в список рекомендованных к включению в **Перечень рецензируемых научных изданий**, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в соответствии с требованиями приказа Минобрнауки России от 25 июля 2014 г. № 793, с изменениями, внесенными приказом Минобрнауки России от 03 июня 2015 г. № 560 (по состоянию на 08.02.2017)

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 ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

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

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

Индекс: **70590** («РОСПЕЧАТЬ»)

Адрес редакции:

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

Тел. (383) 346-17-79

Сайт журнала http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov
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

Кудряшов Е.А., Смирнов И.М., Чевычелов С.А., Яцун Е.И. Способ вибрационного сверления отверстий в композитных материалах инструментом из модификаций кубического нитрида бора.....	6
Гилета В.П., Асанов В.Б., Безнедельный А.И. Эксплуатационные свойства деталей транспортных средств после эпиламинирования.....	13
Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Сидоренко С.А. Повышение эффективности процесса подготовки производства изделий из композитов.....	20

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Дефекты в алмазах – основа адгезии при шлифовании.....	30
--	----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Гилев В.Г., Морозов Е.А., Пуртов И.Б. Лазерное поверхностное оплавление чугуна СЧ20 в отбеленном состоянии.....	40
Батаев И.А., Лазуренко Д.В., Голковский М.Г., Лаптев И.С., Чакин И.К., Иванчик И.С. Поверхностное легирование титана алюминием с использованием метода вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей.....	51
Рекомендации по написанию научной статьи	61
Подготовка аннотации	63
Правила для авторов	65

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 21.02.2017. Выход в свет 15.03.2017. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
 Усл. печ.л. 9,0. Уч.-изд. л. 16,74. Изд. № 22. Заказ 343. Тираж 300 экз.

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

BRABOTKA OMETALLOV

ISSN 1994-6309

METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

Journal no.1(74) January–March 2017

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

Editor of the English translation:

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

The magazine is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year

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

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

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

Kudryashov E.A., Smirnov I.M., Chevychelov S.A., Yatsun E.I. Method for vibration drilling holes in composite materials tool modification of cubic boron nitride.....	6
Gileta V.P., Asanov V.B., Beznedelnyy A.I. Performance property of transport parts after epilamization.....	13
Lobanov D.V., Rychkov D.A., Sidorenko S.A. Efficiency upgrading of composite material product production preparation.....	20

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

Popov V.Y., Yanyushkin A.S., Khlystov A.N. Defects in diamonds as the basis adhesion grinding.....	30
---	----

MATERIAL SCIENCE

Gilev V.G., Morozov E.A., Purtov I.B. Laser surface melting of the cast iron SCH20 after chill casting.....	40
Bataev I.A., Lazurenko D.V., Golkovski M.G., Laptev I.S., Chakin I.K., Ivanchik I.S. Surface alloying of titanium with aluminium by non-vacuum electron beam cladding of powder mixtures.....	51
Guidelines for Writing a Scientific Paper	61
Abstract requirements	63
Rules for authors	65

СПОСОБ ВИБРАЦИОННОГО СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ МОДИФИКАЦИЙ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА

*Е.А. КУДРЯШОВ, доктор техн. наук, профессор
И.М. СМИРНОВ, канд. техн. наук, доцент
С.А. ЧЕВЫЧЕЛОВ, канд. техн. наук, доцент
Е.И. ЯЦУН, канд. техн. наук, доцент
(ЮЗГУ, г. Курск)*

Поступила 1 ноября 2016

Рецензирование 1 декабря 2016

Принята к печати 17 января 2017

Кудряшов Е.А. – 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94
Юго-Западный государственный университет,
e-mail: kea@swsu.ru

Высокая эффективность обработки конструктивно сложных деталей достигается разработкой и внедрением специальных технологий, основанных на применении современного инструментального обеспечения и прогрессивной технологической оснастки.

В статье показана актуальность применения композиционных материалов в современном машиностроении, а также проблемы, связанные со сверлением отверстий в таких материалах. Предложены пути повышения производительности обработки и обеспечения качества полученной поверхности с помощью современных инструментальных материалов и специальных приспособлений.

Приведено описание способа вибрационного сверления отверстий в труднообрабатываемых материалах с применением специального приспособления и сверл, оснащенных режущими элементами из модификаций кубического нитрида бора. Показаны преимущества способа обработки и режущего инструмента с пластинами из композита 10 по сравнению с традиционными, применяемыми на производстве.

Ключевые слова: сверление, труднообрабатываемые материалы, конструкция приспособления, вибрационное резание, режущие элементы, модификации кубического нитрида бора, производительность, качество обработки.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-6-12

Введение

В современном машиностроительном производстве все большее применение находят машины и механизмы, в состав которых входят конструктивно сложные детали, изготовленные из композиционных материалов, а также из их различных сочетаний с металлической основой. При этом детали, представляющие собой металлопластиковые пакеты, плохо поддаются обработке резанием традиционными способами [1].

В этой связи для сверления отверстий 8–9 квалитета точности возникает ряд трудностей, а именно: растрескивание матрицы, расслоение и непрорез волокон материала, термическая деструкция матрицы, усложнение процесса удаления стружки разнородных по своим физико-механическим свойствам материалов, которые требуют новых технологических решений и специального оснащения операций формообразования отверстий [2].

Как показывает опыт работы машиностроительных предприятий, высокая эффективность

обработки труднообрабатываемых материалов достигается разработкой и внедрением специальных технологий, основанных на применении современного инструментального обеспечения в совокупности с прогрессивной технологической оснасткой [3].

Целью исследования является повышение производительности обработки и качества получаемой поверхности при сверлении отверстий в композиционных материалах путем использования современных инструментальных материалов и наложения на инструмент осевых колебаний.

Материалы и методы исследования

С учетом рекомендаций, приведенных в [3, 4], результаты исследований позволяют сформулировать общие требования, предъявляемые к материалу и конструкции режущего инструмента:

1) физико-механические свойства инструментального материала:

- предел прочности при растяжении $> 0,3$ ГПа;
- предел прочности при изгибе $> 0,6$ ГПа;
- коэффициент трещиностойкости $> 7,0 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$;
- коэффициент теплопроводности $> 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;
- модуль упругости $750 \dots 800$ ГПа,

2) химические свойства инструментального материала:

- термостойкость на воздухе $1100 \dots 1200$ °С;
- минимальное взаимодействие с элементами обрабатываемого материала и кислородом воздуха.

Многочисленные исследования в области резания труднообрабатываемых материалов отдают предпочтение наиболее эффективным сверхтвердым композитам на основе кубического нитрида бора, способным обеспечить предъявляемые требования, а также достаточную прочность и износостойкость в условиях динамических нагрузок и перепадов температур, причём лучшим инструментальным материалом для решения поставленной задачи служит материал марки композит 10 [5, 6].

В качестве инструментального обеспечения выбран набор сверл диаметром от 10,5 до 20 мм с паяным или механическим креплением режущих вставок из композита 10, предназначенных для сверления отверстий глубиной до трех диаметров.

Способ обработки резанием – вибрационное сверление отверстий, которое позволяет повысить качество обработанной поверхности и стойкость режущего инструмента [7–11]. Для реализации данного способа было спроектировано специальное приспособление для вибрационного сверления, рис. 1.

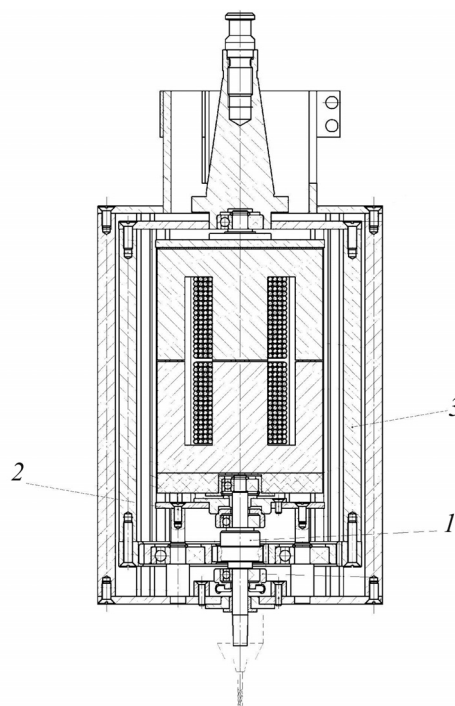


Рис. 1. Схема устройства для высокочастотного вибрационного сверления композиционных материалов

Приспособление предназначено для металлорежущих станков, относящихся к сверлильно-расточной группе. В этом случае инструменту или заготовке сообщаются возвратно-поступательные колебания определенной амплитуды и частоты [12–16]. Технические характеристики созданного приспособления обеспечивают реализацию широкого диапазона подачи инструмента, требуемые частоты вращения шпинделя, скорость резания, а также необходимую амплитуду и высокочастотные осевые колебания инструмента.

Частоты, на которых работает приспособление, варьируются от 20 до 500 Гц. Верхний частотный предел ограничен весом механизма. Сила подачи меняется методом широтно-импульсного регулирования. Электронная часть приспособления представляет собой задающий генератор, который способен вызывать сигналы с регулируемой частотой указанного диапазона,

меня скважность импульсов, что дает возможность изменять амплитуду импульсной подачи.

Для преобразования электрических колебаний в механические принята схема из двух катушек индуктивности (рис. 1, поз. 3), расположенных друг над другом, рис. 2. На верхнюю неподвижно закрепленную катушку индуктивности подается постоянный ток, а на нижнюю катушку, имеющую возможность осевого перемещения и установленную соосно с верхней катушкой, подается переменный ток. При создании на катушках одноименного магнитного поля происходит их отталкивание друг от друга. В итоге нижняя катушка перемещается возвратно-поступательно, передавая аналогичное движение инструменту, который крепится в трехкулачковом сверлильном патроне на шпиндельном валу (рис. 1, поз. 1).

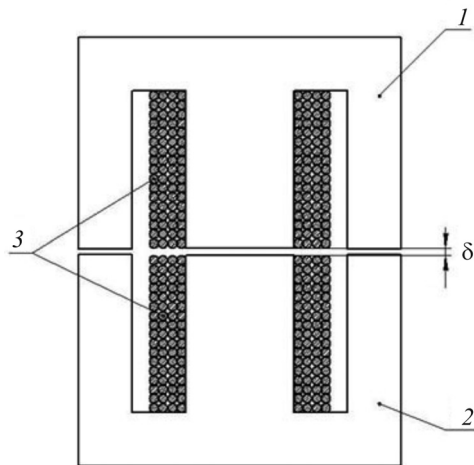


Рис. 2. Электродинамический Ш-образный вибропривод:

1 – верхняя катушка; 2 – нижняя катушка; 3 – обмотка катушек

Катушку вдоль оси перемещает магнитодвижущая сила, а возвращают в исходное состояние упругие элементы (поз. 2), предусмотренные в механизме, рис. 1.

Ударный механизм представляет подвижную Ш-образную металлическую деталь (магнитопровод) с намотанным внутри медным проводником. Подвижный магнитопровод жестко связан с патроном, который приводится в движение с помощью планетарной передачи. Учитывая вес патрона, катушки с магнитопроводом и трение ведомой шестеренки о шестеренку планетарной передачи, можно вычислить необходимое ускорение, которое приобретет сверло при действии магнитного поля $3 \dots 4 \text{ Тл/см}^2$.

Не производя расчетов, можно сказать, что на каждый ватт/с потребленной электроэнергии будет использовано $0,35 \dots 0,40 \text{ Н/с}$ механической мощности, т. е. если время импульса составит 10 мс, сила удара на сверло окажется $3,5 \dots 4,0 \text{ кг/мс}$.

Результаты и обсуждение

Создаваемая вибрация снижает сопротивление материала деформированию, исключает образование нароста на режущем инструменте и облегчает перемещение стружки в канале отверстия, решая проблему отвода стружки и тепла из зоны резания [17–18]. При возникновении адгезии вибрация приводит к разрыву контакта, тем самым облегчает возможность возврата сверла к оси вращения и снижению крутящего момента, что существенно снижает нагрузку на его режущую часть. Это обстоятельство особенно важно для сохранения работоспособности инструментального материала композит 10, учитывая его высокую хрупкость и обеспечение необходимых качественных характеристик обработанной поверхности [19–20].

Приспособление нашло применение для изготовления группы симметричных отверстий $\text{Ø}12\text{H}8$ (рис. 3, поз. 1) в торце гаммы деталей Матрица (размером $240 \times 120 \times 30 \text{ мм}$ и выше), изготовленных из стали 45 (чугуна СЧ20) в комбинации с полиамидом ПАБ-211/15, заполнившим 30 отверстий $\text{Ø}5 \text{ мм}$ ($\text{Ø}3 \text{ мм}$) (рис. 3, поз. 2 и 3) и перпендикулярно пересекающим путь резания в каждом основном симметричном отверстии $\text{Ø}12\text{H}8$, по три отверстия на каждом, рис. 3.

Повышения производительности процесса сверления можно добиться заменой твердосплавной вставки сверла (Т15К6/ВК8) для обработки группы симметричных отверстий $\text{Ø}12\text{H}8$ на специальный инструмент, оснащенный инструментальным материалом композит 10, способным проводить сверление (рассверливание) отверстий металлопластикового пакета с высокими режимами резания и качеством.

Выводы

По результатам проведенного комплекса можно заключить следующее:

– применение инструментального материала композит 10 при обработке композиционных



Изготавливаемая деталь	Матрица										
Материал обрабатываемой заготовки	сталь 45(СЧ20)										
	полиамид ПА6-211/15										
Оборудование	Станок радиально-сверлильный, приспособление для вибрационного сверления										
№ п/п	Содержание перехода (операции)	Вид режущего инструмента	Режимы резания						СОЖ	t _{осв} , мин	T, (шт.заг.)
			n, об/мин	V _c , м/с	S _c , мм/об	t _c , мм	i	L, мм			
1	Сверление, рассверливание	Сверло специальное, оснащенное инструментальным материалом композит 10	2000	2,5	0,05	2,0	1	45	-	0,8	150
Элементы старой технологии			Технико-экономическая эффективность внедрения								
Сверло спиральное (Т15К6/ВК8)			За счёт применения нового способа обработки, интенсификации режимов резания и повышения стойкости инструмента производительность выросла в 7 раз, ликвидирован брак								

Рис. 3. Информационная карта процесса механической обработки

материалов позволяет существенно повысить производительность процесса сверления отверстий до семи раз за счет интенсификации режимов резания;

– использование высокочастотных осевых колебаний при данном виде обработки дает возможность обеспечить качество обработанной поверхности и повысить стойкость инструмента за счет снижения адгезионного износа.

Список литературы

1. Смирнов И.М. Повышение эффективности процессов механической обработки конструктивно сложных деталей машин. – М.: Триумф, 2012. – 224 с. – ISBN 978-5-89392-576-0.
2. Технологическое оснащение процессов изготовления конструктивно сложных деталей / Е.А. Кудряшов, С.Г. Емельянов, Е.И. Яцун, Е.В. Павлов. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 268 с. – ISBN: 978-5-94178-375-5.
3. Смирнов И.М. Инструментальное обеспечение процессов механической обработки конструктивно сложных деталей машин. – М.: Триумф, 2014. – 128 с. – ISBN 978-5-89392-607-1.
4. Кудряшов Е.А. Обработка деталей инструментом из композитов в осложненных технологических условиях. Т. 1. – Чита: Изд-во ЧитГУ, 2002. – 257 с.
5. Технологические преимущества инструментального материала композит при обработке конструктивно сложных поверхностей деталей / Е.А. Кудряшов, А.Ю. Алтухов, Д.Ю. Лунин, Е.Н. Фомичев // Известия ВолгГТУ. – 2010. – Т. 6, № 12 (72). – С. 15–20.
6. Кудряшов Е.А., Смирнов И.М. К вопросу выбора рациональной марки и инструментального ма-

териала // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2 (22). – С. 118–125.

7. Анализ эффективности процесса вибрационного формообразования отверстий / А.В. Масленников, С.А. Чевычелов, Д.И. Гвоздев, М.С. Мерзжоева, М.Ш. Гатиев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии. – 2012. – № 2, ч. 3. – С. 47–52.

8. Кумабэ Д. Вибрационное резание: пер. с яп. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

9. Ломаев В.Н., Дударев А.С. Перспективы механической обработки отверстий при производстве изделий из волокнистых композиционных материалов гражданской авиатехники // Технология машиностроения. – 2006. – № 7. – С. 18–22.

10. Подураев В.Н., Валиков В.И. Физические особенности процесса вибрационного сверления // Резание труднообрабатываемых материалов: материалы семинара / Московский дом научно-технической пропаганды. – М., 1969. – С. 95–101.

11. Influence of axial harmonic oscillations on chip formation when drilling holes in ductile metals / A.V. Maslennikov, S.A. Chevychelov, M.S. Merzhoeva, M.S. Gatiev, V.V. Sidorova // Russian Engineering Research. – 2014. – Vol. 34, N 11. – P. 722–724. – doi: 10.3103/S1068798X14110136.

12. Maslennikov A.V., Chevychelov S.A., Golubev I.G. Rear angle of a helical bit in hole shaping with axial vibration // Russian Engineering Research. – 2013. – Vol. 33, N 5. – P. 295–298. – doi: 10.3103/S1068798X13050092.

13. Использование вибрационного резания для управления стружкообразованием / А.В. Масленников, С.А. Чевычелов, Д.И. Гвоздев, В.В. Сидорова,

М.Ш. Гатиев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии. – 2012. – № 2, ч. 1. – С. 117–120.

14. Сидорова В.В., Разумов М.С. Устройство для вибрационного сверления // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 4 (306). – С. 51–54.

15. Razumov M.S., Sidorova V.V., Grechukhin A.N. Automated control of process conditions during drilling with imposition of vibrations // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – Vol. 6, no. 5. – P. 19–23.

16. Патент на полезную модель 147317 Российская Федерация, В 23 В 35/00. Устройство для вибрационного сверления / В.В. Сидорова, М.С. Разумов, П.А. Понкратов. – № 2014120738/02; заявл. 22.05.2014; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 31.

17. Выявление эмпирических зависимостей конструктивных параметров устройства для наложения вибраций на осевое усилие при сверлении отверстий малого диаметра / С.Г. Емельянов, М.С. Разумов,

А.Н. Гречухин, В.В. Сидорова // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10-3. – С. 484–488.

18. Емельянов С.Г., Сидорова В.В., Разумов М.С. Разработка конструктивных параметров устройства для наложения вибраций на осевое усилие при сверлении отверстий малого диаметра с использованием неодимовых магнитов // Национальная ассоциация ученых. – 2015. – № 9-1 (14). – С. 149–151.

19. Сидорова В.В., Разумов М.С., Гречухин А.Н. Определение зависимости силы постоянных магнитов от расстояния при вибрационном резании // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: V-я Международная научно-практическая конференция: сборник научных трудов. – Курск, 2015. – С. 284–287.

20. Сидорова В.В., Разумов М.С., Гречухин А.Н. Расчет силовых параметров вибрационного резания // Будущее машиностроения России: сборник трудов Седьмой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов / МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2014. – С. 10–11.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (74), January – March 2017, Pages 6–12

Method for vibration drilling holes in composite materials tool modification of cubic boron nitride

Kudryashov E.A., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kea@swsu.ru

Smirnov I.M., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kea-swsu@list.ru

Chevychelov S.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: tschsa@yandex.ru

Yatsun E.I., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: el.yatsun@gmail.com

Southwest State University, 94, 50 let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Russian Federation

Abstract

High performance of highly engineered product processing is reached by development and adoption of special technologies based on the application of modern instrumental support and progressive tooling.

The paper shows the composite materials relevance in modern engineering and also considers the problems associated with holes drilling in these materials. It proposes the ways of the increase of process efficiency and quality improvement of the finished surface when drilling the composite materials by using of the modern tool materials coupled with the instrument axial vibration.

The article defines the description of the holes' vibrational cut in higher-melting-point materials using especial device and drill equipped with cutting elements made of cubic boron nitride. The advantages of the processing method and cutting tool with composite plates over traditional tools using in the enterprises are shown.

The using the cubic boron nitride plates as a cutting part of drills allows to increase the processing performance more than 7 times due to intensification of cutting modes.

The created design of device for drilling machines, allows to apply axial vibration on a drill in the range 20-500 Hz. The specifications of created device support the implementation of a wide range of tool feed required spindle speed, cutting speed and required amplitude high-frequency axial tool vibrations. The circuit of two stacked inductors is accepted for converting electrical into mechanical vibrations. A direct current is supplied to fixed top inductor, and alternating current is supplied low inductor, fixed coaxially with the upper inductor, and having axial movement.

The using of this device allows providing the quality of finished surface and increasing durability of cutting tool with composite plates due to adhesive wear decrease.

Keywords

drilling, tough materials, fixture design, cutting vibration, cutting elements, modification of cubic boron nitride, performance, quality

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-6-12

References

1. Smirnov I.M. *Povyshenie effektivnosti protsessov mekhanicheskoi obrabotki konstruktivno slozhnykh detalei mashin* [The increase the efficiency of the machining processes highly engineered machine parts]. Moscow, Triumph Publ., 2012. 224 p. ISBN 978-5-89392-576-0.
2. Kudryashov E.A., Emel'yanov S.G., Yatsun E.I., Pavlov E.V. *Tekhnologicheskoe osnashchenie protsessov izgotovleniya konstruktivno slozhnykh detalei* [The machining attachments of fabrication processes structurally complex parts]. Staryi Oskol, TNT Publ., 2013. 268 p. ISBN 978-5-94178-375-5.
3. Smirnov I.M. *Instrumental'noe obespechenie protsessov mekhanicheskoi obrabotki konstruktivno slozhnykh detalei mashin* [The tool support of machining structurally complex machine parts]. Moscow, Triumph Publ., 2014. 128 p. ISBN 978-5-89392-607-1.
4. Kudryashov E.A. *Obrabotka detalei instrumentom iz kompozitov v oslozhnennykh tekhnologicheskikh usloviyakh*. T. 1 [The processing parts of composite materials in complicated technological conditions. Vol. 1]. Chita, ChitGU Publ., 2002. 257 p.
5. Kudryashov E.A., Altukhov A.Yu., Lunin D.Yu., Fomichev E.N. *Tekhnologicheskie preimushchestva instrumental'nogo materiala kompozit pri obrabotke konstruktivno slozhnykh poverkhnostei detalei* [Technological advantages of the tool material composite when machining structurally complex surfaces of parts]. *Izvestiya VolgGTU – Izvestia VSTU*, 2010, vol. 6, no. 12 (72), pp. 15–20.
6. Kudryashov E.A., Smirnov I.M. *K voprosu vybora ratsional'noi marki i instrumental'nogo materiala* [Choosing rational brand of the tool material]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 2 (22), pp. 118–125.
7. Maslennikov A.V., Chevychelov S.A., Gvozdev D.I., Merzhoeva M.S., Gatiev M.Sh. *Analiz effektivnosti protsessa vibratsionnogo formoobrazovaniya otverstii* [Analysis of efficiency of process vibration forming holes]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tekhnika i tekhnologii – Proceedings of the South-West State University. Technics and Technologies*, 2012, no. 2, pt. 3, pp. 47–52.
8. Kumabe J. *Vibration Cutting*. Tokyo, Jikkyou Publ., 1979 (In Japanese) (Russ. ed.: Kumabe D. *Vibratsionnoe rezanie*. Translated from Japanese. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 424 p.).
9. Lomaev V.N., Dudarev A.S. *Perspektivy mekhanicheskoi obrabotki otverstii pri proizvodstve izdelii iz voloknistykh kompozitsionnykh materialov grazhdanskoi aviatsionnoi tekhniki* [Prospects for machining of holes in the manufacturing of fibrous composite materials of civil aircraft]. *Tekhnologiya Mashinostroeniya – Technology of Mechanical Engineering*, 2006, no. 7. pp. 18–20.
10. Poduraev V.N., Valikov V.I. [Physical characteristics of the vibration drilling process]. *Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov: materialy seminara. Moskovskii dom nauchno-tekhnicheskoi propagandy* [Proceedings of the Moscow House of Scientific and Technical Information “Cutting hard materials”]. Moscow, 1969, pp. 95–101. (In Russian)
11. Maslennikov A.V., Chevychelov S.A., Merzhoeva M.S., Gatiev M.S., Sidorova V.V. *Influence of axial harmonic oscillations on chip formation when drilling holes in ductile metals*. *Russian Engineering Research*, 2014, vol. 34, no. 11, pp. 722–724. doi: 10.3103/S1068798X14110136
12. Maslennikov A.V., Chevychelov S.A., Golubev I.G. *Rear angle of a helical bit in hole shaping with axial vibration*. *Russian Engineering Research*, 2013, vol. 33, no. 5, pp. 295–298. doi: 10.3103/S1068798X13050092
13. Maslennikov A.V., Chevychelov S.A., Gvozdev D.I., Sidorova V.V., Gatiev M.Sh. *Ispol'zovanie vibratsionnogo rezaniya dlya upravleniya struzhkoobrazovaniem* [Use of vibration cutting for control chip formation]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tekhnika i tekhnologii – Proceedings of the South-West State University. Technics and Technologies*, 2012, no. 2, pt. 1, pp. 117–120.
14. Sidorova V.V., Razumov M.S. *Ustroistvo dlya vibratsionnogo sverleniya* [Device for vibration drilling]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii – Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2014, no. 4 (306), pp. 51–54.

15. Razumov M.S., Sidorova V.V., Grechukhin A.N. Automated control of process conditions during drilling with imposition of vibrations. *Metallurgical and Mining Industry*, 2014, vol. 6, no. 5, pp. 19–23.

16. Sidorova V.V., Razumov M.S., Ponkratov P.A. *Ustroistvo dlya vibratsionnogo sverleniya* [Device for vibration drilling]. Patent RF, no. 147317, 2014.

17. Emel'yanov S.G., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Sidorova V.V. Vyyavlenie empiricheskikh zavisimosti konstruktivnykh parametrov ustroystva dlya nalozheniya vibratsii na osevoe usilie pri sverlenii otverstii malogo diametra [Identification empirical dependence design parameters devices for applying vibration to the axial forces when drilling pinhole]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental research*, 2015, no. 10-3, pp. 484–488.

18. Emel'yanov S.G., Sidorova V.V., Razumov M.S. Razrabotka konstruktivnykh parametrov ustroystva dlya nalozheniya vibratsii na osevoe usilie pri sverlenii otverstii malogo diametra s ispol'zovaniem neodimovykh magnetov [The development of the constructive parameters of the device for overlaying vibrations on axial force during drilling of small holes using neodymium magnets]. *Natsional'naya assotsiatsiya uchenykh – National Association of Scientists*, 2015, no. 9-1 (14), pp. 149–151.

19. Sidorova V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N. [A determination of strength permanent magnets from a distance when cutting vibration]. *Innovatsii, kachestvo i servis v tekhnike i tekhnologiyakh: V-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: sbornik nauchnykh trudov* [Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference “Innovations, quality and service in the equipment and technologies”]. Kursk, 2015, pp. 284–287. (In Russian)

20. Sidorova V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N. [A calculation of power parameters of the vibration cutting]. *Budushchee mashinostroeniya Rossii: sbornik trudov Sed'moi Vserossiiskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov* [Proceedings of the 7th All-Russian conference “Future of Mechanical Engineering of Russia”]. Moscow, 2014, pp. 10–11. (In Russian)

Article history

Received 1 November 2016

Revised 1 December 2016

Accepted 17 January 2017

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПОСЛЕ ЭПИЛАМИРОВАНИЯ

В.П. ГИЛЕТА, канд. техн. наук, доцент
В.Б. АСАНОВ, канд. техн. наук, доцент
А.И. БЕЗНЕДЕЛЬНЫЙ, канд. техн. наук, доцент
(НГТУ, г. Новосибирск)

Поступила 18 ноября 2016
Рецензирование 23 декабря 2016
Принята к печати 17 января 2017

Гилета В.П. – 630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: v.gileta@corp.nstu.ru

Рассмотрено влияние пленок, получаемых эпиламинированием, на эксплуатационные свойства деталей топливного насоса. Износостойкость и контактная жесткость сравниваются у поверхностей, подвергнутых шлифованию и шлифованию+эпиламинирование в смазочной композиции 6СФК-180-05. Изнашивание образцов из стали 45 в сыром и термообработанном состоянии производилось на машине трения 2070 СМТ-1 по схеме «диск–колодка». Результаты свидетельствуют, что поверхность, прошедшая комбинированную обработку (шлифование+эпиламинирование), имеет более высокую износостойкость по сравнению со шлифованной как на этапе приработки, так и при установившемся износе.

Испытания на контактную жесткость деталей топливного насоса ДВС (диска упора и тарелки регулятора), произведенные на специальной установке, имитирующей работу регулятора, показали, что эпиламинирование приводит к уменьшению ширины и глубины канавки смятия по сравнению с этими же параметрами, полученными на шлифованной поверхности. Уменьшение этих показателей говорит об увеличении контактной жесткости поверхностей с нанесенными пленками эпилам.

Для выяснения причин влияния эпиламинирования на изучаемые эксплуатационные свойства дополнительно были исследованы микрогеометрические и физико-механические характеристики поверхностного слоя, в частности, шероховатость (Ra) и микротвердость (Hц) до и после эпиламинирования, а также маслоудерживающие свойства этих поверхностей. Эпиламинирование не изменяет шероховатость и микротвердость, но увеличивает маслоудерживание поверхности. С учетом неизменности микрогеометрических и физико-механических характеристик поверхности после эпиламинирования в работе сделано предположение, что повышение износостойкости и контактной жесткости обусловлено улучшением маслоудерживающих свойств поверхности с нанесенными пленками.

Ключевые слова: эпиламинирование, эпилам, детали транспортных средств, шероховатость поверхности, микротвердость, эксплуатационные свойства, износостойкость, контактная жесткость, маслоудерживающие свойства.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-13-19

Введение

Технология эпиламинирования находит широкое применение в различных областях (промышленность, медицина и др.) для повышения гидрофобных, антикоррозионных, антифрикционных и других свойств, причем для разнообраз-

ных материалов (металлов и их сплавов, пластмасс, резиновых изделий, камней и деталей с драгоценными покрытиями, элементов микроэлектроники) [1–7]. Известно использование эпиламинирования для увеличения стойкости режущих инструментов, эффективности работ узлов различных машин и механизмов, работающих в условиях

трения и циклического нагружения при разных температурных режимах [8–15]. Эпиламирование – процесс нанесения сверхтонких полимерных покрытий фторсодержащими поверхностно-активными веществами (ПАВ), обеспечивающий получение пленки толщиной 40...100 Å [16–17].

На основе фторПАВ созданы многофункциональные антифрикционные и защитные композиции (эпиламы), имеющие различные торговые марки.

Процесс эпиламирования легко реализуем и не требует существенных материальных и энергетических затрат [13–14], поэтому представляет большой интерес изучение влияния наноразмерных пленок эпилам на работоспособность деталей машин.

Цель настоящих исследований – определение перспективности применения технологии эпиламирования для деталей транспортных средств с точки зрения повышения их эксплуатационных свойств.

Материалы и методы исследований

Исследования проводились на образцах и реальных деталях регулятора топливного насоса (диск упора, тарелка регулятора).

Материалом образцов для испытаний на износостойкость служила сталь 45, которая широко применяется для деталей двигателя и трансмиссии автотранспортных средств, например: кулачковых валов насосов высокого давления, распределительных и коленчатых валов и других, отдельные поверхности которых закаливаются. Образцы цилиндрической формы изготавливались в двух вариантах: с твердостью HB 170...185 в состоянии поставки и с твердостью HRCэ 53...55, полученной закалкой ТВЧ. Окончательная микрогеометрия поверхности образцов формировалась шлифованием с Ra 0,76...0,80 мкм.

Тарелки регулятора и диски упора выполнялись из стали 20Х по заводской технологии, включающей в себя цементацию и закалку до твердости HRCэ ≥ 57 с последующим шлифованием до Ra 0,63 мкм.

Испытание на износ проводилось на образцах в условиях трения скольжения с наличием смазки (индустриальное 20) на машине трения 2070 СМТ-1 по схеме «диск–колодка». В каче-

стве материала контртела (колодка) использовался чугун марки СЧ-30. Нагрузка на образец со стороны контртела составляла 200 Н.

Износ образцов оценивался по потере веса с помощью аналитических весов ВСЛ-60/0,1А с дискретностью 0,1 мг. Базовое число оборотов на одно взвешивание – 20 000.

Долговечность и функциональные свойства регулятора существенно зависят от контактной жесткости рабочих поверхностей диска упора и тарелки. Оценка контактной жесткости производилась на основе лабораторных испытаний с использованием специального устройства (рис. 1), воспроизводящего условия работы регулятора, близкие к реальным.

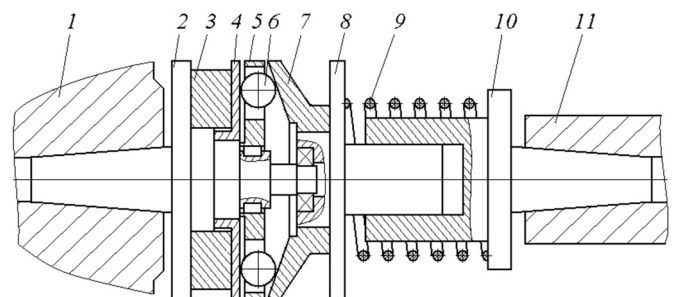


Рис. 1. Устройство для испытания на контактную выносливость диска упора и тарелки регулятора:

1 – шпиндель станка; 2 – оправка для диска упора; 3 – предохранительное кольцо; 4 – диск упора; 5 – сепаратор; 6 – тела качения (шары); 7 – тарелка регулятора; 8 – оправка для тарелки регулятора; 9 – пружина; 10 – держатель; 11 – пиноль задней бабки

Конструктивно устройство представляет собой совокупность двух блоков, устанавливаемых в шпиндель и пиноль задней бабки токарного станка. Первый блок (устанавливаемый в шпиндель) представляет собой набор элементов, посредством которых осуществляется передача крутящего момента от станка через сепаратор к телам качения. Этот блок служит для установки диска упора 4 на оправку 2. Предохранительным кольцом проворачивают диск упора при схватывании между испытуемыми деталями и телами качения. Второй блок предназначен для создания силового замыкания в исследуемой системе диск упора – шар – тарелка регулятора. Требуемая нагрузка, характерная для работы топливного регулятора, создавалась пружиной сжатия 9. Точность взаимного расположения испытуемых деталей выполнялась коническими соединениями с конусами Морзе. Подача масла в области

контакта тел производилась через штуцер под давлением 0,05 МПа.

Контактная жесткость оценивалась по ширине канавки смятия и ее глубине, которая является косвенной характеристикой сближения контактирующих тел.

Микрогеометрические характеристики испытуемых поверхностей и характеристики канавки смятия определялись с помощью профилографа-профилометра модели 252, а твердость и микротвердость измерялась на твердомере HR-150А и микротвердомере ПМТ-3.

Эпиламирование образцов и деталей производилось в смазочной композиции 6СФК-180-05 с соблюдением следующей последовательности:

- промывка в ванне с моющим составом: тринитрифосфат – 150 г, каустическая сода – 15 г, дистиллированная вода – 1 л, время промывки 15...20 мин;
- полоскание в дистиллированной воде в течение 10...15 мин;
- обезжиривание в спирте;
- погружение в смазочную композицию на 8...10 мин;
- сушка на воздухе при температуре 18...20 °С;
- термофиксация при температуре 120 °С в термошкафе в течение полутора часов.

Свойство поверхности удерживать смазку после шлифования и шлифования+эпиламирование оценивалось по массе масла, оставшегося на поверхности образцов после его погружения на одну минуту в смазочную среду и выдерживания на воздухе в течение 30 минут. Взвешивание образцов осуществлялось на аналитических весах ВСЛ-60/0,1А.

Влияние постоянных систематических погрешностей исключалось настройкой и калибровкой испытательного оборудования и средств измерений, а неисключенные систематические и случайные погрешности оценивались статистически повторением числа опытов и единичных наблюдений. В частности, для определения износостойкости и контактной жесткости были проведены опыты с пятью повторениями.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования износостойкости сырых образцов в условиях трения скольжения, представленные

графическими (рис. 2), свидетельствуют о том, что поверхности, прошедшие комбинированную обработку (шлифование+эпиламирование), имеют более высокие эксплуатационные свойства по сравнению со шлифованными как на этапе приработки, так и при установившемся износе. Образцы, изготовленные по технологии закалка ТВЧ + шлифование + эпиламирование, также продемонстрировали большую износостойкость по сравнению с закаленными и шлифованными, но при этом интегральный износ оказался меньшим, чем у сырых.



Рис. 2. Износ образцов после различных видов обработок:

1 – шлифование; 2 – шлифование + эпиламирование

Результаты испытаний на контактную жесткость представлены на рис. 3 и 4 зависимостями параметров остаточного следа шаров (ширины и глубины канавки смятия) от продолжительности работы регулятора.

Как видно из графиков, эпиламирование приводит к уменьшению ширины и глубины канавки смятия по сравнению с этими же параметрами канавки, полученной на шлифованной поверхности. Качественно такие же зависимости были



Рис. 3. Зависимость ширины канавки смятия на диске упора от времени испытаний:

1 – шлифование; 2 – шлифование + эпиламирование

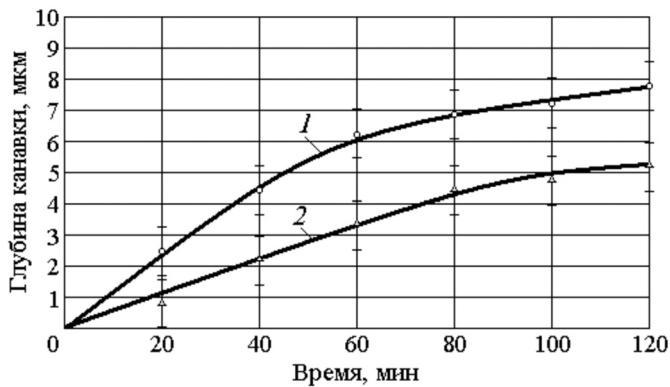


Рис. 4. Зависимость глубины канавки на диске упора от времени испытаний:

1 – шлифование; 2 – шлифование + эпиламирование

получены и для ответной детали – тарелки регулятора.

Для выяснения причин влияния эпиламирования на изучаемые эксплуатационные свойства были исследованы микрогеометрические и физико-механические характеристики поверхностного слоя, в частности, шероховатость (R_a) и микротвердость (H_c) до и после эпиламирования, а также маслоудерживающие свойства этих поверхностей. Результаты этих исследований представлены в таблице.

Характеристики и свойства поверхностей

Параметры	Методы обработки	
	Шлифование	Шлифование + эпиламирование
R_a , мкм	0,30...0,65	0,30...0,65
H_c (сырые)	380...410	380...410
H_c (закаленные)	600...650	600...650
Маслоудержание, %	100	115...122
Износ, %	100	45...60

Анализ таблицы показывает, что эпиламирование не изменяет шероховатость и микротвердость, но увеличивает маслоудерживающие свойства поверхности. Опираясь только физико-механическими и микрогеометрическими характеристиками, невозможно объяснить повышение износостойкости и контактной жесткости деталей после эпиламирования. Существенное различие в маслоудерживающих свойствах позволяет предположить, что этот фактор является определяющим в изменении эксплуатационных свойств, в частности, износостойкости и контактной жесткости. Это предположение не противоречит гипотезе, изложенной в работах [18,

19], которая говорит о том, что свободные концы молекулы эпиламы образуют водородные связи с молекулами масла, которые располагаются вдоль поверхности металла перпендикулярно эпиламам. При этом толщина и прочность пленки масла увеличиваются, улучшается ее удержание и резко снижается испарение масла. Улучшение условий смазывания, как известно [10, 20], снижает трение и контактные напряжения и приводит к повышению износостойкости и контактной жесткости деталей.

Выводы

1. Эпиламы повышают износостойкость и контактную жесткость деталей, работающих в условиях трения скольжения и циклического нагружения. Процессу эпиламирования присущи простота технологии, низкая себестоимость и экологичность. Совокупность всех факторов обуславливает перспективность применения эпиламирования для деталей транспортного машиностроения.

2. Эпиламирование не вызывает изменений микротвердости и шероховатости поверхности, но повышает ее маслоудерживающие свойства. Это позволяет предположить, что данное свойство является определяющим в повышении износостойкости и контактной жесткости.

3. Невыясненные до конца механизмы влияния наноразмерных пленок эпилам на повышение эксплуатационных свойств вызывают необходимость дальнейших исследований этого вопроса.

Список литературы

1. *Semenov A.P.* The role of epilames in tribology // *Journal of Friction and Wear*. – 2010. – Vol. 31, iss. 6. – P. 469–480. – doi: 10.3103/S1068366610060103.
2. Tribological properties of thin coatings based on epilams modified by nanosized silica / A.I. Sviridenok, A.V. Krautsevich, S.I. Mikulich, M.I. Ihnatouski, V.I. Lysenko, S.P. Bardachanov // *Journal of Friction and Wear*. – 2014. – Vol. 35, iss. 3. – P. 161–169. – doi: 10.3103/S1068366614030143.
3. *Мурманский Б.Е.* Повышение надежности работы систем парораспределения турбин в условиях

эксплуатации // Энергосбережение и водоподготовка. – 2015. – № 1 (93). – С. 10–12.

4. Improving the plasticity of thin cold-rolled steel sheet for cold stamping / I.V. Doshchechkina, S.S. D'yachenko, I.V. Ponomarenko, I.S. Tatarkina // Steel in Translation. – 2016. – Vol. 46, iss. 5. – P. 364–367. – doi: 10.3103/S0967091216050053.

5. *Вохидов А.С., Мальков М.В., Долганов В.Ю.* Методы повышения износостойкости и ресурсосбережение за счет применения эпиламирующих составов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 1. – С. 9–12.

6. Повышение износостойкости направляющих элементов штамповой оснастки методом эпиламирования / А.Я. Мовшович, Е.С. Дерябкина, М.Г. Ищенко, М.Е. Федосеева // Обработка материалов давлением. – 2012. – № 4 (33). – С. 232–236.

7. *Фисенко П.П., Ищенко С.А., Иншаков С.В.* Применение эпиламированных куттерных ножей в мясopерерабатывающей промышленности // Мясная индустрия. – 2012. – № 11. – С. 34–35.

8. *Morozov A.V.* Experimental estimate of tribological characteristics of epilam-coated materials that operate in threaded joints under dry friction // Journal of Friction and Wear. – 2014. – Vol. 35, iss. 3. – P. 170–176. – doi: 10.3103/S106836661403009X.

9. Влияние эпиламирования на интенсивность изнашивания куттерных ножей / П.П. Фисенко, С.А. Ищенко, С.В. Иншаков, В.И. Балабанов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. – № 6. – С. 27–29.

10. *Киричек А.В., Звягина Е.А.* Исследование влияния метода эпиламирования на повышение периода стойкости осевого инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 1. – С. 30–36.

11. Эпиламирование поверхности и износостойкость пар трения / А.Т. Саримова, И.В. Буторин, Г.Д. Нурлыева, А.И. Швеев, Л.Н. Шафигуллин, М.И. Гумеров // Автомобильная промышленность. – 2015. – № 2. – С. 36–37.

12. Повышение износостойкости деталей плунжерных пар дизелей методом эпиламирования /

Е.С. Дерябкина, Ю.А. Черная, А.Я. Мовшович, О.В. Бондарь // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сборник научных трудов / Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». – Харьков, 2012. – Вып. 55. – С. 73–78.

13. *Киричек А.В., Селеменев М.Ф.* Нанопленки эпиламов как средство повышения эффективности технологий механической обработки и периода стойкости инструмента // Наноинженерия. – 2012. – № 5. – С. 7–14.

14. Экономическая эффективность от внедрения эпиламирования куттерных ножей / С.А. Ищенко, П.П. Фисенко, С.В. Иншаков, В.И. Балабанов // Мясная индустрия. – 2014. – № 4. – С. 44–45.

15. *Дудан А.В., Гуца А.А.* Методы и средства трибомодифицирования поверхностей трения // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 11. – С. 49–52.

16. Применение эпиламов в производстве авиационной техники на ОАО «КНААПО» / В.М. Бойко, А.И. Пекарш, Р.Ф. Крупский, Р.А. Физулаков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 4 (3). – С. 972–973.

17. *Бойко В.М., Физулаков Р.А.* Возможности применения нанопокровов на основе эпиламов для повышения функционального качества поверхности изделий // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 8. – С. 44–48.

18. *Вохидов А.С., Добровольский Л.О.* Эпиламирование: эффективный метод создания нанопленок // Наноиндустрия. – 2012. – Т. 34, № 4. – С. 32–35.

19. *Morozov A.V.* Experimental determination of static and dynamic coefficients of sliding friction of epilam-coated materials // Journal of Friction and Wear. – 2014. – Vol. 35, iss. 2. – P. 84–88. – doi: 10.3103/S1068366614020093.

20. *Дунаев А.В.* Триботехника процесса граничного смазывания // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2010. – № 2. – С. 26–29.

OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (74), January – March 2017, Pages 13–19

Performance property of transport parts after epilamization

Gileta V.P., Ph.D (Engineering), Associate Professor, e-mail: v.gileta@corp.nstu.ru

Asanov V.B., Ph.D (Engineering), Associate Professor, e-mail: asanov@corp.nstu.ru

Beznedelnyy A.I., Ph.D (Engineering), Associate Professor, e-mail: beznedelnyy@corp.nstu.ru

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

Abstract

The paper studied the influence of films formed by epilamination on the performance properties of the fuel pump parts. Durability and contact stiffness of the surfaces after grinding and grinding+ epilamination in the 6SFK-180-05 lubricant composition are compared. Wear of the steel 45 samples in the raw and heat-treated state are performed on the 2070 SMF-1 friction test machine using a “drive-block” scheme. The results indicate that the surface after combined treatment (grinding+ epilamination) has a higher wear resistance compared with ground, both during running-in stage and at steady-state wear.

Tests on contact stiffness of the ICE fuel pump parts (stop drive and control plates) performed in a special unit, simulating the operation of the regulator, shown that epilamination reduces the width and depth of the crushing grooves in comparison with the same parameters measured on the grinding surface. These parameters reduction is indicative of the contact surfaces with the epilam film coating stiffness increase.

To find out the cause of the epilamination effect on the studied performance properties, further microgeometric and physical and mechanical characteristics of the surface layer, in particular, the surface roughness (Ra) and microhardness (H μ) before and after epilamination and oil-retaining properties of these surfaces are investigated. Epilamination does not alter microhardness and roughness but increases oil-retention of the surface. In view of the immutability of microgeometric and physical and mechanical properties of the surface after epilamination, the increase in the wear resistance and the contact stiffness due to improved oil-retaining properties of the film coating surface are assumed.

Keywords

epilamination, epilam, vehicle parts, surface roughness, microhardness, performance properties, wear resistance, contact stiffness, oil-retaining properties.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-13-19

References

1. Semenov A.P. The role of epilames in tribology. *Journal of Friction and Wear*, 2010, vol. 31, iss. 6, pp. 469–480. doi: 10.3103/S1068366610060103
2. Sviridenok A.I., Krautsevich A.V., Mikulich S.I., Ihnatouski M.I., Lysenko V.I., Bardachanov S.P. Tribological properties of thin coatings based on epilams modified by nanosized silica. *Journal of Friction and Wear*, 2014, vol. 35, iss. 3, pp. 161–169. doi: 10.3103/S1068366614030143
3. Murmanskii B.E. Povyshenie nadezhnosti raboty sistem paroraspredeleniya turbin v usloviyakh ekspluatatsii [Increase of reliability of work of systems of steam distribution of turbines under operating conditions]. *Energosberzhenie i vodopodgotovka – Energy Saving and Water Treatment*, 2015, no. 1 (93), pp. 10–12.
4. Doshchechkina I.V., D'yachenko S.S., Ponomarenko I.V., Tatarkina I.S. Improving the plasticity of thin cold-rolled steel sheet for cold stamping. *Steel in Translation*, 2016, vol. 46, iss. 5, pp. 364–367. doi: 10.3103/S0967091216050053
5. Vokhidov A.S., Malkov M.V., Dolganov V.J. Metody povysheniya iznosostoikosti i resursosberezhenie za schet primeneniya epilamiruyushchikh sostavov [Methods of endurance and resource saving heightening at use epilaminar mixtures]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmax – Friction & Lubrication in Machines and Mechanisms*, 2007, no. 1, pp. 9–12.
6. Movshovich A.Ya., Deryabkina E.S., Ishchenko M.G., Fedoseeva M.E. Povyshenie iznosostoikosti napravlyayushchikh elementov shtampovoi osnastki metodom epilamirovaniya [Increasing of wear resistance of the guide elements of die by the of tooling method epilamirising]. *Obrabotka materialov davleniem – Material Working by Pressure*, 2012, no. 4 (33), pp. 232–236.
7. Fisenko P.P., Ischenko S.A., Inshakov S.V. Primeneniye epilamirovannykh kutternykh nozhei v myasopererabatyvayushchei promyshlennosti [Use of epilamated cutter knives in the meat processing industry]. *Myasnaya industriya – Meat Industry*, 2012, no. 11, pp. 34–35.
8. Morozov A.V. Experimental estimate of tribological characteristics of epilam-coated materials that operate in threaded joints under dry friction. *Journal of Friction and Wear*, 2014, vol. 35, iss. 3, pp. 170–176. doi: 10.3103/S106836661403009X
9. Fisenko P.P., Ishchenko S.A., Inshakov S.V., Balabanov V.I. Vliyanie epilamirovaniya na intensivnost' iznashivaniya kutternykh nozhei [Impact of the epilamination on the wear rate of the cutter knives]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva – Mechanization and Electrification of Agriculture*, 2011, no. 6, pp. 27–29.

10. Kirichek A.V., Zvyagina E.A. Issledovanie vliyaniya metoda epilamirovaniya na povyshenie perioda stoikosti oseвого instrumenta [Research of influence of epilamirovaniye method on increase resistance of axled instrument]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya – Strengthening Technologies and Coatings*, 2007, no. 1, pp. 30–36.

11. Sarimova A.T., Butorin I.V., Nurlyeva G.D., Shveyov A.I., Shafigullin L.N., Gumerov M.I. Epilamirovanie poverkhnosti i iznosostoikost' par treniya [Study of surface wear epilamirovaniya friction pairs]. *Avtomobil'naya promyshlennost' – Automotive Industry*, 2015, no. 2, pp. 36–37.

12. Deryabkina E.S., Chernaya Yu.A., Movshovich A.Ya., Bondar' O.V. [Increasing of wear resisting property of diesel engine pump element parts by using epilamiration method]. *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii: sbornik nauchnykh trudov. Natsional'nyi aerokosmicheskii universitet im. N.E. Zhukovskogo “Khar'kovskii aviatsionnyi institut”* [Proceedings of the National Aerospace University named after NE Zhukovsky “Kharkiv Aviation Institute” “Public information and computer integrated technologies”], 2012, vol. 55, pp. 73–78. (In Russian)

13. Kirichek A.V., Selemenov M.F. Nanoplenki epilamov kak sredstvo povysheniya effektivnosti tekhnologii mekhanicheskoi obrabotki i perioda stoikosti instrumenta [Nanofilms of epilams as a means of improving the efficiency of technology machining and tool life period]. *Nanoinzheneriya – Nano Engineering*, 2012, no. 5, pp. 7–14.

14. Ischenko S.A., Fisenko P.P., Inshakov S.V., Balabanov V.I. Ekonomicheskaya effektivnost' ot vnedreniya epilamirovaniya kutternykh nozhei [Cost effectiveness of implementation of cutter knives epilamization]. *Myasnaya industriya – Meat Industry*, 2014, no. 4, pp. 44–45.

15. Dudan A.V., Hushcha A.A. Metody i sredstva tribomodifitsirovaniya poverkhnostei treniya [Methods and means tribomodifitsirovaniya friction]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki – Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science*, 2015, no. 11, pp. 49–52.

16. Bojko V.M., Pekarsh A.I., Krupskiy R.F., Fizulakov R.A. Primenenie epilamov v proizvodstve aviatsionnoi tekhniki na OAO “KNAAPO” [Application epilams in manufacture of aeronautical engineering JSC KNAAPO]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk – Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 13, no. 4-3, pp. 972–973.

17. Bojko V.M., Fizulakov R.A. Vozmozhnosti primeneniya nanopokrytii na osnove epilamov dlya povysheniya funktsional'nogo kachestva poverkhnosti izdelii [Opportunities of application nanocoverings on the basis of epilams for increase of functional quality of a surface of products]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya – Strengthening Technologies and Coatings*, 2011, no. 8, pp. 44–48.

18. Vokhidov A.S., Dobrovol'skii L.O. Epilamirovanie: effektivnyi metod sozdaniya nanoplenok [Epilamation: an effective method of creating nanofilms]. *Nanoinzheneriya – Nano Engineering*, 2012, vol. 34, no. 4, pp. 32–35.

19. Morozov A.V. Experimental determination of static and dynamic coefficients of sliding friction of epilam-coated materials. *Journal of Friction and Wear*, 2014, vol. 35, iss. 2, pp. 84–88. doi: 10.3103/S1068366614020093

20. Dunayev A.V. Tribotekhnika protsessa granichnogo smazyvaniya [Tribotechnica of moist friction]. *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii – World of Oil Products. The Oil Companies' Bulletin*, 2010, no. 2, pp. 26–29.

Article history

Received 18 November 2016

Revised 23 December 2016

Accepted 17 January 2017

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИТОВ*

*Д.В. ЛОБАНОВ, доктор техн. наук, профессор
Д.А. РЫЧКОВ, канд. техн. наук, доцент
С.А. СИДОРЕНКО, магистрант
(БрГУ, г. Братск)*

Поступила 16 декабря 2016

Рецензирование 17 января 2017

Принята к печати 15 февраля 2017

Лобанов Д.В. – 665709, г. Братск, ул. Макаренко 40,
Братский государственный университет,
e-mail: mf_nauka@brstu.ru

Представлены пути повышения эффективности применения композитов, которыми предлагается заменить общепринятые конструкционные материалы в области машиностроения там, где это возможно; раскрыты этапы разработки программного продукта для подготовки производства изделий из композитов; представлен программный модуль для создания базы данных композитов, описан принцип работы программного продукта; отмечена необходимость в структурировании, систематизации данных о композитах и автоматизации операций поиска, анализа и принятия синтезированного решения по выбору рационального композиционного материала; изображен алгоритм, в основе которого лежит методика многокритериального анализа и выбора рационального объекта; представлен программный продукт для выбора рациональных композиционных материалов по их параметрам (плотность; предел прочности: при растяжении, сжатии, изгибе; модуль упругости; стоимость; теплопроводность и т. д.) в условиях реального производства; отражены перспективы дальнейшей реализации результатов исследований.

Ключевые слова: автоматизация, эффективность, рациональный выбор, программный модуль (продукт, комплекс), подготовка производства, композиционные материалы.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-20-29

Введение

В связи с истощением природных ресурсов и повышением стоимости энергии все более актуальным становится процесс изготовления в промышленном производстве композиционных материалов (стеклопластика, базальтопластика, карбопластика, углепластика и т. д.). Пополнение сырьевой базы производства возможно за счет переработки вторичного сырья и техногенных отходов [1–5].

Общепринятые конструкционные материалы – металлы и их сплавы – на сегодняшний день не в состоянии удовлетворить возросшие требования по прочности, износостойкости, долговечности и многим другим эксплуатационным показателям. Существующие методы повышения свойств металлов и сплавов затратны [6–12], требуют дополнительного оборудования и оснастки [13–18], поэтому актуальна разработка и использование для этих целей композитов. Композиционные материалы, а также конструкции

* Работа выполнена в рамках проекта У.М.Н.И.К.-2015 № 0011203 «Разработка системы автоматизации процесса подготовки производства изделий из композиционных материалов с использованием лезвийного инструмента».

и изделия из них нашли широкое применение в различных областях промышленности (машиностроении, судостроении, авиастроении, военной промышленности и т. д.). Они имеют высокие удельные прочностные и упругие характеристики, стойкость к агрессивным химическим средам, низкие тепло- и электропроводность, хорошие триботехнические характеристики [18–22].

В настоящее время известно множество композитов, все они по-своему индивидуальны и имеют определенные характеристики, что, в свою очередь, ведет к затруднениям, связанным с их рациональным выбором. Требуется разносторонний, комплексный анализ материалов с учетом показателей, наиболее значимых для определенного вида продукции. Это, как правило, трудоемкий и длительный процесс, так как требует обработки большого массива информации. Поэтому для повышения эффективности процесса подготовки производства существует необходимость в структурировании, систематизации данных о композитах и автоматизации операций поиска, анализа, принятия синтезированного решения по выбору рационального композиционного материала [12–27].

Автоматизация процесса подготовки производства позволит избавиться от ручной обработки огромного массива информации о композиционных материалах при выборе рационального варианта решения, тем самым минимизировать затраты времени на выбор и поиск материала и повысить эффективность применимости композитов в современной промышленности.

Методика экспериментального исследования

Многообразие видов композиционных материалов ведет к затруднениям, связанным с принятием обоснованных решений по их рациональному выбору. В связи с этим нами разработана методика многокритериального анализа и выбора [27], сущность которой заключается в выявлении критериев, значимых для производства на момент принятия обоснованного решения, позволяющая проанализировать, оценить и выявить рациональный вариант решения в зависимости от заданной пользователем приоритетности показателей. Обозначим показатели через P_i , а материалы, которым соответствуют

значения показателей, через O_i , составим матрицу смежности:

$$C(a_{nk}) = \begin{pmatrix} & P_1 & P_2 & P_3 & \dots & P_k \\ O_1 & a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1k} \\ O_2 & a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2k} \\ O_3 & a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ O_n & a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nk} \end{pmatrix}.$$

Элементы матрицы принимают количественные прямые или обратные (в зависимости от приоритета большей или меньшей величины) кодированные значения, по которым оцениваются и сравниваются материалы.

Далее по матрице смежности рассчитываем весовой критериальный коэффициент, значение которого и будет определять рациональный материал [28].

Процесс выбора рационального композита требует, прежде всего, занести в базу данных основную информацию о композитах: вид, название и марку композиционного материала, физико-механические свойства, стоимость и специфическую информацию производителя. После заполнения базы данных необходимо указать значимые в заданных условиях показатели, характерные для композиционных материалов и, если имеется необходимость, задать (уточнить) предельные значения параметров, после чего осуществить выбор материала. Для разработки программных продуктов процесса выбора рационального композиционного материала произведена алгоритмизация [29].

Результаты и обсуждения

Процесс выбора рационального композиционного материала из множества по методике многокритериального анализа очень трудоемкий и занимает много времени в связи с огромным объемом обрабатываемых данных. Исходя из этого для автоматизации процесса выбора композита необходимо систематизировать данные о композиционных материалах. Предлагается создать базу знаний, содержащую исходную информацию о композитах, которая хранится в отдельном файле и включает в себя сведения о физико-механических свойствах композитов, их стоимости, производителе, обоснованную тех-

нической или справочной литературой, каталогами или электронными ресурсами. Для этого нами создан программный модуль, хранящий данные о композиционных материалах [30]. Он направлен на работу с базой данных композитов и представляет собой инструмент, дающий

право пользователю в диалоговом режиме вести заполнение, редактирование, правку, удаление, и поиск композиционных материалов. Диалоговое окно программы для работы с базой данных композиционных материалов представлено на рис. 1.

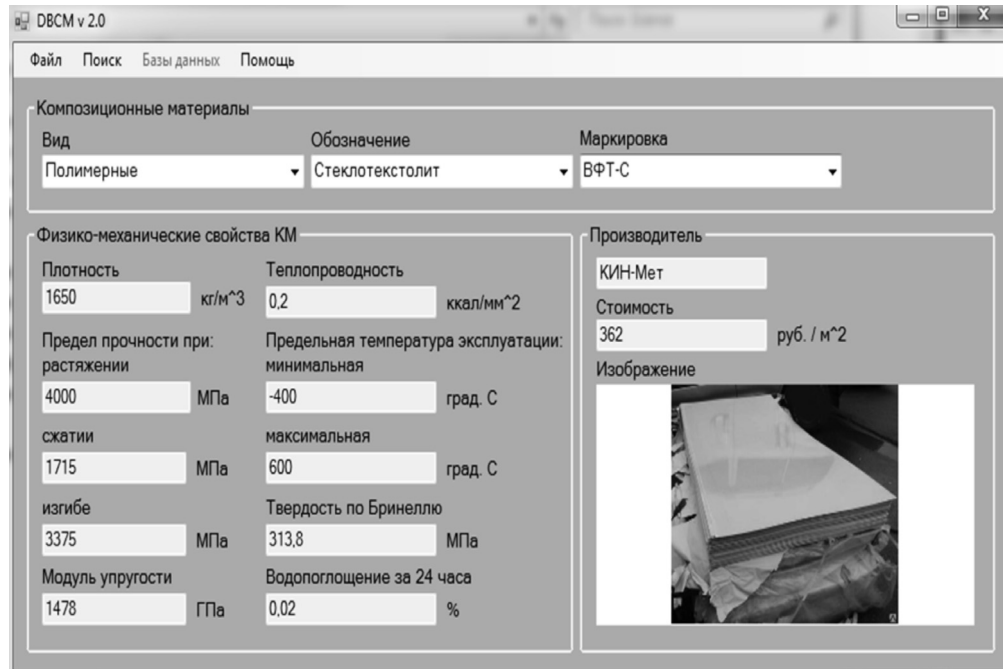


Рис. 1. Диалоговое окно программы для работы с базой данных композитов

Исходная информация в программном модуле отражена в полях редактирования, которые содержат определенный набор данных, соответствующих выбранному из списка композиту.

Основное меню программы позволяет переходить в следующие режимы: добавление новых материалов, выбор рационального материала из созданной базы данных, сохранение текущего состояния введенной информации, создание и просмотр отчетов по всем параметрам, характерным для композитов. Кроме того, в данном модуле предусмотрена возможность в диалоговом режиме вносить, править или удалять исходную информацию о композиционных материалах и их физико-механических свойствах, производителе и стоимости.

Для повышения эффективности процесса принятия синтезированного решения по выбору рационального композиционного материала за счет автоматизации разработан программный модуль, представленный на рис. 2.

Этот модуль предоставляет пользователю возможность выбора композиционных матери-

алов в зависимости от значимости параметров, избранных в качестве приоритетных. Диалоговое окно программы содержит блок по выбору значимых свойств материалов, который предназначен для избрания приоритетных на момент принятия решения свойств композитов (установка/снятие меток напротив названий свойств композитов). В этом блоке модуля содержатся физико-механические и эксплуатационные свойства материалов. В нижней части модуля расположен блок, в котором отражаются результаты анализа и выбора. Следует отметить, что при увеличении количества показателей анализ и выбор полимерного композиционного материала будет более обоснованным. При необходимости в дальнейшем программа может быть дополнена другими свойствами и параметрами, характеризующими композиты [31].

Для выбора рационального композита пользователю предлагается в диалоговом режиме избрать значимые на момент принятия решения параметры путем установки меток напротив приоритетных свойств. После чего, если поль-

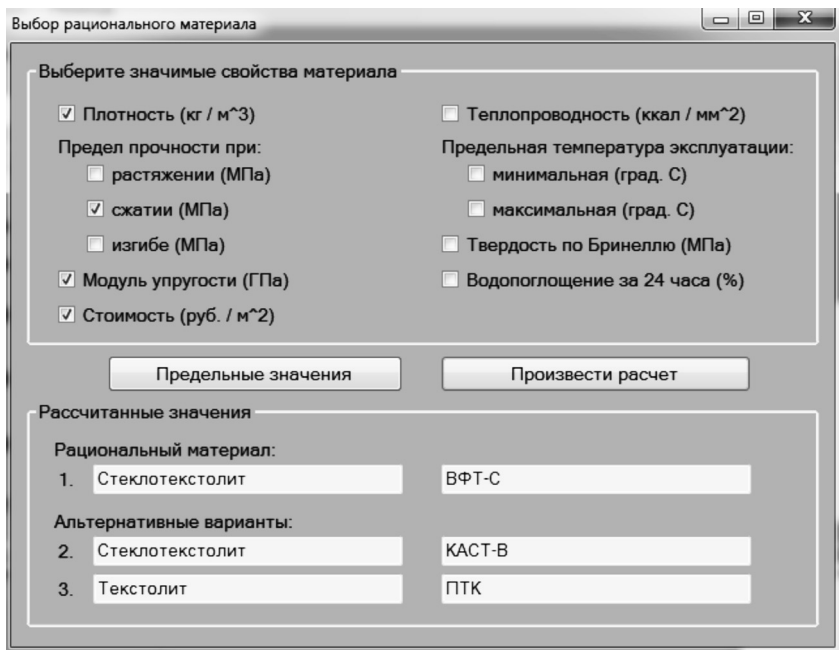


Рис. 2. Диалоговое окно программы для выбора рационального композита

зователю необходимы уточненные предельные значения того или иного показателя, требуется нажать на кнопку «Пределные значения» (рис. 2), и в открывшемся дополнительном диалоговом окне (рис. 3) задать численные ограничения параметров композиционных материалов [32].

Стоит отметить, что для редактирования предельных значений доступны только поля тех

свойств, которые ранее выбраны в качестве приоритетных. После указания ограничений параметров композиционных материалов необходимо нажать на кнопку «Сохранить ограничения», в результате чего система вернется к предыдущему диалоговому окну (рис. 2). Затем следует осуществить выбор рационального композита путем нажатия на кнопку «Произвести расчет» [33].

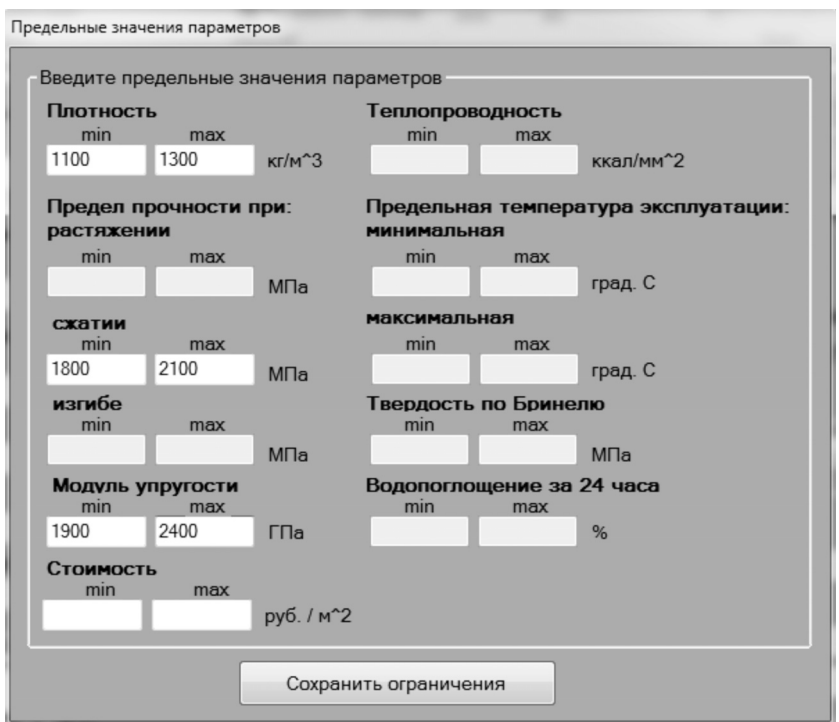


Рис. 3. Диалоговое окно программы для ввода предельных значений параметров композиционных материалов

Если в численных ограничениях свойств нет необходимости, то на этапе выбора значимых параметров следует нажать на кнопку «Произвести расчет», в результате чего система произведет расчет на основе имеющихся данных в базе, а в блоке «рассчитанные значения» отобразятся рациональный материал и два альтернативных [34].

Созданные программные формы ориентированы на автоматизацию процесса подготовки производства изделий из композиционных материалов. Они позволяют в едином программном продукте производить создание базы данных и выбор рационального композита для производственных условий, что автоматизирует технологию и тем самым повышает эффективность процесса подготовки производства.

Выводы

Разработанная методика многокритериального анализа позволила сократить время на выбор рационального композиционного материала, тем самым повысить эффективность процесса подготовки производства изделий из композитов.

Созданный программный модуль для формирования базы данных композиционных материалов позволил упорядочить и систематизировать данные о композиционных материалах. На сегодняшний день база содержит более 100 композитов, из них около 70 полимерных, 10 древесно-полимерных, 15 керамических, около 20 металлических композиционных материалов, а также 10, характеризующих их эксплуатационные параметры. База данных редактируема и может быть дополнена другими композиционными материалами и их свойствами, появившимися в распоряжении пользователей.

Разработанный программный модуль для анализа и выбора рационального композита позволил автоматизировать процесс выбора рационального композиционного материала в зависимости от варьируемых параметров сопоставимости.

Методика, алгоритмы и программные продукты на их основе позволили за счет автоматизации повысить эффективность процесса подготовки производства изделий из композиционных материалов, в 62,5 раза ускорить процесс принятия синтезированного решения по выбору рации-

онального композита и достичь годового экономического эффекта до 7000 руб/г.

Разработанные программные продукты имеют мировой приоритет, что подтверждается свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Список литературы

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учебное пособие / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин, Ю.А. Горбаткина, В.К. Крыжановский, А.М. Куперман, И.Д. Симонов-Емельянов, В.И. Халнулин, В.А. Бунаков; под ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с. – ISBN 978-5-93913-130-8.
2. Composite materials based on wastes of flat glass processing / A.V. Gorokhovskiy, J.I. Escalante-Garcia, G.Yu. Gashnikova, L.P. Nikulina, S.E. Artemenko // Waste Management. – 2005. – Vol. 25, iss. 7. – P. 733–736. – doi: 10.1016/j.wasman.2004.11.007.
3. Chung D.D.L. Composite materials: functional materials for modern technologies. – 2nd ed. – London: Springer-Verlag, 2004. – 293 p. – ISBN 978-1-4471-3734-0. – doi: 10.1007/978-1-4471-3732-0.
4. Марков А.М. Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 7 (37). – С. 3–8.
5. Мордвин М.А., Якимов С.В., Баклушин С.М. Рекомендации по механической обработке композиционных материалов // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2010. – № 2. – С. 26–29.
6. Pascual M.J., Duran A., Pascual L. Sintering behaviour of composite materials borosilicate glass-zrO₂ fibre composite materials // Journal of the European Ceramic Society. – 2002. – Vol. 22, iss. 9–10. – P. 1513–1524. – doi: 10.1016/S0955-2219(01)00479-4.
7. Nano-ag: polymeric composite material for ultrafast photonic crystal all-optical switching / X. Hu, P. Jiang, Ch. Xin, H. Yang, Q. Gong // Applied Physics Letters. – 2009. – Vol. 94, iss. 3. – P. 031103. – doi: 10.1063/1.3073712.
8. Доц М.В., Марков А.М. Автоматизация проектирования токарной обработки композиционных материалов // Инновации в машиностроении: сборник трудов 2-й Международной научно-практической конференции / под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово, 2011. – С. 112–115.
9. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю. Повышение поверхностной микротвердости стали при интеграции поверхностно-термической и финишной механической обработок // Научный вестник НГТУ. – 2006. – № 3 (24). – С. 187–192.

10. Скиба В.Ю. Повышение эффективности технологического процесса обработки деталей машин, при интеграции абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2008. – 257 с.

11. 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.

12. Perspective of high energy heating implementation for steel surface saturation with carbon / N. Plotnikova, A. Losinskaya, V. Skeebea, E. Nikitenko // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 351–354. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.351.

13. Skeebea V., Pushnin V., Kornev D. Quality improvement of wear-resistant coatings in plasma spraying integrated with high-energy heating by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 88–94. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.88.

14. Структура износостойких плазменных покрытий после высокоэнергетического воздействия ТВЧ / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, В.В. Иванцовский, В.Ю. Скиба, Н.В. Плотникова, Д.В. Лобанов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 4 (65). – С. 11–18.

15. 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.

16. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling / V.V. Ivancivsky, V.Y. Skeebea, I.A. Bataev, D.V. Lobanov, N.V. Martyushev, O.V. Sakha, I.V. Khlebova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 156. – P. 012025. – doi: 10.1088/1757-899X/156/1/012025.

17. 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.

18. Acoustic analysis of composite soft materials, II characterization of composite materials containing glass beads / M. Maebayashi, S. Otsuka, T. Matsuoka, S. Koda // Japanese Journal of Applied Physics. – 2003. – Vol. 42, N 5B. – P. 2939–2943.

19. Evaluation of influence of interphase material parameters on effective material properties of three phase composites / S. Kari, H. Berger, U. Gabbert, R. Guinovart-Diaz, J. Bravo-Castillero, R. Rodriguez-Ramos // Composites Science and Technology. – 2008. – Vol. 68, N 3–4. – P. 684–691. – doi: 10.1016/j.compscitech.2007.09.009.

20. Ярославцев В.М. Технологические решения проблем обработки ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов // Вестник МГТУ. Серия «Машиностроение». – 2005. – № S2. – С. 41–62.

21. Рудых О.Л., Меламед Э.Ш. Основы систем автоматизированного проектирования строительных конструкций. Ч. 2. Виды обеспечений САПР (программно-аппаратные средства): учебное пособие. – Хабаровск: ДВГУПС, 1998. – 157 с.

22. Steady-state and transient-state optical properties of a charge-transfer composite material MO-PPV/SWNTs / S. Chu, W. Yi, S. Wang, F. Li, W. Feng, Q. Gong // Chemical Physics Letters. – 2008. – Vol. 451, iss. 1–3. – P. 116–120. – doi: 10.1016/j.cplett.2007.11.087.

23. Nano-porous Si/C composites for anode material of lithium-ion batteries / Y. Zheng, J. Yang, J. Wang, Y. NuLi // Electrochimica Acta. – 2007. – Vol. 52, iss. 19. – P. 5863–5867. – doi: 10.1016/j.electacta.2007.03.013.

24. Sliding wear behavior of copper-graphite composite material for use in maglev transportation system / X.C. Ma, G.Q. He, D.H. He, C.S. Chen, Z.F. Hu // Wear. – 2008. – Vol. 265, iss. 7–8. – P. 1087–1092. – doi: 10.1016/j.wear.2008.02.015.

25. Li J.L., Xiong D.S. Tribological properties of nickel-based self-lubricating composite at elevated temperature and counterface material selection // Wear. – 2008. – Vol. 265, iss. 3–4. – P. 533–539. – doi: 10.1016/j.wear.2007.09.005.

26. Synthesis and electronic behaviors of ce0.5hf0.5o2/carbon clusters composite material / H. Miyazaki, H. Matsui, H. Kitakaze, S. Karuppuchamy, S. Ito, M. Yoshihara // Materials Chemistry and Physics. – 2009. – Vol. 113, iss. 1. – P. 21–25. – doi: 10.1016/j.matchemphys.2008.08.087.

27. Методика выбора композиционных материалов взамен общепринятых конструкционных / Д.В. Лобанов, С.А. Сидоренко, Д.А. Ющенко, А.В. Большешапова // Современные материалы, техника и технология: материалы 4-й Международной научно-практической конференции (25–26 декабря 2014 года). – Курск, 2014. – С. 255–261.

28. Анализ и рациональный выбор полимерных композиционных материалов для изделий по их физико-механическим свойствам / Д.В. Лобанов, С.А. Сидоренко, Д.А. Ющенко, А.В. Большешапо-

ва // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 206–213.

29. Сидоренко С.А., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Программный продукт для автоматизации выбора рационального композиционного материала // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 30–36.

30. Формирование базы данных композиционных материалов (DBCM v. 1.0): свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016611925 / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, С.А. Сидоренко, Д.А. Рычков. – Заявка № 2015662595; заявл. 18.12.2015; зарег. 15.02.2016.

31. Выбор композиционного материала (SCM v. 1.0): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616679 / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, С.А. Сидоренко, Д.А. Рычков. – Заявка № 2016611730; заявл. 03.03.2016; зарег. 16.06.2016.

32. Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V. Rationalization of polymer composite materials processing by improving production efficiency // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 942–947. – doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.067.

33. Stability and process of destruction of compressed plate of layered composite materials with defects / L.A. Bokhoeva, V.E. Rogov, A.S. Chermoshentseva, D.V. Lobanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142. – P. 012077. – doi: 10.1088/1757-899X/142/1/012077.

34. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Повышение эффективности применения лезвийного инструмента при обработке композиционных неметаллических материалов // Проблемы механики современных машин: материалы VI Международной конференции / отв. ред. В.С. Балбаров. – М., 2015. – С. 183–189.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (74), January – March 2017, Pages 20–29

Efficiency upgrading of composite material product production preparation

Lobanov D.V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mf_nauka@brstu.ru

Rychkov D.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: dielektrik84@mail.ru

Sidorenko S.A., Master's Degree student, e-mail: serzh_sidorenko_1993@mail.ru

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

Abstract

The paper presents the ways to improve the utilization efficiency of the composites, which are proposed to replace conventional construction materials in engineering, where is possible. Software for composite material product production preparation stages of development, which include: the development of methods of forming composites database, multi-criteria analysis methods and rational choice of the composite material varied according to the compatibility of the parameters are revealed. The collecting and analysis of algorithms, the choice of the composite tool is presented. The formation of the base composition of composite materials is suggested. A software module for creation of the given composites database, the principle of software module work is presented. The software module introduces data on the form, and the designation of the brand of composite materials, its physical and mechanical properties, manufacturer, cost and image. The need in composite data structuring and organizing, analysis and synthesized decision solution of the rational composite material choice is noted. The algorithm which is based on the method of multi-criteria analysis and rational object selection is depicted. A program product for the rational choice of materials by its composition parameters (density, tensile strength: tensile, compressive, bending modulus, cost, thermal conductivity, etc.) under conditions of actual production with selection composites priority indicators and composites search by limiting the maximum number of values of the properties of composites is presented. The findings of research that reflect the spirit and scope of the performed work are described. The prospects for further implementation of the research results are reflected.

Keywords

automation; efficiency; rational choice; program module (product set); pre-production; composite materials.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-20-29

References

1. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S., Gorbatkina Yu.A., Kryzhanovskii V.K., Kuperman A.M., Simonov-Emel'yanov I.D., Khalnulin V.I., Bunakov V.A. *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya* [Polymeric composites: structure, properties, technology]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2008. 560 p. ISBN 978-5-93913-130-8.
2. Gorokhovskiy A.V., Escalante-Garcia J.I., Gashnikova G.Yu., Nikulina L.P., Artemenko S.E. Composite materials based on wastes of flat glass processing. *Waste Management*, 2005, vol. 25, iss. 7, pp. 733–736. doi: 10.1016/j.wasman.2004.11.007
3. Chung D.D.L. *Composite materials: functional materials for modern technologies*. 2nd ed. London, Springer-Verlag, 2004. 293 p. ISBN 978-1-4471-3734-0. doi: 10.1007/978-1-4471-3732-0
4. 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.
5. Mordvin M.A., Yakimov S.V., Baklushin S.M. Rekomendatsii po mekhanicheskoi obrabotke kompozitsionnykh materialov [Recommendations for the machining of composite materials]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Izhevsk State Technical University*, 2010, no. 2, pp. 26–29.
6. Pascual M.J., Duran A., Pascual L. Sintering behaviour of composite materials borosilicate glass-zrO₂ fibre composite materials. *Journal of the European Ceramic Society*, 2002, vol. 22, iss. 9–10, pp. 1513–1524. doi: 10.1016/S0955-2219(01)00479-4
7. Hu X., Jiang P., Xin Ch, Yang H., Gong Q. Nano-ag: polymeric composite material for ultrafast photonic crystal all-optical switching. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, iss. 3, p. 031103. doi: 10.1063/1.3073712
8. Dots M.V., Markov A.M. [Design automation turning composites] *Trudy 2-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Innovatsii v mashinostroenii"* [Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference "Innovations in mechanical engineering"]. Kemerovo, 2011, pp. 112–115. (In Russian)
9. Ivancivskiy 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 (24), pp. 187–192.
10. Skeebe V.Yu. *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei mashin, pri integratsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of the technological processing machinery parts with the integration of abrasive grinding and surface hardening currents by high frequency currents. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2008. 257 p.
11. Ivancivskiy 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.
12. Plotnikova N., Losinskaya A., Skeebe V., Nikitenko E. Perspective of high energy heating implementation for steel surface saturation with carbon. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 351–354. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.351
13. Skeebe V., Pushnin V., Kornev D. Quality improvement of wear-resistant coatings in plasma spraying integrated with high-energy heating by high frequency currents. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 88–94. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.88
14. Chesov Yu.S., Zverev E.A., Ivancivskiy V.V., Skeebe V.Yu., Plotnikova N.V., Lobanov D.V. Struktura iznosotoikikh plazmennyykh pokrytii posle vysokoenergeticheskogo vozdeistviya TVCh [Structure of wear resistant plasma coatings after high-energy treatment using high-frequency currents]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 4 (65), pp. 11–18.
15. Skeebe V.Yu., Ivancivskiy 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, pp. 012031. doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012031
16. Ivancivskiy V.V., Skeebe V.Y., Bataev I.A., Lobanov D.V., Martyushev N.V., Sakha O.V., Khlebova I.V. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 156, pp. 012025. doi: 10.1088/1757-899X/156/1/012025

17. Skeeba 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, pp. 012016. doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016
18. Maebayashi M., Otsuka S., Matsuoka T., Koda S. Acoustic analysis of composite soft materials, II characterization of composite materials containing glass beads. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003. vol. 42, no. 5B, p. 2939. doi: 10.1143/JJAP.42.2939
19. Kari S., Berger H., Gabbert U., Guinovart-Diaz R., Bravo-Castillero J., Rodriguez-Ramos R. Evaluation of influence of interphase material parameters on effective material properties of three phase composites. *Composites Science and Technology*, 2008, vol. 68, iss. 3–4, pp. 684–691. doi: 10.1016/j.compscitech.2007.09.009
20. Yaroslavtsev V.M. Tekhnologicheskie resheniya problem obrabotki raketnykh i aerokosmicheskikh konstruktii iz kompozitsionnykh materialov [Technological solutions to problems processing the rocket and aerospace composite structures]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya "Mashinostroenie" – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series "Mechanical Engineering"*, 2005, no. S2, pp. 41–62.
21. Rudykh O.L., Melamed E.Sh. *Osnovy sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya stroitel'nykh konstruktii*. Ch. 2. *Vidy obespechenii SAPR (programmno-apparatnye sredstva)* [Fundamentals of computer-aided structural design. Pt. 2. Types of CAD software (firmware)]. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 1998. 157 p.
22. Chu S., Yi W., Wang S., Li F., Feng W., Gong Q. Steady-state and transient-state optical properties of a charge-transfer composite material MO-PPV/SWNTs. *Chemical Physics Letters*, 2008, vol. 451, iss. 1–3, pp. 116–120. doi: 10.1016/j.cplett.2007.11.087
23. Zheng Y., Yang J., Wang J., NuLi Y. Nano-porous Si/C composites for anode material of lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 2007, vol. 52, iss. 19, pp. 5863–5867. doi: 10.1016/j.electacta.2007.03.013
24. Ma X.C., He G.Q., He D.H., Chen C.S., Hu Z.F. Sliding wear behavior of copper-graphite composite material for use in maglev transportation system. *Wear*, 2008, vol. 265, iss. 7–8, pp. 1087–1092. doi: 10.1016/j.wear.2008.02.015
25. Li J.L., Xiong D.S. Tribological properties of nickel-based self-lubricating composite at elevated temperature and counterface material selection. *Wear*, 2008, vol. 265, iss. 3–4, pp. 533–539. doi: 10.1016/j.wear.2007.09.005
26. Miyazaki H., Matsui H., Kitakaze H., Karuppuchamy S., Ito S., Yoshihara M. Synthesis and electronic behaviors of $Ce_{0.5}Hf_{0.5}O_2$ / Carbon clusters composite material. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, vol. 113, iss. 1, pp. 21–25. doi: 10.1016/j.matchemphys.2008.08.087
27. Lobanov D.V., Sidorenko S.A., Yushchenko D.A., Bol'sheshapova A.V. [Method of selection of composite materials instead of conventional structural]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologiya: materialy 4-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proceedings of the 4th International scientific-practical conference "Modern materials, equipment and technology"]. Kursk, 2014, pp. 255–261. (In Russian)
28. Lobanov D.V., Sidorenko S.A., Yushchenko D.A., Bolsheshapova A.V. Analiz i ratsional'nyi vybor polimernykh kompozitsionnykh materialov dlya izdelii po ikh fiziko-mekhanicheskim svoistvam [Analysis and a rational choice of polymer composite materials for products based on their physical and mechanical properties]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2015, no. 2, pp. 206–213.
29. Sidorenko S.A., Lobanov D.V., Rychkov D.A. Programmnyi produkt dlya avtomatizatsii vybora ratsional'nogo kompozitsionnogo materiala [Software for automating choice of rational composite material]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2016, no. 3, pp. 30–36.
30. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Sidorenko S.A., Rychkov D.A. *DBCM v. 1.0 (programmy dlya EVM)* [DBCM v. 1.0 (software)]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2016611925, 2015. (In Russian)
31. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Sidorenko S.A., Rychkov D.A. *SCM v. 1.0 (programmy dlya EVM)* [SCM v. 1.0 (software)]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2016616679, 2016. (In Russian)
32. Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V. Rationalization of polymer composite materials processing by improving production efficiency. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 942–947. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.067
33. Bokhoeva L.A., Rogov V.E., Chermoshentseva A.S., Lobanov D.V. Stability and process of destruction of compressed plate of layered composite materials with defects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 142, pp. 012077. doi: 10.1088/1757-899X/142/1/012077

34. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. [Improve the application of the cutting tool during processing of composite non-metallic materials]. *Problemy mekhaniki sovremennykh mashin: materialy VI Mezhdunarodnoi konferentsii* [Proceedings of the 6th International Conference “Problems of mechanics of modern machinery”]. Moscow, 2015, pp 183–189. (In Russian)

Funding

The work is executed under the frame of the project “UMNIK” number 2015 0011203 “Development of the composite material product production preparation using the edge tool”.

Article history

Received 16 December 2016

Revised 17 January 2017

Accepted 15 February 2017

ДЕФЕКТЫ В АЛМАЗАХ – ОСНОВА АДГЕЗИИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

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

Поступила 16 декабря 2016
Рецензирование 17 января 2017
Принята к печати 15 февраля 2017

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

Раскрытие природы образования засаленного слоя возможно только при комплексном исследовании в области материаловедения, технологии машиностроения, химии и физики твердого тела путем атомной визуализации ювенильных поверхностей. Для этого необходимо учитывать специфику синтеза искусственных алмазов, которая предыдущими исследователями не принималась во внимание. Однако крайне важно знать, какие алмазные кристаллы, с какими внутренними и поверхностными дефектами идут на изготовление современного шлифовального инструмента. Дефекты, возникающие в кристаллах алмаза при их синтезе, дают начало образованию более сложных дефектов, возникающих уже в процессе эксплуатации самих алмазов. При внешнем воздействии эти дефекты оказывают мгновенное и сильное влияние на эксплуатационные характеристики приборов, изделий или инструментов, содержащих алмазы. Разработанный на базе современных цифровых технологий и молекулярной динамики метод визуализации позволяет наглядно показать эти дефекты на атомном уровне.

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

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-30-39

Введение

Основным параметром, определяющим количественные, качественные и стоимостные характеристики современных технических проектов, является возможность проведения виртуального эксперимента. Это значительно дешевле, безопаснее и эффективнее физического эксперимента. Если в стремительно развивающейся индустрии быстрого прототипирования (RP) одним из ключевых критериев считается возможность визуализации модели в материале, то в моделировании методами молекулярной динамики (МД) критерием становится возможность визуализации атомного строения материала в модели. В то время как RP-модели предоставляют воз-

можность проведения особых экспериментов, которые в реальном мире провести затруднительно, то МД-модели дают возможность проведения экспериментов над атомной структурой создаваемого материала.

На сегодня машиностроение является тем высокотехнологичным сектором, который создает передовую наукоемкую продукцию. Современный переход российской промышленности на качественно новый научно-технический уровень возможен в тесной интеграции одновременно нескольких областей знаний. Особое значение имеет разработка и широкое применение материалов с улучшенными служебными характеристиками, созданных на базе фундаментальных и прикладных исследований.

В последние годы очевидна тенденция на стабильное увеличение интереса производства к алмазным шлифовальным кругам [1]. С их помощью обрабатываются многие ответственные детали. Подобная популярность может быть связана с тем, что инструмент из синтетического алмаза постепенно «завоевал» металлообрабатывающую отрасль промышленности, которая по достоинству оценила его уникальные возможности и теперь охотнее создает некоторые специфические условия для его эффективной работы.

Несмотря на свои прочностные характеристики, высокотехнологичный алмазный инструмент склонен терять в процессе шлифования режущие свойства путем изнашивания алмазных кристаллов или их адгезионного засаливания (ГОСТ 21445–84) [2]. Интенсивность этих процессов, а также создаваемые ими силы резания и трения могут быть так велики, что засаленный круг способен остановить вращающийся шпиндель шлифовального станка. Поэтому изучение процессов, протекающих в зоне контакта, описание причин потери работоспособности шлифовальных кругов с использованием компьютерных методов моделирования структуры и свойств материалов при их резании и предопределяют актуальность данной работы.

Засаленный слой на поверхности алмазного шлифовального круга образуется в несколько различных по своей природе этапов, протекание которых подтверждается современными научными представлениями об адгезии [3–5]. В каждом отдельном случае при обработке различных материалов, шлифовании различными абразивами могут преобладать различные механизмы адгезии, справедливые для конкретных термодинамических, фазовых и кинетических характеристик процесса [2–5]. Раскрыть суть этого процесса возможно только при комплексном исследовании в области материаловедения, технологии машиностроения, химии и физики твердого тела путем атомной визуализации ювенильных поверхностей [6]. Для этого необходимо учитывать специфику синтеза искусственных алмазов, которая предыдущими исследователями практически не учитывалась. Однако, как будет показано ниже, крайне важно знать, какие алмазные кристаллы, с какими внутренними и поверхностными дефектами идут на изготовление современного шлифовального инструмента.

В настоящее время в абразивном инструменте используются кристаллы «металл-синтетического» алмаза, которые образуются при высоких давлениях и температурах в металлических расплавах с растворенным в них углеродом. Это связано с тем, что ростовая среда на основе металлов катализаторов, например, таких как никель, хром или кобальт, хорошо растворяет графит. В момент своего роста в кристаллы алмаза в виде включений и примесей проникают все побочные фазы, которые находятся в реакционной камере [7–10]. Последующее воздействие на кристаллы может минимизировать некоторые дефекты алмаза. Оно заключается в различных видах радиационного воздействия, различных вариантах высокотемпературного отжига, а также сочетании различных комбинаций на их основе [11, 12].

Таким образом, после синтеза практически каждый алмаз имеет наноразмерные несовершенства структуры и различные дефекты. Все авторы, чьи исследования посвящены проблемам физики и материаловедения синтетических алмазов, единодушны во мнении, что наличие дефектов в алмазах оказывает сильное влияние на их физические свойства (механические, магнитные, электрические и пр.) и особенно влияет на их прочность, а точнее, на термочувствительность после синтеза [11–16].

Поскольку свойства алмаза определяются этими дефектами, то от них напрямую зависят эксплуатационные характеристики алмазного инструмента (или приборов и изделий), содержащего алмазы. Так, в процессе шлифования инструмент испытывает какое-либо внешнее воздействие (давление, температуру, окисление, влияние электрического тока и пр.), и поведение алмаза, находящегося в инструменте, также зависит от характера этого воздействия. Соответственно моделирование процессов резания с учетом основных дефектов, встречающихся в синтетическом алмазе, будет более точным как с точки зрения фундаментальной науки, так и компьютерного моделирования объектов физики твердого тела [2].

Методика исследования

Объектом исследования является технология шлифования изделий машиностроения, сочетающая в себе комбинированное воздействие

нескольких видов энергии и обеспечивающая повышение качества обработанной поверхности – комбинированная электроалмазная обработка (КЭАО).

Методика экспериментальных исследований заключается в определении удельного расхода алмазных зерен (АЗ), q (мг/г) и определении режущей способности АЗ, K (мм³/мин)/Н после КЭАО поверхности образцов из инструментальных сталей; изображения поверхностей АЗ получены с помощью растровой электронной микроскопии (Carl Zeiss EVO®50 XVP). Исследовались АЗ из алмазных чашечных кругов (АШК) на металлических связках, дефицитных зернистостей: АС6 80/63 М1 100 %, $D = 125$ мм, $b = 15$ мм; АС6 125/100 М1 100 %, $D = 125$ мм, $b = 10$ мм; АС6 80/63 А1 4 М1 $D = 150$ мм, $b = 10$ мм.

Исследование зависимости удельного расхода и коэффициента режущей способности

Исследование зависимости удельного расхода (рис. 1) и коэффициента режущей способности (рис. 2) АШК от технологических режимов КЭАО показало, что исходя из условий обоснованного минимального удельного расхода алмазов рациональными для затачивания инструментальных сталей следует считать следующие режимы резания: плотность тока правки $i_{пр} = 0,1 \dots 0,25$ А/см²; плотность тока травления $i_{тр} = 6 \dots 8$ А/см²; скорость резания $V = 35 \dots 47$ м/с; поперечная подача $t = 0,02 \dots 0,03$ мм/дв.ход; продольная подача $S = 1 \dots 1,5$ мм/мин.

При исследовании процесса шлифования, моделировании его закономерностей необходимо учитывать воздействие точечных и объемных дефектов внутри АЗ, так как именно они ответ-

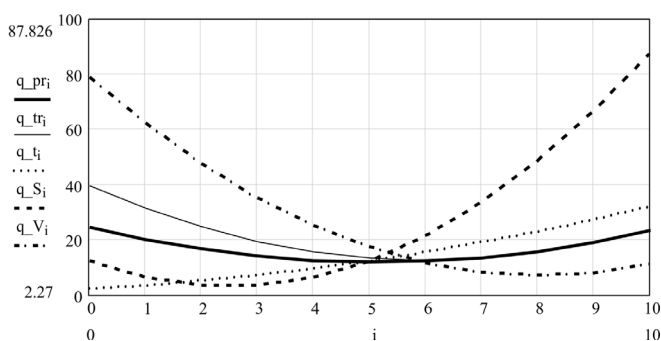


Рис. 1. Графическая зависимость удельного расхода АШК q от технологических режимов КЭАО

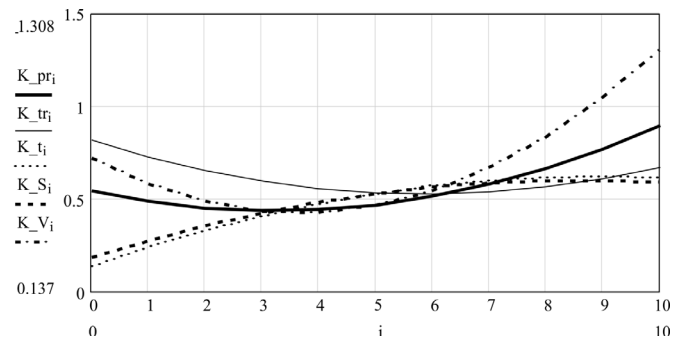


Рис. 2. Графическая зависимость коэффициента режущей способности АШК K от технологических режимов КЭАО

ственны за его разрушение и износ. Так, расчетная прочность алмаза с «идеальной» кристаллической структурой достигает 10 000 Н/мм², но, как показывает практика, прочность реального алмаза в 100...1000 раз меньше.

Воздействие точечных дефектов (микродефекты)

Основной примесью алмаза в кристаллической решетке является азот, который дает начало к образованию большого количества точечных дефектов [11–16]. Так, одиночные вакансионные дефекты (рис. 3, а), одиночные замещенные и межузельные атомы (рис. 3, б) при высокой температуре шлифования могут переходить в многовакансионные кластеры. Поскольку замещенные атомы принадлежат другому химическому элементу и имеют другой диаметр, то подобные переходы расширяют или сжимают кристаллическую решетку, накапливая в ней так называемую запасенную энергию, которая, высвобождаясь в процессе шлифования, может приводить к образованию в кристалле алмаза трещин, а значит, к снижению его прочностных характеристик.

Воздействие объемных дефектов (макродефекты)

За адгезию сошлифованного материала к связке шлифовального круга, т. е. за сам факт засаливания, в большей степени отвечают дефекты, связанные с несовершенствами поверхности кристалла алмаза. Как правило, они представляют собой блоки кристаллической решетки (рис. 3, з), между которыми могут располагаться как обычные трещины (рис. 3, д), так и трещины, заполненные металлическими включениями

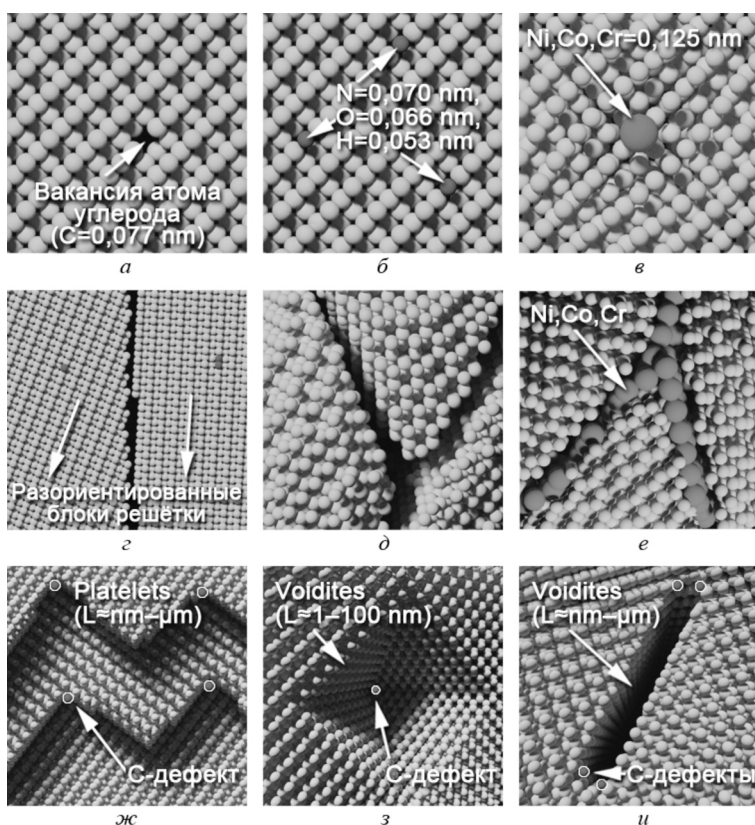


Рис. 3. Моделируемые дефекты синтетического алмаза с учетом внутренней морфологии кристалла:

точечные дефекты (микродофекты): *а* – вакансии; *б* – замещенные атомы (С-дефект); *в* – межузельные атомы; *г* – дислокации; объемные дефекты (макродофекты): *д* – трещины между блоками; *е* – металлические включения; *ж* – пластинчатые дефекты, так называемые Platelets; *з* – субмикрорупототы в форме октаэдра, так называемые Voidites; *и* – плоскостные субмикрорупототы

(рис. 3, *е*). Трещины с металлическими включениями могут располагаться как на поверхности кристалла, так и внутри его, имея протяженность от нанометров до нескольких микрометров. Эти дефекты при совокупном воздействии высокой температуры и увеличении сил резания взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью на атомном уровне. Так, например, диффузия атомов углерода из обрабатываемой поверхности в кристалл алмаза наблюдается при температуре более 700 °С, а диффузия углерода из кристалла алмаза в обрабатываемую поверхность происходит при температуре более 800 °С.

Чем больше металлических включений, тем выше скорость окисления алмазных кристаллов. В условиях электроалмазного шлифования они могут взаимодействовать с электролитом, снижая, таким образом, режущие свойства алмазного шлифовального круга.

Поскольку точечные дефекты дают начало к образованию объемных, то в кристалле алма-

за одновременно располагаются как пластинчатые (рис. 3, *ж*), так и плоскостные дефекты (рис. 3, *з, и*). Они, как и точечные, могут располагаться на поверхности кристалла и внутри его, поэтому от внешнего воздействия сил резания, тепловых процессов напрямую зависит характер разрушения алмазного кристалла. Пластинчатые дефекты – *platelets* (рис. 3, *ж*) формируются из межузельных атомов углерода с примесью азота [14]. Наноразмерные субмикрорупототы – *voidites* могут иметь протяженность от одного нанометра (рис. 3, *з*) до нескольких микрометров (рис. 3, *и*) и располагаться между зернами той же ориентации, на их границах или вдоль линий дислокаций [17].

Результаты и обсуждение

При шлифовании большинство кристаллов алмаза шлифовального круга сохраняют свою форму и целостность (рис. 4, *а*). Однако существование в них точечных и объемных дефектов является причиной определенного характера их износа. Так, объемное разрушение вершины алмаза происходит в виде макроскола (рис. 4, *б*) или микроскола (рис. 4, *в*), по расположенным на поверхности кристалла микротрещинам. Следует отметить, что кристалл алмаза состоит из нанослоев (так называемых ступеней роста), имеющих размерность от 10 до 300 нм (рис. 4, *д*). Из этих нанослоев формируются последующие микрослои, которые имеют размерность от 0,2 до 4 мкм (рис. 4, *е*). Что характерно, подобное разделение износа на микро- и макроуровни наблюдается при разрушении тех режущих поверхностей или граней алмаза, которые входят в непосредственный контакт с обрабатываемой поверхностью.

Считается [3–5, 18–32], что в зависимости от режимов обработки, физико-химических свойств обрабатываемого материала характер износа алмазов подразделяется на абразивный (рис. 4, *ж*), адгезионный (рис. 4, *з*), диффузионный и тепловой (рис. 4, *е*). Однако комплексное исследование состояния поверхности шлифовального круга показало [18–20, 32], что вне зависимости от условий обработки на одном

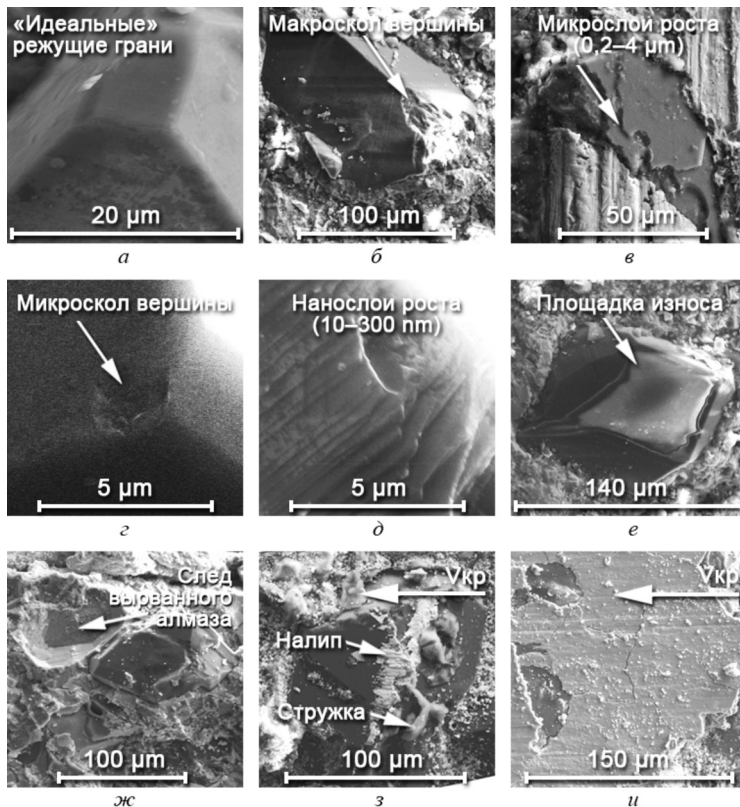


Рис. 4. Кристаллы алмаза с характерными для шлифования видами износа (разрушения режущих граней):

a – режущая грань алмаза до шлифования; *б* – объемное разрушение вершины алмаза в виде макроскола; *в* – износ режущей поверхности алмаза по микрослоям роста; *г* – объемное разрушение вершины алмаза в виде микроскола; *д* – износ режущей поверхности алмаза по нанослоям роста; *е* – истирание режущей поверхности алмаза с образованием гладкой площадки износа; *ж* – вырывание алмаза из связки шлифовального круга; *з* – образование налива на режущей грани алмаза; *и* – алмазы, полностью покрытые засаленным слоем

уровне над связкой круга могут одновременно наблюдаться кристаллы со всеми видами износа (рис. 4, *и*). Очевидно, это объясняется тем, что дефекты создают в кристаллах неравномерные напряжения. В процессе шлифования возникает деформация, вызывающая сближение точечных С-дефектов, а частицы сошлифованного материала, попадая в микротрещины, распирают их, провоцируя тот или иной вид износа.

Исходя из вышесказанного большинство дефектов в алмазе берет свое начало от наличия в своей кристаллической решетке всего лишь одного постороннего атома (N, H, O, Ni, Cr, Co и др.) либо отсутствия одного атома углерода и развиваются затем под воздействием высоких температур и давления в зоне резания [14]. Вероятно, синтез бездефектных алмазов может быть

одним из перспективных путей предотвращения процесса засаливания алмазных шлифовальных кругов на металлической связке [16]. Однако, пока исследования в этом направлении продолжаются, уже сегодня возможно существенно минимизировать негативное влияние засаленного слоя путем:

- образования на поверхности круга защитных пленок;
- замены стандартных электролитов на альтернативные смазывающе-охлаждающие жидкости;
- разработки и внедрения в эксплуатацию новых прогрессивных конструкций шлифовальных кругов;
- активной правки шлифовального круга во время шлифования по технологии комбинированной электроалмазной обработки;
- комбинированного сочетания вышеупомянутых методов.

Выводы

1. Выдвинута, теоретически обоснована и экспериментально подтверждена гипотеза о начале адгезионно-диффузионного взаимодействия ювенильных поверхностей в точечных и объемных дефектах кристаллической решетки синтетического алмаза.
2. Наличие различного вида дефектов в алмазах оказывает сильное влияние на их физические свойства, а через них на эксплуатационные характеристики абразивного инструмента, что, в свою очередь, отражается на качестве обрабатываемой поверхности.
3. Трещины, образуемые после синтеза на поверхности кристалла или внутри его, как и трещины, заполненные металлическими включениями, дают начало адгезионно-диффузионному засорению абразивного слоя шлифовального инструмента элементами обрабатываемого материала.
4. Аналитически и экспериментально исследованы технологические режимы КЭАО, в результате чего были получены графические зависимости удельного расхода АШК q и коэффициента режущей способности АШК K . Это позволило научно обоснованно подходить к назначению условий реализации КЭАО.

Список литературы

1. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. «Ключевая» популярность электроалмазной обработки // Механика XXI века. – 2016. – № 15. – С. 50–57.
2. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. О разрушении алмазных зерен при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 4. – С. 16–23. – doi: 10.17212/1994-6309-2016-4-16-23.
3. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 230 с. – ISBN 5-94275-092-0.
4. Худобин Л.В., Унянин А.Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с. – ISBN 978-5-89146-982-2.
5. Rowe W.B. Principles of modern grinding technology. – 2nd ed. – Oxford: Elsevier, 2014. – 480 p. – ISBN 978-0-12-810166-7.
6. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Атомная визуализация алмазного резания // Компьютерные исследования и моделирование. – 2016. – Т. 8, № 1. – С. 161–172.
7. 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 государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет». – М., 2014. – 112 с.
8. 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.
9. 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.
10. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении / П.В. Зыбинский, Р.К. Богданов, А.П. Загора, А.М. Исонкин. – Донецк: Норд-Пресс, 2007. – 244 с.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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. Базалый, 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.
16. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Физматлит, 1970. – 565 с.
17. 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>.
18. 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](http://www.scientific.net/AMM.799-800.291).
19. 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](http://dx.doi.org/10.12851/EESJ201404ART46).
20. 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.
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. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю.* Совмещение операций поверхностной закалки и финишного шлифования на одном технологическом оборудовании // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2006. – № 1 (30). – С. 16–18.

23. *Скиба В.Ю.* Актуальные проблемы в машиностроении: сборник материалов первой международной научно-практической конференции // *Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование*. – 2014. – № 11 (66). – С. 83.

24. Actual problems and decisions in machine building / ed. by V.Yu. Skeebea. – Pfaffikon: Trans Tech Publ., 2015. – 344 p. – (Applied mechanics and materials; vol. 788). – ISBN 978-3-03835-551-9. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.

25. 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.

26. *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.

27. 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.

28. *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.

29. *Скиба В.Ю.* Повышение эффективности технологического процесса обработки деталей машин, при интеграции абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2008. – 257 с.

30. 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.

31. *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.

32. 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.

OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (74), January – March 2017, Pages 30–39

Defects in diamonds as the basis adhesion grinding

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 st., Bratsk, 665709, Russian Federation

Abstract

The presented comprehensive study in the field of electrochemical grinding makes it possible to establish the rational regime of the combined electro-diamond grinding and to prove, on the atomic-molecular level, the possibility of effective grinding of high speed steels by metal-bonded diamond wheels. It is shown that the diffusive and adhesive phenomena in the contact zone depend essentially on the electrical regime of the combined electro-diamond grinding. The structural changes in the diamond-bearing layer are due to the phenomena associated with the high pressure and Van der Waals attracting forces occurring on the molecular level with high rates. Undesirable formation of the loaded layer on the diamond grinding wheel surface is a consequence of the phenomena. Disclosure of the nature formation of a loaded layer is possible only with an integrated research in the field of materials science, technology of machine building, chemistry and solid-state physics, through atomic visualization of juvenile surfaces. For that end, you must consider specifics of synthesis of synthetic diamonds, which was not considered by previous researchers. However,

it is important to know which diamond crystals, with some internal and surface defects are for the manufacture of modern grinding tools. Defects arising in diamond crystals during their synthesis, give rise to the formation of more complex defects that arise in the operational process of diamonds themselves. In the analysis obtained through scanning electron microscopy images shows that even on the surface not involved in the process of cutting the diamond grains and on their edges, there are characteristic traces disorders of the crystal structure, both micro and macro levels. When external action these defects and have immediate strong effect on production characteristics of devices, products or instruments containing diamonds. This is particularly manifested in the grinding of tough, ductile materials based on aluminum, magnesium or titanium. Developed on the basis of modern digital technology and molecular dynamics visualization method allows to show it at the atomic level.

Keywords

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

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-30-39

References

1. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. “Klyuchevaya” populyarnost’ elektroalmaznoi obrabotki [“Keywords” popularity of electric diamond grinding]. *Mekhaniki XXI veku – Mechanical Engineers to XXI century*, 2016, no. 15, pp. 50–57.
2. Popov V.Y., Yanyushkin A.S., Khlystov A.N. O razrushenii almaznykh zeren pri shlifovanii [About a destruction of diamond grains in the grinding process]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2016, no. 4, pp. 16–23. doi: 10.17212/1994-6309-2016-4-16-23
3. Yanyushkin A.S., Shorkin V.S. *Kontaktnye protsessy pri elektroalmaznom shlifovanii* [Contact processes with electric diamond grinding]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2004. 230 p. ISBN 5-94275-092-0.
4. Khudobin L.V., Unyanin A.N. *Minimizatsiya zasalivaniya shlifoval’nykh krugov* [Minimization of grinding wheels loading]. Ul’yanovsk, UIGTU Publ., 2007. 298 p. ISBN 978-5-89146-982-2.
5. Rowe W.B. *Principles of modern grinding technology*. 2nd ed. Oxford, Elsevier, 2014. 480 p. ISBN 978-0-12-810166-7.
6. 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.
7. Solopova N.A. *Krystallizatsiya almaza v karbonatnykh rasplavakh mineralogicheskogo 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.
8. 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. Vklyucheniya v kristallakh sinteticheskikh almaznykh vysokoprochnnykh 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.
9. Novikov N.V., Bogatyreva G.P., Bogdanov R.K., Il’nitskaya G.D., Isonkin A.M. Vliyanie prochnostnykh kharakteristik almaznykh shlifporoshkov na rabosposobnost’ burovogo instrumenta [The influence of strength characteristics of diamond grits on drilling tool performance]. *Sverkhverdye materialy – Journal of Superhard Materials*, 2009, no. 6, pp. 75–80. (In Russian)
10. Zybinskii P.V., Bogdanov R.K., Zakora A.P., Isonkin A.M. *Sverkhverdye materialy v geologorazvedochnom burenii* [Superhard materials in exploration drilling]. Donetsk, Nord-Press Publ., 2007. 244 p.
11. 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-tehnologicheskaya 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)
12. Vins V.G. *Opticheski aktivnye defekty v almaze – zakonomernosti obrazovaniya 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.
13. 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.

14. Shiryaev A.A. *Defekty i mikrovklyucheniya v almazakh kak indikator uslovii kristalloobrazovaniya i postrotoykh 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.

15. 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., Lipyan E.V. [The influence of high-voltage electrical discharge machining on morfomet-torical characteristics of diamond powder]. *Porodorazrushayushchii i metalloobrabatyvayushchii 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)

16. Sivukhin D.V. *Obshchii kurs fiziki. Termodinamika i molekulyarnaya fizika* [General physics course. Thermodynamics and molecular physics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1970. 565 p.

17. 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>

18. 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

19. 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

20. 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.

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. Ivantsivsky V.V., Skeebe V.Yu. Sovmeshchenie operatsii poverkhnostnoi zakalki i finishnogo shlifovaniya na odnom tekhnologicheskom oborudovanii [Combining the operations of surface hardening and finish grinding on the same processing equipment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2006, no. 1 (30), pp. 16–18.

23. Skeebe V.Yu. Aktual'nye problemy v mashinostroenii: sbornik materialov pervoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Proceedings of the First International scientific and practical conference “Actual problems in machine building”]. *Khroniki ob'edinennogo fonda elektronnykh resursov Nauka i obrazovanie – Chronicles of the Joint Fund of the Electronic Resources Science and Education*, 2014, no. 11 (66), p. 83.

24. Skeebe V.Yu., ed. *Actual problems and decisions in machine building. Applied mechanics and materials*. Vol. 788. Pfaffikon, Trans Tech Publ., 2015. 344 p. ISBN 978-3-03835-551-9. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788

25. 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.

26. 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

27. 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

28. 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.

29. Skeebe V.Yu. *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei mashin, pri integratsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of the technological processing machinery parts with the integration of abrasive grinding and surface hardening currents by high frequency currents. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2008. 257 p.



30. 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

31. 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

32. 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.

Article history

Received 16 December 2016

Revised 17 January 2017

Accepted 15 February 2017

ЛАЗЕРНОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ ОПЛАВЛЕНИЕ ЧУГУНА СЧ20 В ОТБЕЛЕННОМ СОСТОЯНИИ*

В.Г. ГИЛЕВ, канд. техн. наук, с.н.с
Е.А. МОРОЗОВ, аспирант, ст.преподаватель
И.Б. ПУРТОВ, магистрант
(ПНИПУ, г. Пермь)

Поступила 11 октября 2016
Рецензирование 17 января 2017
Принята к печати 02 февраля 2017

Гилев В.Г. – 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
e-mail: xray@pm.pstu.ac.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния параметров лазерного оплавления серого чугуна СЧ20 на рельеф поверхности лазерных дорожек, микроструктуру и микротвердость в зонах лазерной обработки. По химическому составу исследуемый материал относится к серым чугунам. Но из-за ускоренного охлаждения при литье материал в исходном состоянии имеет структуру белого чугуна. Лазерное оплавление осуществляли волоконным лазером с длиной волны 1,07 мкм и пятном круглого сечения. Варьировали скорость перемещения луча, размер пятна и мощность лазерного луча. Лазерное поверхностное оплавление в данном конкретном случае не меняет тип структуры. Однако дисперсность микроструктуры значительно увеличивается. В результате диспергирования структуры микротвердость HV50 повышается от 500 для исходной структуры до 770...850 после лазерного оплавления. При малых размерах пятна 0,2...0,5 мм на поверхности образуются периодические структуры рельефа. Сравнительно гладкую поверхность лазерных дорожек получили при размерах пятна 2...4 мм. В этом же случае достигается максимальная микротвердость.

Ключевые слова: лазерное поверхностное оплавление, серый чугун, белый чугун, рельеф поверхности, микроструктура, микротвердость, ледебурит, измельчение структуры.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-40-50

Введение

Лазерные технологии поверхностной и локальной обработки материалов с развитием волоконных лазеров и новых методов лазерной обработки материалов находят все большее и разнообразное применение [1–3]. Значительное внимание уделяется лазерному упрочнению поверхностей деталей из чугунов [4–16]. Детали из серого чугуна СЧ20 широко применяются в

машиностроении. Известно их применение для изготовления деталей установок центробежных водяных и нефтяных насосов, работающих в абразивной и коррозионной средах наряду с чугуном нирезист. Для повышения стойкости к эрозии некоторые детали из серого чугуна получают литьем в охлаждаемые формы, при этом формируют структуры отбеленного чугуна с ледебуритной структурой. Для повышения износостойкости чугунов используются различные виды лазерной обработки: наплавка, оплавление, закалка и легирование.

* Работа выполнена при поддержке министерства образования и науки РФ в рамках финансирования проектной части государственного задания № 11.8353.2017/БЧ.

Обработка чугунов лазерной закалкой и оплавлением известна для серых, высокопрочных и некоторых легированных чугунов, упрочнение при этом обусловлено образованием мартенсита, ледебурита, дисперсных карбидов [15].

Лазерная обработка с оплавлением поверхности в ряде случаев диктуется необходимостью получения упрочненных слоев, обладающих утонченной структурой с метастабильными фазами, а также для устранения поверхностных дефектов, измельчения и перераспределения различных включений, присущих данному типу чугунов [16]. При этом значительно ухудшается исходная шероховатость обрабатываемой поверхности. Твердость и износостойкость чугунов после лазерного оплавления определяется количеством образующегося ледебурита [15]. Интерес представляет поверхностное упрочнение чугунов лазерным инжекционным легированием титаном [11–13]. При этом из титана, подаваемого в зону оплавления, и имеющегося в составе чугуна углерода образуется *in situ* частицы карбида титана. Проведенные ранее исследования упрочнения по этой технологии аустенитного чугуна нирезист с чешуйчатым графитом, используемым для изготовления рабочих органов ступеней многоступенчатых электроцентробежных насосов для добычи нефти, показали, что количество образующегося TiC ограничивается частичным удалением углерода [12–14].

В настоящей работе исследовано влияние параметров лазерного оплавления на структуру, микротвердость, вид рельефа поверхности и потерю массы образцов из серого чугуна в отбеленном состоянии. Последнее представляет интерес для оценки роли структурного состояния углерода в чугуне на степень его утраты в ходе лазерного оплавления.

Методика проведения исследований

Химический состав исследуемого чугуна СЧ20 приведен в табл. 1.

Заготовки образцов чугуна имели дендритную структуру доэвтектического белого чугуна

Таблица 1

Химический состав (в %) материала СЧ20

C	Si	Mn	S	P
3.3...3.5	1.4...2.4	0.7...1	до 0.15	до 0.2

с характерными более темными включениями ледебурита (рис. 1).

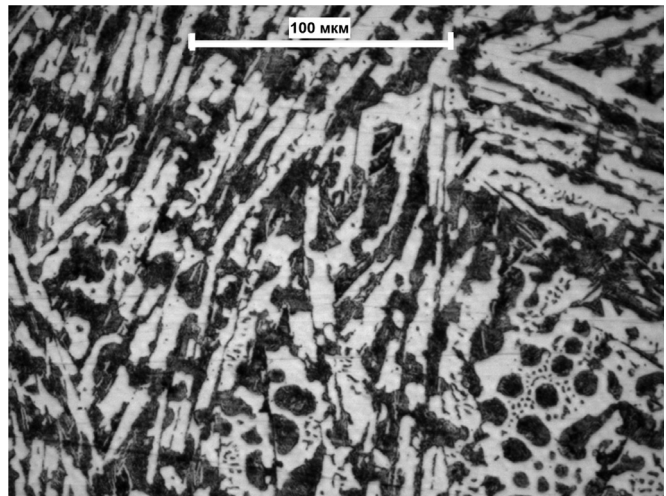


Рис. 1. Структура исследованного чугуна СЧ20 в исходном состоянии

Процесс оплавления осуществляли на установке OPTOMEC LENS 850-R с волоконным лазером YLR-1000 IPG Photonics с длиной волны 1.07 мкм, пятном круглого сечения и гауссовым распределением плотности мощности. Конструкция системы обеспечивает фокусировку луча на расстоянии 8 мм от среза лазерной головки в пятно диаметром 0.2 мм. Для изменения размера лазерного пятна в случае обработки расфокусированным лучом меняли расстояние до поверхности образца. Для расчетов требуемых расстояний в целях получения заданного диаметра пятна использовали формулы, приведенные в [17, 18].

Обработку проводили одиночными проходами в среде высокочистого аргона сфокусированным лучом при диаметре пучка в месте падения на поверхность обрабатываемого образца $d = 0.2$ мм, а также расфокусированным пучком при различных диаметрах пучка 2.0 и 4.0 мм. Варьировали также мощность излучения P 1.0, 0.8, 0.7 и 0.6 кВт. Микротвердость зоны оплавления измеряли на микротвердометре ПМТ-4 при нагрузке 50 г. Микроструктуры после лазерной обработки исследовали на микроскопе Axiovert 40 MAT фирмы Карс Цейс. Для выявления микроструктуры использовали 4 %-й водный раствор азотной кислоты. Во всех экспериментах фиксировали изменение веса образцов.

Результаты и обсуждение

Образующийся в процессах лазерного оплавления рельеф поверхности в значительной мере определяется явлениями массопереноса расплава под действием сил поверхностного натяжения. Прежде всего следует отметить перенос значительного объема расплава в сторону, противоположную направлению движения луча. При скорости перемещения луча 20 мм/с, диаметре луча 0,2 мм в результате этого процесса на поверхности образуются периодические структуры рельефа (рис. 2).

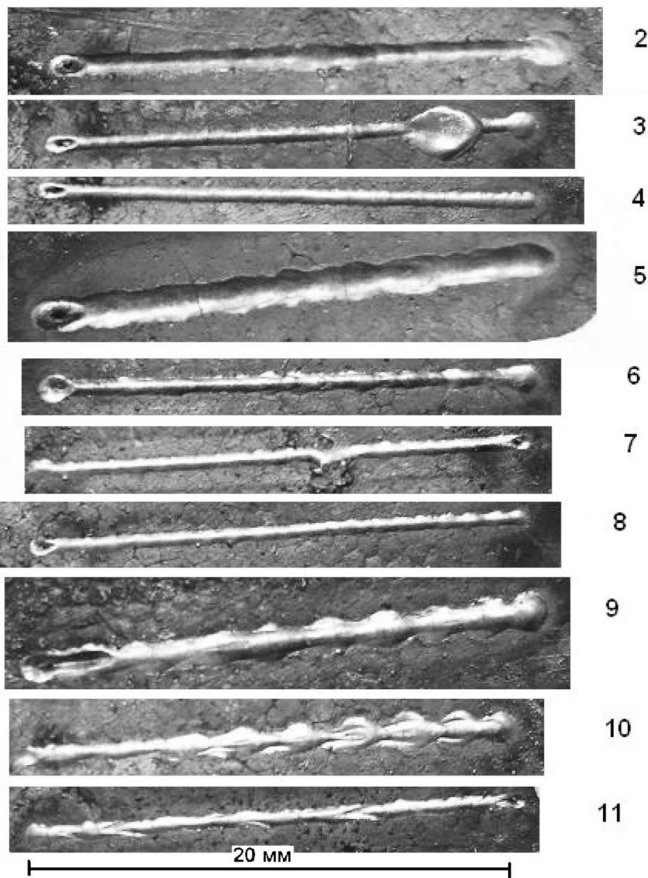


Рис. 2. Вид дорожек лазерного оплавления чугуна СЧ20 при диаметре лазерного пятна 0.2 мм

При меньших скоростях и диаметре пятна лазера 2 мм поверхность оплавленной зоны выглядит сравнительно гладкой (рис. 3). Как видно из рис. 2 и 3, гладкая поверхность достигается в режимах с малой плотностью мощности лазерного излучения 16 кВт/см², а при большой плотности образуется периодический рельеф.

Поверхностный периодический рельеф аналогичен структурам, образующимся на поверхности при закалке с оплавлением псевдосплава

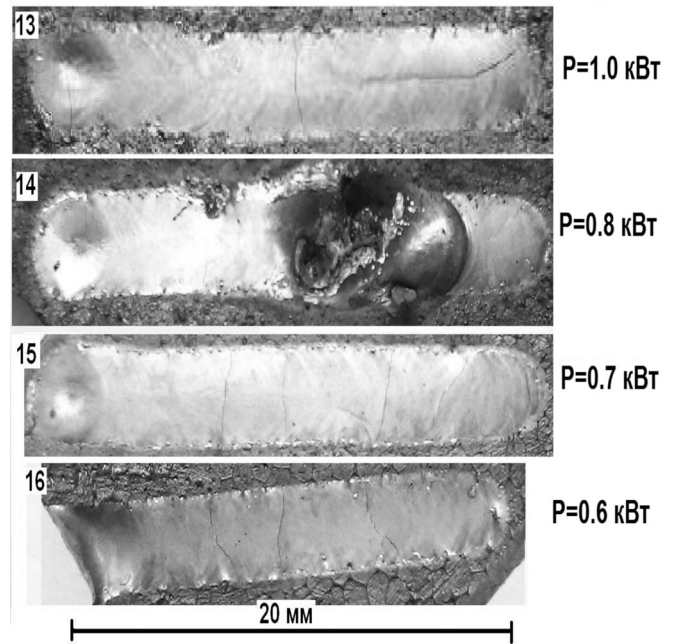


Рис. 3. Вид дорожек лазерного оплавления чугуна СЧ20 при диаметре лазерного пятна 2 мм и скорости перемещения луча 5 мм/с

сталь-медь [18] или при лазерном оплавлении чугуна нирезист [14]. Образующийся периодический рельеф отличается от данных [18], где рельеф имеет форму чередующихся кольцевых гребней, и от данных [14], где рельеф представляет форму вытянутых треугольников. В конце лазерной дорожки во всех случаях зафиксирован короткий отрезок канавки, из которой расплав был перенесен вдоль дорожки назад. Форма образующихся валиков примерно одинакова по всей длине дорожек в отличие от нирезиста [14], на котором наблюдался явный перенос расплава вдоль дорожек из горячей зоны расплава назад вдоль дорожки в более холодную зону.

Известны два механизма массопереноса в неоднородно локально нагретых расплавах, механизм термокапиллярной конвекции и механизм капиллярной термоконцентрационной конвекции, которые отличаются особенностями образующегося при этом рельефа [19]. В экспериментах варьировали диаметр падающего луча и плотность мощности в нем. Диаметр пятна 0.2 мм при $P = 1$ кВт соответствовал плотности мощности в пятне 2500 кВт/см², а диаметры 2 и 4 мм – плотности мощности (8...16 кВт/см²), что близко к условиям, полученным в работе [18]. И в [18], и в настоящей работе относительно гладкие поверхности наблюдаются при сравнительно неглубоком оплавлении. Но чугун

СЧ20 имеет более выраженную склонность к образованию сглаженной поверхности возможно из-за отсутствия значительных концентрационных неоднородностей, присущих материалам, исследованным в [18].

Микроструктуры в сечении одиночных лазерных дорожек, полученных при разных усло-

виях фокусировки лазерного луча, приведены на рис. 4–6. Во всех случаях можно отметить, что структура в зоне оплавления, так же как и исходная, представляет собой дендритную структуру, состоящую из первичных кристаллов и ледебурита. Отличие заключается в значительном уменьшении размеров структурных составляющих.

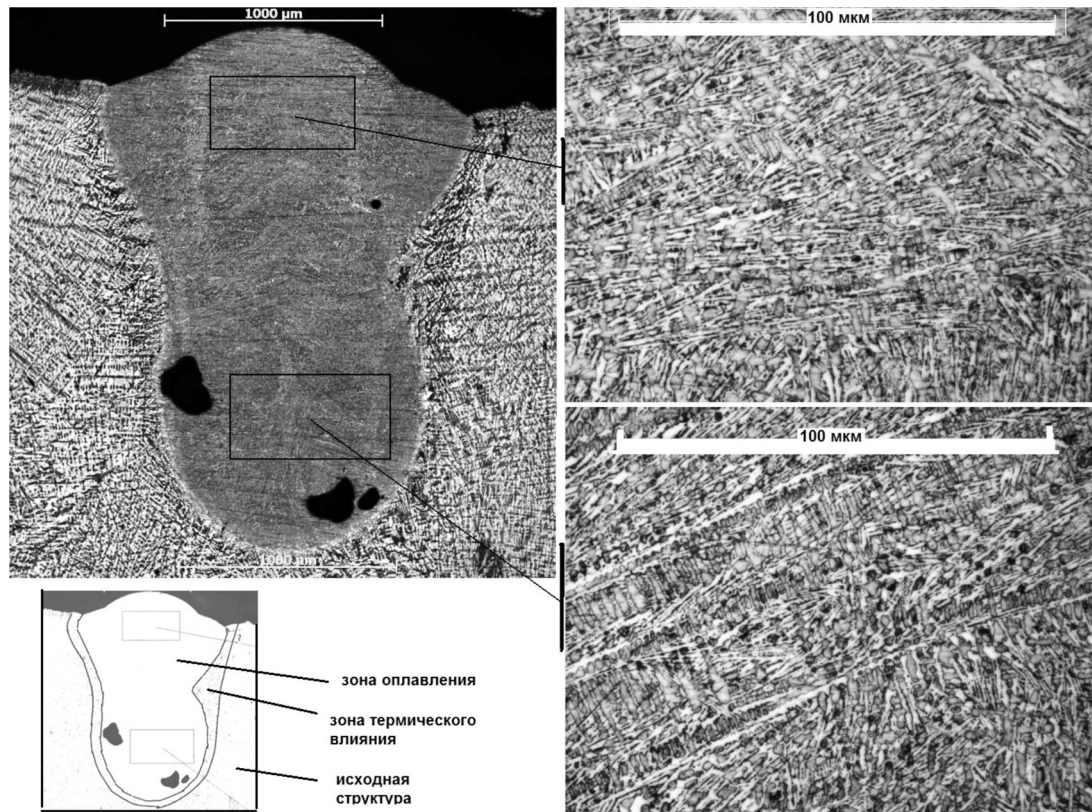


Рис. 4. Форма и структура зон лазерного оплавления и термического влияния чугуна СЧ20, полученные при $P=1$ кВт, при диаметре лазерного пятна 0.2 мм и скорости перемещения луча 20 мм/с

Известно, что из многообразия чугунов наиболее эффективно лазерным излучением обрабатываются серые чугуны перлитного класса, на которых достигается твердость $HV_{50} = 1100$. Белый чугун незначительно упрочняется лазерным излучением [20]. Однако в нашем случае серого чугуна СЧ20 в отбеленном состоянии наблюдается заметное упрочнение от $HV_{50} = 500$ в исходном состоянии до $HV_{50} = 850$ в зоне лазерного оплавления (табл. 2). Упрочнение происходит в основном из-за диспергирования микроструктуры. Кроме зоны оплавления на микроструктурах наблюдается также слой лазерного воздействия (термического влияния), см. схему, изображенную на рис. 4, отличающийся от основы несколько большей травимостью. Микротвердость

в этих участках не отличается от основы. Отличие в травимости зоны лазерного воздействия от основы может быть связано с тем, что на этих участках происходят начальные стадии оплавления на межфазных границах между цементитом и ферритом.

Можно также отметить ориентировку первичных кристаллов в столбчато-дендритной структуре, направление которых преимущественно перпендикулярно границе зоны оплавления. Это же самое отмечается в работах [14, 20].

Максимальная микротвердость достигнута в режимах с размером пятна 4 мм. Можно предположить, что разница в микротвердости обусловлена различиями в скорости охлаждения после лазерного оплавления. Так, в экспериментах по

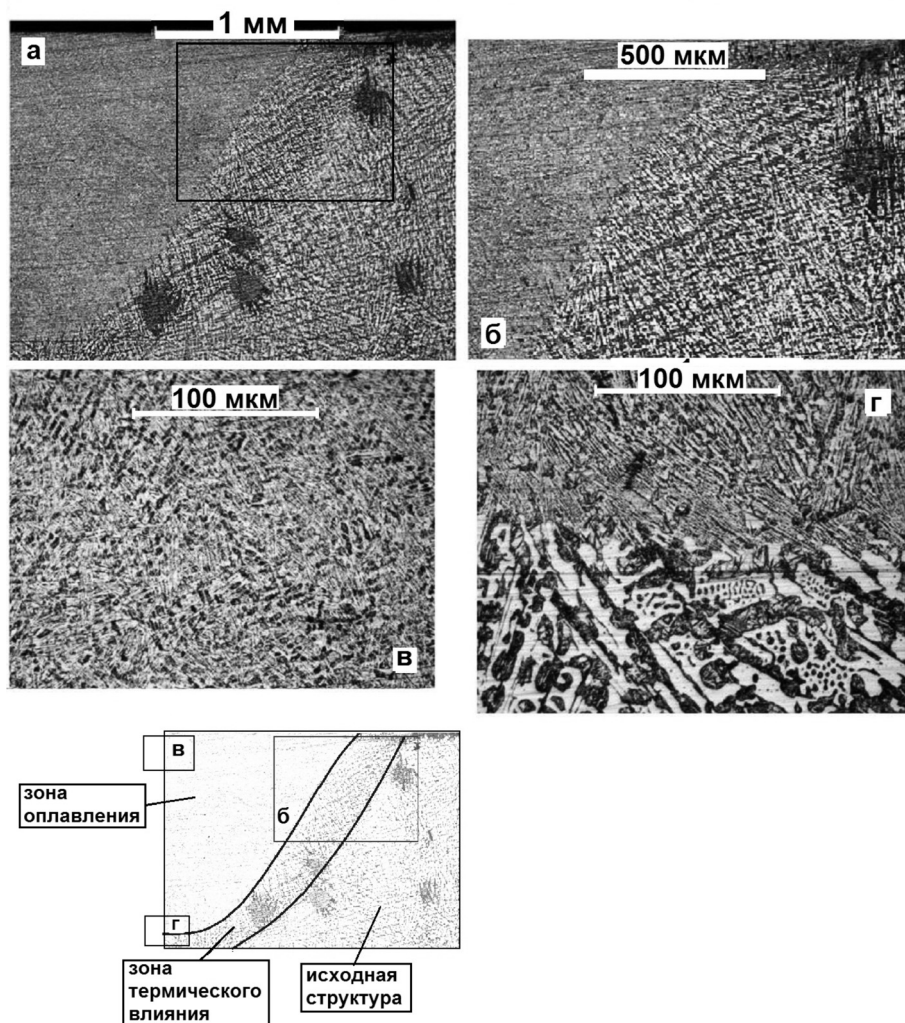


Рис. 5. Форма и структура зон лазерного оплавления и термического влияния чугуна СЧ20, полученные при $P = 1$ кВт, диаметре лазерного пятна 2 мм и скорости перемещения луча 5 мм/с:

a – общий вид; b – правый край зоны оплавления; c – середина зоны оплавления, верх; d – нижняя граница зоны оплавления

Таблица 2

Параметры лазерной обработки и микротвердость основы зоны оплавления и зоны лазерного воздействия

Номер обработки	Зоны воздействия	P , кВт	d , мм	v , мм/с	HV	Параметр $P/(dv)^{0.4}$, кВт/(мм ² /с) ^{0.4}
9	Основа	–	–	–	601±45	
9	Зона оплавления	1	0.2	20	778±23	0.574
9	Зона термического влияния				549±61	
13	Зона оплавления	1	2	5	775±48	0.398
13	Зона термического влияния				634±92	
6	Зона оплавления	1	4	5	847±81	0.302
6	Зона термического влияния				Не определена	
18	Зона оплавления	0.8	4	5	824±74	0.241
18	Зона термического влияния				637±88	

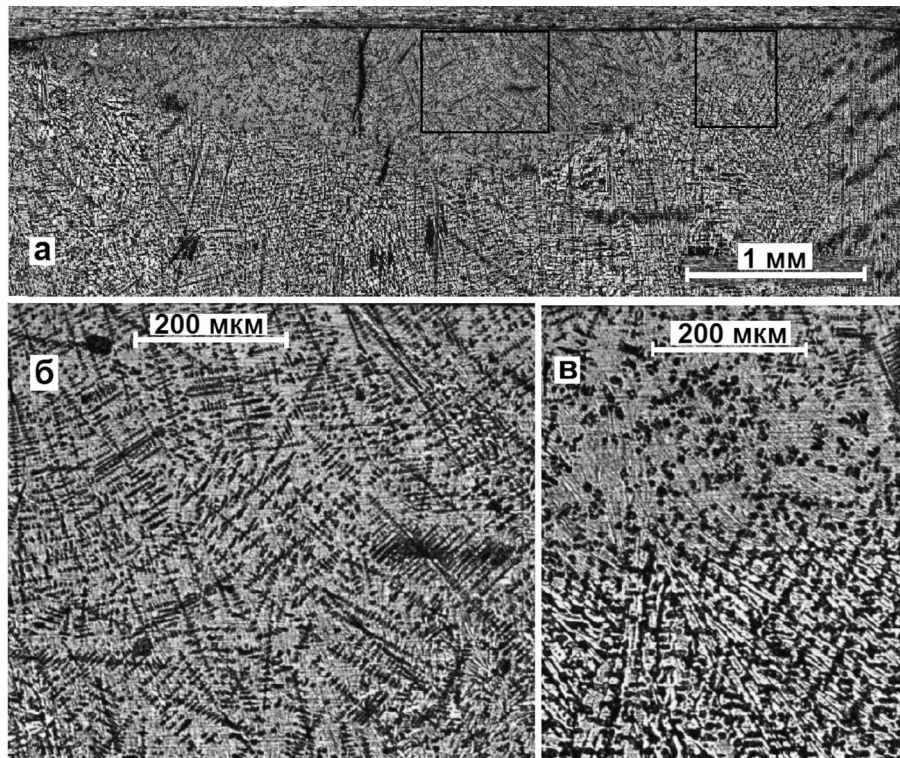


Рис. 6. Микроструктура зоны лазерного оплавления чугуна СЧ20, полученной при $P = 1$ кВт, диаметре лазерного пятна 4 мм и скорости перемещения лазерного луча 5 мм/с:

a – общий вид; *б* – середина зоны оплавления, верх; *в* – правый край зоны оплавления, граница с исходной структурой

распылению серого чугуна газом [21] микротвердость определяется скоростью охлаждения и коррелирует с дисперсностью структуры.

Оценку скорости охлаждения при лазерной обработке можно сделать по параметру $P/(dv)^{0.4}$, который коррелирует с размерами зон лазерного воздействия [22] и критерием Фурье [23]. Согласно [23] глубина зоны лазерного воздействия пропорциональна критерию Фурье, характеризующему время охлаждения, т. е. скорость изменения температуры при охлаждении:

$$L \approx \frac{P}{(dv)^m} \approx PF_o^m,$$

где m может принимать значения 0.4 и 0.5.

Микротвердость в зонах лазерного оплавления в исследованных образцах чугуна снижается с увеличением параметра $\frac{P}{(dv)^{0.4}}$ (рис. 7).

Таким образом, наблюдается обратная зависимость от скорости охлаждения. Поэтому логично объяснить высокую твердость в образцах, обработанных лазерным лучом с пятном диаметром 4 мм, меньшей потерей углерода, чем при

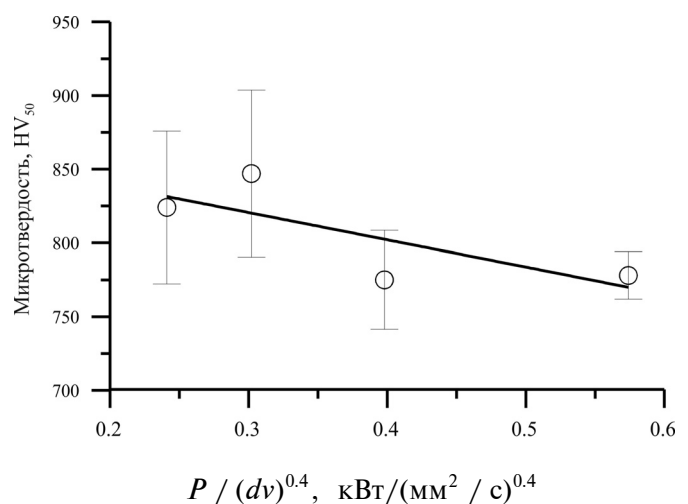


Рис. 7. Зависимость микротвердости зоны лазерного оплавления от параметра $\frac{P}{(dv)^{0.4}}$

обработке лучом, сфокусированным в пятно диаметром 0.2 мм. Явление потери углерода в зоне лазерного оплавления известно (см., например [24]). В основе этого явления лежит механизм термически индуцированной (up-hill) диффузии углерода к более холодной поверхности расплава на стадии охлаждения.

Представляют интерес измерения потери массы образцов в ходе лазерного оплавления, так как они могут дать дополнительную информацию. При малых размерах пятна из-за высокой плотности мощности лазерного излучения потери массы значительно больше, чем при больших размерах пятен (рис. 8). Причем зависимости потери массы от параметров лазерной обработки для отбеленного серого чугуна СЧ20 отличаются от таких же зависимостей, полученных ранее на чугуне нирезист с чешуйчатым графитом [13].

Исследования потери массы (Δm) в ходе лазерного оплавления велись при варьировании размера пятна (d), скорости перемещения лазерного луча (v) и его мощности (P). На рис. 8 приведены результаты аппроксимации полученных данных по потере массы образца, отнесенной к длине лазерной дорожки, в зависимости от параметра $P / (vd)^{0.4}$, который коррелирует с размерами зон лазерного воздействия [21, 22]. Результаты собраны в группы с одинаковыми d и v при варьировании мощности лазерного излучения P .

Можно видеть, что потеря массы описывается квадратичной зависимостью от параметра $P / (vd)^{0.4}$, что отличается от линейной зависимости, полученной при проведении аналогичных экспериментов на чугуне нирезист с чешуйчатым графитом [13].

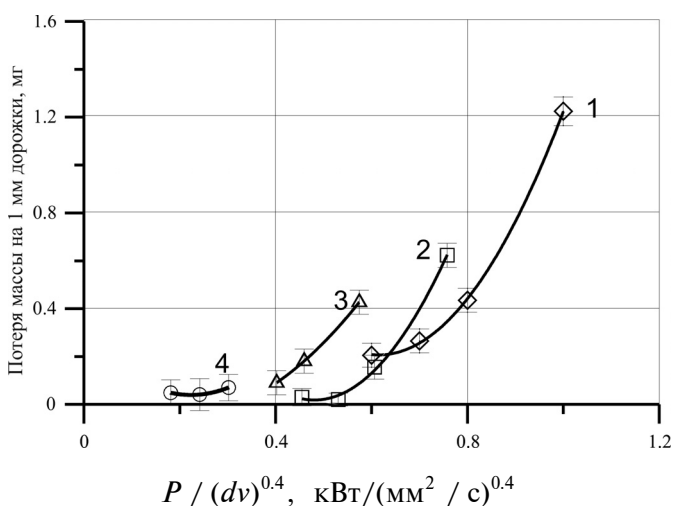


Рис. 8. Зависимости потери массы образцов при лазерном оплавлении чугуна СЧ20 в исходном отбеленном состоянии, отнесенные к длине лазерной дорожки, от параметра: $W/(vd)^{0.4}$:

1 — $v = 5$ мм/с и $d = 0,2$ мм; 2 — $v = 10$ мм/с и $d = 0,2$ мм; 3 — $v = 20$ мм/с и $d = 0,2$ мм; 4 — $v = 5$ мм/с и $d = 4$ мм. На всех кривых P варьируется от 0.6 до 1.0 кВт

Можно предположить, что различие в виде кривых, изображенных на рис. 8, и аналогичных кривых, приведенных в [13] для чугуна нирезист, связано с особенностями структуры и различиями в механизмах удаления материала. Есть сведения о возможности сублимации графита при лазерной обработке чугунов, с чем связывают образование пор [25]. В настоящей работе образование пор наблюдается только при обработке сфокусированным лучом ($d = 0.2$ мм) в нижней части зоны оплавления (рис. 4). Образование пор очевидно связано с образованием узкого и глубокого канала проплавления, нижняя часть которого при большой скорости перемещения луча ($v = 20$ мм/с) может оставаться в объеме материала. Это явление наблюдается при лазерной сварке с глубоким проплавлением. При расфокусированном до 2...4 мм лазерном луче и медленном его перемещении поры в зоне оплавления не образуются, но при этих режимах могут образовываться трещины, видимые на рис. 3.

Выводы

1. После лазерного оплавления чугуна СЧ20 с исходной структурой белого чугуна наблюдается заметное повышение микротвердости от $HV_{50} = 500$ в исходном состоянии до $HV_{50} = 850$ в зоне лазерного оплавления.

2. После лазерного оплавления микроструктура, так же как и в исходном состоянии, состоит из первичных кристаллов и ледебурита, но в значительно диспергированном виде, что и является причиной упрочнения.

3. Максимальное упрочнение достигается при максимальных размерах лазерного пятна 4 мм, при которых минимальны потери углерода. При этих же режимах наблюдается образование сравнительно гладких поверхностей одиночных лазерных дорожек.

Список литературы

1. Контактная выносливость NiCrBSi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки / Р.А. Саврай, А.В. Макаров, Н.Н. Соболева, И.Ю. Малыгина, А.Л. Осинцева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). — 2014. — № 4 (65). — С. 43–51.

2. Применение метода лазерно-плазменной модификации поверхности металлов для улучшения триботехнических характеристик цилиндров двига-

телей внутреннего сгорания / С.Н. Багаев, Г.Н. Грачёв, А.Л. Смирнов, М.Н. Хомяков, А.О. Токарев, П.Ю. Смирнов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2014. – № 1 (62). – С. 14–23.

3. Laser surface hardening of frictional pairs made from steel–copper pseudoalloy / V.G. Gilev, E.A. Morozov, P.N. Kilina, L.D. Sirotenko // *Russian Engineering Research*. – 2016. – Vol. 36, iss. 2. – P. 152–155. – doi: 10.3103/S1068798X16020118.

4. *Alabeedi K.F., Abboud J.H., Benyounis K.Y.* Microstructure and erosion resistance enhancement of nodular cast iron by laser melting // *Wear*. – 2009. – Vol. 266, iss. 9–10. – P. 925–933. – doi: 10.1016/j.wear.2008.12.015.

5. *Grum J., Šturm R.* Comparison of measured and calculated thickness of martensite and ledeburite shells around graphite nodules in the hardened layer of nodular iron after laser surface remelting // *Applied Surface Science*. – 2002. – Vol. 187, iss. 1–5. – P. 116–123. – doi: 10.1016/S0169-4332(01)00823-6.

6. *Fernandez-Vicente A., Pellizzari M., Arias J.L.* Feasibility of laser surface treatment of pearlitic and bainitic ductile irons for hot rolls // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2012. – Vol. 212, iss. 5. – P. 989–1002. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.11.013.

7. Microstructural study of surface melted and chromium surface alloyed ductile iron / M.H. Sohi, M. Ebrahimi, H.M. Ghasemi, A. Shahripour // *Applied Surface Science*. – 2012. – Vol. 258, iss. 19. – P. 7348–7353. – doi: 10.1016/j.apsusc.2012.04.014.

8. *Adel K.M., Dhia A.S., Ghazali M.J.* The effect of laser surface hardening on the wear and friction characteristics of acicular bainitic ductile iron // *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. – 2009. – Vol. 4, N 2 (Special issue). – P. 167–171.

9. *Chen C.H., Altstetter C.J., Rigsbee J.M.* Laser processing of cast iron for enhanced erosion resistance // *Metallurgical Transactions A*. – 1984. – Vol. 15, iss. 4. – P. 719–728. – doi: 10.1007/BF02644203.

10. *Paczkowska M.* The evaluation of the influence of laser treatment parameters on the type of thermal effects in the surface layer microstructure of gray irons // *Optics & Laser Technology*. – 2016. – Vol. 76. – P. 143–148. – doi: 10.1016/j.optlastec.2015.07.016.

11. Surface metal matrix composite Fe-Ti-C/TiC layers produced by laser melt injection technology / O.N. Verezub, Z. Kálazi, G. Buza, P. Boross, B. Vero, G. Kaptay // *International Conference “Advanced metallic materials”*: proceedings, Slovakia, Smolenice, 5–7 November 2003. – Smolenice, 2003. – P. 297–300.

12. *Гилев В.Г., Торсунов М.Ф., Морозов Е.А.* Лазерное легирование чугуна нирезист ЧН16Д7ГХ по-

дачей порошка ВТ-20 в зону оплавления // *Металлообработка*. – 2016. – № 5 (95). – С. 25–30.

13. *Gilev V.G., Morozov E.A.* Laser melt injection of austenitic cast iron Ch16D7GKh with titanium // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2016. – Vol. 57, iss. 6. – P. 625–632. – doi: 10.3103/S1067821216060055.

14. Исследование микроструктуры и микротвердости зон лазерного оплавления чугуна нирезист ЧН16Д7ГХ / В.Г. Гилев, Е.А. Морозов, И.Б. Пуртов, Е.С. Русин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2014. – Т. 16, № 6-1. – С. 227–233.

15. *Safonov A.N.* Structure and properties of the surface of iron-carbon alloys melted by laser radiation // *Metal Science and Heat Treatment*. – 1999. – Vol. 41, iss. 1. – P. 7–11. – doi: 10.1007/BF02466262.

16. *Ходаковский В.М., Патенкова Е.П.* Особенности лазерного упрочнения чугуновых деталей судовых технических средств // *Металлообработка*. – 2003. – № 4. – С. 26–29.

17. *Gilev V.G., Bezmaternykh N.V., Morozov E.A.* Study of steel–copper pseudo alloy microstructure and microhardness after laser heat treatment // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2014. – Vol. 56, iss. 5. – P. 262–268. – doi: 10.1007/s11041-014-9743-8.

18. Исследование микроструктуры и рельефа поверхности при лазерной термической обработке тонкостенного цилиндра из порошкового псевдосплава сталь-медь / В.Г. Гилев, Е.А. Морозов, А.С. Денисова, А.М. Ханов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2012. – Т. 14, № 4-5. – С. 1212–1217.

19. *Майоров В.С.* Проявления капиллярной термомоконцентрационной неустойчивости при взаимодействии лазерного излучения с веществом // *Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок* / под ред. В.Я. Панченко. – М.: Физматлит, 2009. – С. 310–330

20. *Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н.* Оборудование и технология лазерной обработки материалов. – М.: Высшая школа, 1990. – 159 с.

21. Microstructure evolution and mechanical properties of drop-tube processed, rapidly solidified grey cast iron / O. Oloyede, T.D. Bigg, R.F. Cochrane, A.M. Mullis // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – Vol. 654. – P. 143–150. – doi: 10.1016/j.msea.2015.12.020.

22. *Kraposhin V.S., Shakhlevich K.V., Vyaz'mina T.M.* Influence of laser heating on the quantity residual austenite in steels and cast irons // *Metal Science and Heat Treatment*. – 1989. – Vol. 31, iss. 10. – P. 745–757. – doi: 10.1007/BF00717467.

23. *Крапошин В.С., Крапошина И.Ф.* Влияние параметров лазерного облучения на размеры облучен-

ных зон для стали 45 // Физика и химия обработки материалов. – 1989. – № 6. – С. 19–24.

24. Fedosov S.A. Laser beam hardening of carbon and low alloyed steels: discussion of increased quantity of retained austenite // Journal of materials

Science. – 1999. – Vol. 34, iss 17. – P. 4259–4264. – doi: 10.1023/A:1004607020302.

25. Stavrev D., Dikova Ts. Behaviour of graphite in laser surface hardening of irons // Machines, Technologies, Materials. – 2007. – Iss. 4–5. – P. 98–101.

ОБРАБОТКА METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

№ 1 (74), January – March 2017, Pages 40–50

Laser surface melting of the cast iron SCH20 after chill casting

Gilev V.G., Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, Xray@pm.pstu.ac.ru

Morozov E.A., Ph.D. student, Senior Lecturer, e-mail: morozov.laser@gmail.com

Purtov I.B., Master's Degree student, e-mail: purtoff.ivan@ya.ru

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

Abstract

The influence of parameters of laser melting of gray cast iron SCh20 on the surface topography, microstructure and microhardness is investigated. Parts of centrifugal electric submersible pumps (ESP) for oil production are made of gray cast iron. According to the chemical composition, the analyzed material is gray cast iron. But due to the rapid cooling during casting the material in its initial state has the structure of white cast iron. The rapidly cooled from the melt cast iron (chilled iron) has a high hardness and wear resistance due to the presence of ledeburite in the structure. However, it is of interest to further increase the surface hardness by laser melting. Usually white iron is slightly hardened by laser melting. However, in this case the cast iron observed significant hardening. Samples were cut from the part obtained by casting in a metal mold, and had the form of 3 mm thick plates. Laser surface melting was carried out using a fiber laser with the 1.07 μm radiation wavelength and a circular cross-section laser beam. The varied parameters were: a speed of beam movement v , a spot size d , and a power of the laser beam P . Microhardness was measured with a load of 50 grams.

Laser melting in this case does not change the type of structure. However, the dispersion of the microstructure increases significantly. As a result of structure refinement, the microhardness increased from 500 to 770...850 $\text{HV}_{0.05}$. When a spot size of 0.2...0.5 mm periodic relief is formed on the surface. The relatively smooth surface of the track is formed by laser beam with spot size of 2...4 mm. Simultaneously, in this case, the material has a maximum microhardness.

Before and after laser treatment, the samples were weighed. Mass change Δm per unit of length of the laser tracks is determined. It is shown that the value of Δm well approximated by a quadratic dependence on the value of $P/(dv)^{0.4}$. It is known that the value of $P/(dv)^{0.4}$ is proportional to the size of the laser melting zone. Previously, during a study of laser melting of austenitic Ni-Resist cast iron with flake graphite, it was found, that Δm is in linear dependence on the value of $P/(dv)^{0.4}$.

Keywords

laser surface melting, gray cast iron, white cast iron, surface topography, microstructure, microhardness, ledeburite, structure refinement.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-40-50

References

1. Savrai R.A., Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Osintseva A.L. Kontaktnaya vyнослиvost' NiCrBSi pokrytii, poluchennykh metodom gazoporoshkovoi lazernoi naplavki [The contact endurance of NiCrBSi coatings obtained by gas powder laser cladding]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 4 (65), pp. 43–51.

2. Bagaev S.N., Grachev G.N., Smirnov A.L., Khomyakov M.N., Tokarev A.O., Smirnov P.Yu. Primenenie metoda lazerno-plazmennoi modifikatsii poverkhnosti metallov dlya uluchsheniya tribotekhnicheskikh kharakteristik

tsilindrov dvigatelei vnutrennego sgoraniya [Application of the method of laser-plasma surface modification of metals to improve tribological characteristics of combustion engines]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 1 (62), pp. 14–23.

3. Gilev V.G., Morozov E.A., Kilina P.N., Sirotenko L.D. Laser surface hardening of frictional pairs made from steel–copper pseudoalloy. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, iss. 2, pp. 152–155. doi: 10.3103/S1068798X16020118

4. Alabeedi K.F., Abboud J.H., Benyounis K.Y. Microstructure and erosion resistance enhancement of nodular cast iron by laser melting. *Wear*, 2009, vol. 266, iss. 9–10, pp. 925–933. doi: 10.1016/j.wear.2008.12.015

5. Grum J., Šturm R. Comparison of measured and calculated thickness of martensite and ledeburite shells around graphite nodules in the hardened layer of nodular iron after laser surface remelting. *Applied Surface Science*, 2002, vol. 187, iss. 1–2, pp. 116–123. doi: 10.1016/S0169-4332(01)00823-6

6. Fernandez-Vicente A., Pellizzari M., Arias J.L. Feasibility of laser surface treatment of pearlitic and bainitic ductile irons for hot rolls. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, vol. 212, iss. 5, pp. 989–1002. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.11.013

7. Sohi M.H., Ebrahimi M., Ghasemi H.M., Shahripour A. Microstructural study of surface melted and chromium surface alloyed ductile iron. *Applied Surface Science*, 2012, vol. 258, iss. 19, pp. 7348–7353. doi: 10.1016/j.apsusc.2012.04.014

8. Adel K.M., Dhia A.S., Ghazali M.J. The effect of laser surface hardening on the wear and friction characteristics of acicular bainitic ductile iron. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2009, vol. 4, no. 2 (Special issue), pp. 167–171.

9. Chen C.H., Altstetter C.J., Rigsbee J.M. Laser processing of cast iron for enhanced erosion resistance. *Metallurgical Transactions A*, 1984, vol. 15, iss. 4, pp. 719–728. doi: 10.1007/BF02644203

10. Paczkowska M. The evaluation of the influence of laser treatment parameters on the type of thermal effects in the surface layer microstructure of gray irons. *Optics & Laser Technology*, 2016, vol. 76, pp. 143–148. doi: 10.1016/j.optlastec.2015.07.016

11. Verezub O.N., Kálazi Z., Buza G., Boross P., Vero B, Kaptay G. Surface metal matrix composite Fe-Ti-C/TiC layers produced by laser melt injection technology. *International Conference «Advanced metallic materials»: proceedings*, Slovakia, Smolenice, 5–7 November 2003, pp. 297–300.

12. Gilev V.G., Torsunov M.F., Morozov E.A. Lazernoe legirovanie chuguna nirezist ChN16D7GKh podachei poroshka VT-20 v zonu oplavleniya [Laser alloying of cast iron Ni-Resist CHN16D7GH with feeding of powder BT-20 in the reflow zone]. *Metalloobrabotka – Metal processing*, 2016, no. 5 (95), pp. 25–30.

13. Gilev V.G., Morozov E.A. Laser melt injection of austenitic cast iron Ch16D7GKh with titanium. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2016, vol. 57, iss. 6, pp. 625–632. doi: 10.3103/S1067821216060055

14. Gilev V.G., Morozov E.A., Purtov I.B., Rusin E.S. Issledovanie mikrostruktury i mikrotverdosti zon lazernogo oplavleniya chuguna nirezist ChN16D7GKh [Microstructure and microhardness research of ni”rezist cast iron after laser surface melting]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk – Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 16, no. 6-1, pp. 227–233.

15. Safonov A.N. Structure and properties of the surface of iron-carbon alloys melted by laser radiation. *Metal Science and Heat Treatment*, 1999, vol. 41, iss. 1, pp. 7–11. doi: 10.1007/BF02466262

16. Khodakovskii V.M., Patenkova E.P. Osobennosti lazernogo uprochneniya chugunnykh detalei sudovykh tekhnicheskikh sredstv [Features of laser hardening of pig-iron parts of ship means]. *Metalloobrabotka – Metal processing*, 2003, no. 4, pp. 26–29.

17. Gilev V.G., Bezmaternykh N.V., Morozov E.A. Study of steel–copper pseudo alloy microstructure and microhardness after laser heat treatment. *Metal Science and Heat Treatment*, 2014, vol. 56, iss. 5, pp. 262–268. doi: 10.1007/s11041-014-9743-8

18. Gilev V.G., Morozov E.A., Denisova A.S., Khanov A.M. Issledovanie mikrostruktury i rel’efa poverkhnosti pri lazernoi termicheskoi obrabotke tonkostennogo tsilindra iz poroshkovogo psevdosplava stal’-med’ [Research of microstructure and surface relief at laser thermal processing of the thin-walled cylinder made from powder pseudoalloy steel-copper]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk – Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 4-5, pp. 1212–1217.

19. Maiorov V.S. Proyavleniya kapillyarnoi termokontsentratsionnoi neustoichivosti pri vzaimodeistvii lazernogo izlucheniya s veshchestvom [Manifestations of the capillary thermal instability of the concentration in the interaction of laser radiation with matter]. *Lazernye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamental’nykh issledovaniy i prikladnykh razrabotok* [Laser materials processing technology: modern problems of fundamental research and applications]. Ed. by V.Ya. Panchenko. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, pp. 310–330.

20. Grigor'yants A.G., Shiganov I.N. *Oborudovanie i tekhnologiya lazernoi obrabotki materialov* [Equipment and technology of laser processing of materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 159 p.

21. Oloyede O., Bigg T.D., Cochrane R.F., Mullis A.M. Microstructure evolution and mechanical properties of drop-tube processed, rapidly solidified grey cast iron. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 654, pp. 143–150. doi: 10.1016/j.msea.2015.12.020

22. Kraposhin V.S., Shakhlevich K.V., Vyaz'mina T.M. Influence of laser heating on the quantity residual austenite in steels and cast irons. *Metal Science and Heat Treatment*, 1989, vol. 31, iss. 10, pp. 745–757. doi: 10.1007/BF00717467

23. Kraposhin B.C., Kraposhina I.F. Vliyanie parametrov lazernogo oblucheniya na razmery obluchennykh zon dlya stali 45 [Effect of laser parameters on the size of the irradiated areas of the steel 45]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov – Physics and chemistry of materials treatment*, 1989, no. 6, pp. 19–24.

24. Fedosov S.A. Laser beam hardening of carbon and low alloyed steels: discussion of increased quantity of retained austenite. *Journal of Materials Science*, 1999, vol. 34, iss. 17, pp. 4259–4264. doi: 10.1023/A:1004607020302

25. Stavrev D., Dikova Ts. Behaviour of graphite in laser surface hardening of irons. *Machines, Technologies, Materials*, 2007, iss. 4–5, pp. 98–101.

Funding

The work is supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of the financing of the project part of the state task N 11.8353.2017/BCh.

Article history:

Received 11 October 2016

Revised 17 January 2017

Accepted 2 February 2017

ПОВЕРХНОСТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ТИТАНА АЛЮМИНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ*

*И.А. БАТАЕВ¹, канд. техн. наук, доцент
Д.В. ЛАЗУРЕНКО¹, канд. техн. наук, доцент
М.Г. ГОЛКОВСКИЙ², канд. физ.-мат. наук, с.н.с.
И.С. ЛАПТЕВ¹, аспирант
И.К. ЧАКИН², инженер-исследователь
И.С. ИВАНЧИК³, заведующий лабораторией
(¹НГТУ, г. Новосибирск,
²ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск
³СГУВТ, г. Новосибирск)*

Поступила 16 декабря 2016
Рецензирование 17 января 2017
Принята к печати 15 февраля 2017

Батаев И.А. – 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: i.bataev@corp.nstu.ru

Методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей, содержащих алюминий, на плоских заготовках из технически чистого титана сформированы поверхностные слои, упрочненные интерметаллидами. Исследованы структура, микротвердость и триботехнические свойства поверхностно легированных материалов. Максимальный уровень микротвердости наплавленных покрытий составляет ~600 НВ. Причины повышения твердости материалов обусловлены формированием алюминидов титана и проявлением механизма твердорастворного упрочнения титана. По сравнению с титаном ВТ1-0 полученные материалы характеризуются более низкими значениями коэффициента трения и меньшей склонностью к схватыванию при взаимодействии со стальным индентором. При испытаниях на трение о закрепленные частицы абразива значения относительной износостойкости тесно коррелируют с микротвердостью наплавленных материалов.

Ключевые слова: алюминид титана, электронно-лучевая наплавка, структура, свойства.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-51-60

Введение

Алюминий является одним из наиболее важных легирующих элементов в титановых сплавах. По характеру влияния на титан этот элемент относится к α -стабилизаторам, т. е. к элементам, повышающим температуру полиморфного превращения. Факторы положительного влияния

алюминия в сплавах на основе титана связаны с увеличением растворимости водорода в α -фазе, снижением склонности к образованию гидрида титана TiH_2 и уменьшением опасности водородного охрупчивания. Присутствие алюминия в большинстве титановых сплавов в количестве от ~ 1,5 % до ~ 6,5 % (мас.) оказывает заметное упрочняющее влияние на материалы. Изменение

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-38-20776 мол_a_вед.

механических свойств в этих сплавах обусловлено твердорастворным механизмом упрочнения.

Если же содержание алюминия превышает 6,5 % (мас.), тогда наряду с фазой α -Ti в материалах формируется промежуточная фаза α_2 [1, 2]. В отличие от α -фазы соединение Ti_3Al характеризуется упорядоченным расположением атомов титана и алюминия. В соответствии с диаграммой состояния «Ti-Al» [1], представленной на рис. 1, при дальнейшем увеличении концентрации алюминия в анализируемых материалах формируется соединение $TiAl$, именуемое γ -фазой. Для обоих типов алюминидов характерны достаточно широкие области гомогенности.

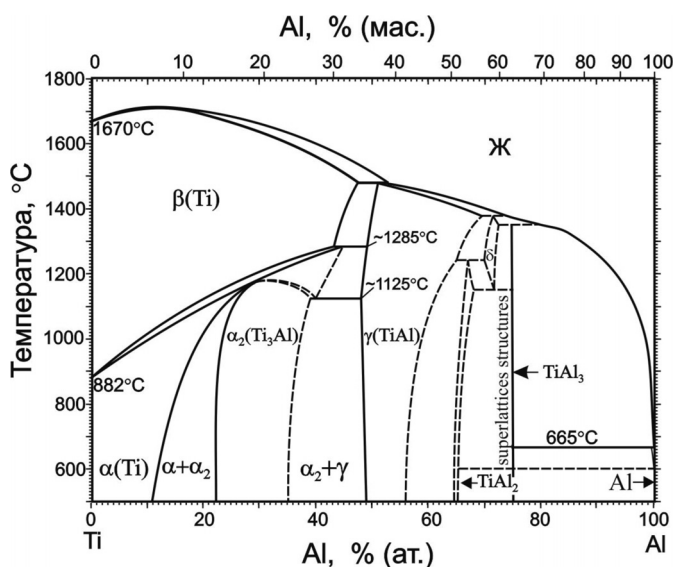


Рис. 1. Диаграмма состояния «Ti-Al» [1]

Алюминид титана Ti_3Al (α_2 -фаза), как и α -Ti, имеет гексагональную решетку, однако в отличие от альфа-титана характеризуется упорядоченным расположением атомов титана и алюминия. Это соединение относится к пространственной группе симметрии $R\bar{6}_3/mmc$, структурному типу DO_{19} [3, 4]. Интерметаллид $TiAl$ (γ -фаза) обладает упорядоченной тетрагонально искаженной гранецентрированной структурой, относится к пространственной группе $R4/mmm$ и структурному типу $L1_0$ [4–6]. Расположение атомов в γ -фазе аналогично сверхструктуре $CuAu$. Кроме этих двух типов алюминидов в литературе отмечаются соединения, особенностью которых служат узкие области гомогенности – $TiAl_2$, $TiAl_3$. Зафиксированные экспериментально интерметаллиды типа Ti_5Al_3 , Ti_5Al_{11} , Ti_9Al_{23} являются метастабильными [4]. Возможности образования множества фаз, в том числе неустойчивых,

существенно осложняют анализ системы Ti-Al. Имеющиеся в современной литературе данные не позволяют делать однозначных выводов о структурных преобразованиях, происходящих при реализации различных технологических процессов обработки титан-алюминиевых сплавов.

Вопрос о возможности использования алюминидов титана в качестве конструкционных материалов обсуждается уже более полувека. Наиболее активно исследования этих материалов проводятся в последние 20–25 лет. Большой интерес к соединениям типа Ti_3Al и $TiAl$ обусловлен комплексом характерных для них свойств. Наиболее важными свойствами являются малая плотность и достаточно высокий уровень прочности, что особенно важно для авиастроения. По данным специалистов алюминиды титана могут быть конкурентоспособными по сравнению с жаропрочными сплавами, предназначенными для эксплуатации при температурах 600...800 °C [7]. Интерметаллические соединения на основе сплавов Ti-Al относят к материалам нового поколения – суперсплавам [4, 8].

Кроме комплекса достоинств, определяющих широкие перспективы промышленного применения алюминидов титана, эти материалы имеют ряд характерных недостатков. Один из наиболее значительных – это низкие показатели пластичности и трещиностойкости при температурах, близких к комнатной. Для решения этой проблемы предложены различные решения, большинство из которых основаны на введении в титано-алюминиевые сплавы дополнительных элементов, например хрома, марганца и ванадия [9, 10]. В то же время легирование позволяет улучшить высокотемпературные свойства алюминидов титана. Так, добавление ниобия, молибдена и тантала в интерметаллидные сплавы приводит к росту их жаростойкости и сопротивления ползучести [9, 10]. Предполагается, что комплекс свойств анализируемых сплавов, в том числе и показателей пластичности, может быть улучшен путем формирования структуры слоистого типа [11]. Дополнительные возможности обеспечивает технология искрового плазменного спекания [12].

Одним из технических решений, позволяющих рационально использовать возможности интерметаллидов, является формирование моди-

фицированных алюминием поверхностных слоев на заготовках из титановых сплавов. Разработанные к настоящему времени технологические процессы позволяют получать интерметаллидные слои различной толщины [13–17]. В тех случаях, когда речь идет о необходимости формирования с высокой производительностью слоев повышенной толщины на титановых заготовках, наиболее отчетливо проявляются преимущества технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей [18]. Отличительная особенность этой технологии – возможность вывода концентрированного пучка электронов на воздух и обработка заготовок вне вакуумной камеры, что резко сокращает время, необходимое на установку и смену изделий.

Цель настоящей работы заключается в изучении структуры, микротвердости и триботехнических свойств поверхностных слоев, полученных путем наплавки алюминия на титановые заготовки с использованием электронного пучка, выведенного в воздушную атмосферу.

Материалы и методы исследования

Заготовками, на которых формировались поверхностно легированные слои, были пластины размерами 100×50×12 мм из технически чистого титана BT1-0 (0,16 % вес. Al; 0,009 вес. % C; 0,12 % вес. Fe; 0,007 % вес. Cr; 0,014 % вес. Ni; остальное – Ti). Функцию наплавляемых материалов выполняли порошковые смеси, в состав которых входили металлические компоненты и флюс (табл. 1). Присутствие флюса обеспечивало защиту нагретого до высоких температур материала, особенности расплава, от воздействия газов, находящихся в воздушной атмосфере. При выполнении всех технологических экспери-

ментов флюсом служило соединение LiF. Экспериментально установлено, что защита расплава является эффективной в тех случаях, если флюс составляет примерно половину от объема наплавляемой порошковой смеси.

Металлическими компонентами, которые вводились в порошковые смеси, служили алюминий и титан. С целью варьирования структурой и свойствами наплавляемых материалов было приготовлено пять типов порошковых смесей с различным соотношением титана и алюминия. Максимальное содержание титана в одной насыпке составляло 51 г, минимальное содержание алюминия – 5 г. Сплав, полученный при наплавке этой смеси, обозначен символами Ti-Al(51/5). Наибольшую весовую долю алюминия имел сплав Ti-Al (10/35) (см. табл. 1). Задача, связанная с расчетом содержания легирующих компонентов в поверхностно легированных слоях, не имеет однозначного решения. На конечный результат влияют такие факторы, как содержание алюминия и титана в исходной смеси, потеря исходных компонентов в процессе ускоренного нагрева порошков концентрированным электронным лучом, диффузионное взаимодействие компонентов, входящих в наплавочную смесь и основной металл, неоднородность перемешивания материала.

Наплавку порошковых материалов на титановые пластины осуществляли в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН на ускорителе электронов ЭЛВ-6. Схематически процесс представлен на рис. 2. В процессе обработки электронный луч, выведенный из ускорителя в воздушную атмосферу, воздействовал на порошковую смесь, которая была нанесена на титановую заготовку в количестве 0,45 г/см². Расстояние от выпускного отверстия до заготов-

Таблица 1

Состав порошковых смесей и содержание алюминия в наплавленном слое

Образец		Содержание элемента в исходной насыпке, г			Содержание алюминия в наплавленном слое, % (мас.)
Номер образца	Обозначение	Ti	Al	LiF	
1	Ti-Al(10/35)	10	35	55	59,3
2	Ti-Al(25/25)	25	25	50	40,0
3	Ti-Al(32/20)	32	20	48	29,4
4	Ti-Al(38/15)	38	15	47	23,7
5	Ti-Al(51/5)	51	5	44	6,7

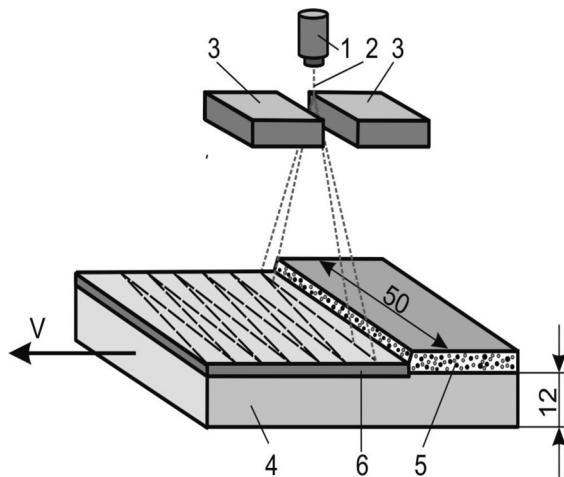


Рис. 2. Схема электронно-лучевой наплавки алюминиево-титановой смеси на заготовки из сплава ВТ1-0:

- 1 – выпускное отверстие; 2 – пучок электронов;
- 3 – полюсы электромагнитной развертки; 4 – титановая заготовка; 5 – наплавляемый порошок;
- 6 – наплавленный слой

ки с распределенной по ней порошковой смесью составляло 90 мм. В этих условиях диаметр пучка электронов на обрабатываемой поверхности равен 12 мм. С целью обработки заготовки по всей ее ширине осуществлялось сканирование луча с частотой 50 Гц. При наплавке всех порошковых материалов технологические режимы были одинаковы. Ток пучка составлял 18 мА, скорость перемещения заготовок относительно выпускного отверстия – 10 мм/с.

Основные задачи, поставленные при выполнении работы, предполагали проведение структурных исследований, определение микротвердости и оценку триботехнических свойств наплавленных материалов.

Строение наплавленных слоев в поперечных сечениях изучали с использованием растрового двухлучевого электронно-ионного микроскопа Cross Beam 1540 EsB (Carl Zeiss). Шлифы для исследований были подготовлены по стандартной технологии, включающей операции механического шлифования и полирования заготовок, предварительно запрессованных на установке Simplimet 1000 (Buehler) в полимерную матрицу. Для выявления структуры использовали химический травитель, состав которого состоял из 25 мл H_2O , 50 мл глицерина, 25 мл HNO_3 , 2 мл HF .

Тонкую структуру полученных материалов изучали с использованием просвечивающего электронного микроскопа Tescan 20 G2 TWIN (FEI). Объектами исследования были фольги, полученные с применением установок Dimple Grinder (Gatan) и Precision ion polishing system (Gatan). Для проведения рентгеноструктурного анализа поверхностно легированных слоев использовали дифрактометр ARL X'TRA. Съемку рентгенограмм выполняли при использовании $Cu K\alpha_{1,2}$ -излучения. Шаг сканирования составлял $0,05^\circ$, время накопления импульсов было равно 2 с на одну точку.

Для оценки твердости материалов использовали прибор 402MVD (Wolpert Group), оснащенный алмазной четырехгранной пирамидой. В качестве объектов исследования использовали поперечные шлифы. Нагрузка на индентор составляла 0,98 Н. Отпечатки наносили перпендикулярно поверхности покрытия в направлении от поверхности к основному металлу.

Триботехнические свойства наплавленных материалов оценивали по величине коэффициента трения скольжения при реализации схемы «диск – плоскость», а также по уровню износостойкости в условиях воздействия закрепленных частиц абразива. В процессе первого из отмеченных видов испытаний диск диаметром 50 мм и толщиной 5 мм, изготовленный из стали твердостью 62 HRC, вращался со скоростью 200 об/мин и прижимался с усилием 850 Н к исследуемому образцу. Испытания были проведены в условиях сухого трения скольжения, а также при подаче в зону взаимодействия трущихся тел минерального моторного масла Лукойл Стандарт 10W-40 (SF/CC).

Исследования на износостойкость при воздействии закрепленных частиц абразива были проведены с учетом требований ГОСТ 17367–71. В соответствии со схемой испытаний, представленной на рис. 3, цилиндрический образец диаметром 2,5 мм с силой 8 Н прижимался к вращающемуся со скоростью 100 об/мин кругу с закрепленной на нем электрокорундовой шлифовальной шкуркой. Размер абразивных зерен, закрепленных на шкурке, находился в диапазоне от 63 до 80 мкм. Функцию эталонного материала выполняли образцы из технически чистого титана.

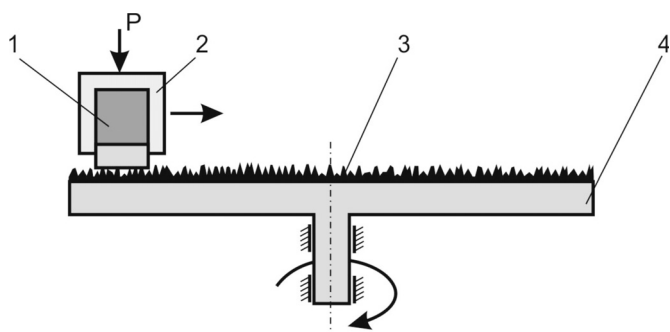


Рис. 3. Схема испытания материалов на изнашивание в условиях воздействия закрепленных частиц абразива:

1 – образец с покрытием; 2 – держатель образца; 3 – абразивная шкурка; 4 – стальной диск

Результаты исследований и их обсуждение

Экспериментальные данные, полученные методом рентгеноструктурного анализа, свидетельствуют о том, что за исключением сплава, обозначенного символом Ti-Al(51/5), основной структурной составляющей в остальных четырех сплавах, представленных в табл. 1, является алюминид титана типа Ti_3Al (рис. 4). В сплаве Ti-Al(51/5), соответствующем минимальному содержанию алюминия в исходном порошке, зафиксирована лишь α -фаза, представляющая собой твердый раствор алюминия в ГПУ решетке титана. Анализ дифрактограммы, полученной при исследовании сплава с максимальным содержанием алюминия (Ti-Al(10/35)), свидетельствует о присутствии в наплавленном слое алюминид титана $TiAl$.

Металлографический анализ показал, что при уменьшении содержания алюминия размер зёрен, выделившихся в процессе первичной кристаллизации, становится мельче. Примеры тонкого строения наплавленных слоев, зафиксированных с использованием растрового

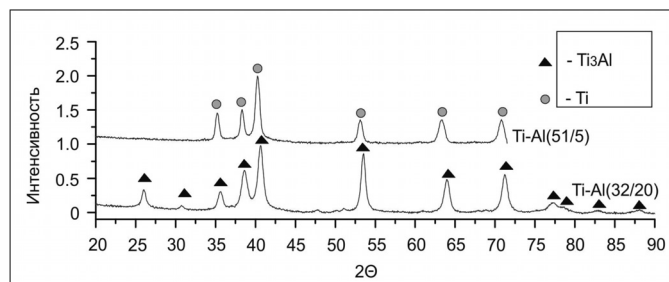


Рис. 4. Рентгенограммы, соответствующие образцам Ti-Al(51/5) и Ti-Al(32/20)

и просвечивающего электронных микроскопов, отражены на рис. 5. Характерной особенностью снимков, соответствующих наплавленным слоям с интерметаллидной структурой, является их пластинчатое строение (рис. 5, а, б).

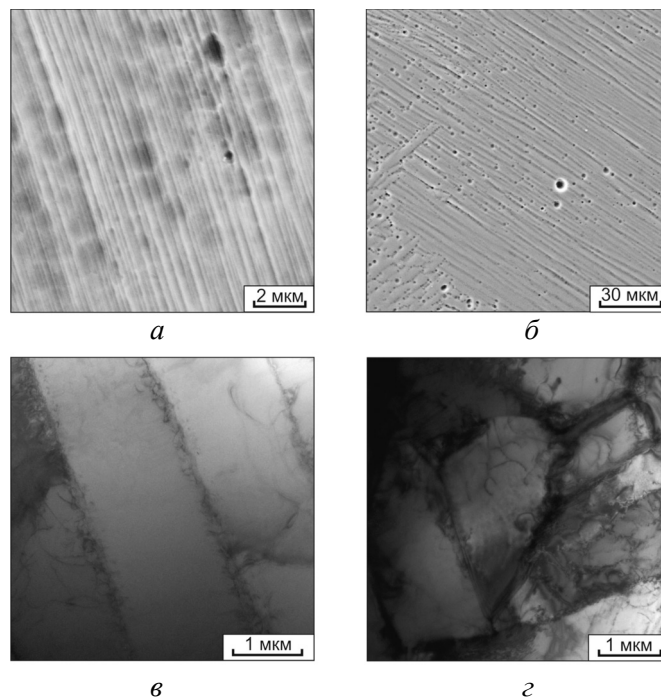


Рис. 5. Тонкое строение поверхностных слоев на образцах Ti-Al(10/35) (а, б); Ti-Al(25/25) (в); Ti-Al(51/5) (г)

Результаты металлографических исследований, а также данные, полученные при оценке микротвердости поверхностно легированных материалов, позволяют надежно зафиксировать глубину наплавленных слоев. Скачки твердости, наблюдаемые на рис. 6, соответствуют переходу от покрытий к основному металлу. Анализ экс-

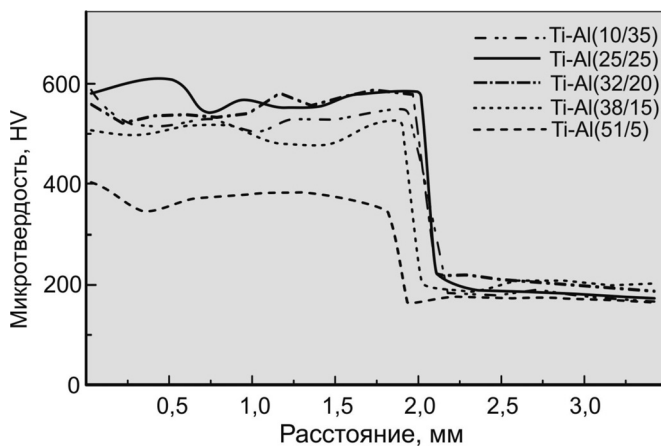


Рис. 6. Характер изменения микротвердости материалов после вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошков

периментальных данных свидетельствует о том, что толщина зон, подвергнутых переплаву электронным лучом, составляет примерно 2 мм.

Свойства поверхностных слоев зависят от содержания алюминия и титана в порошковой смеси, которые, в свою очередь, определяют фазовый состав наплавленных материалов. В исходном состоянии микротвердость титана BT1-0 составила ~ 200 HV. Легирование алюминием позволило резко повысить уровень его прочностных свойств. Максимальный уровень микротвердости (~ 540...610 HV) зафиксирован при изучении образцов Ti-Al (25/25) и Ti-Al (32/20). Данные рентгенофазового анализа свидетельствуют о том, что такой уровень свойств обеспечивается присутствием в сплавах алюминидов титана Ti_3Al . Микротвердость сплава Ti-Al (51/5), структуру которого представляет твердый раствор алюминия в решетке α -титана, по сравнению с другими полученными в работе материалами минимальна (350-400 HV). Образцы типа Ti-Al(32/20) и Ti-Al(38/15) характеризуются как промежуточные между указанными значениями микротвердости.

На рис. 7 показаны результаты испытаний наплавленных материалов на износостойкость в условиях воздействия закрепленных абразивных частиц. Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о наличии тесной корреляции между показателями относительной износостойкости и уровнем микротвердости

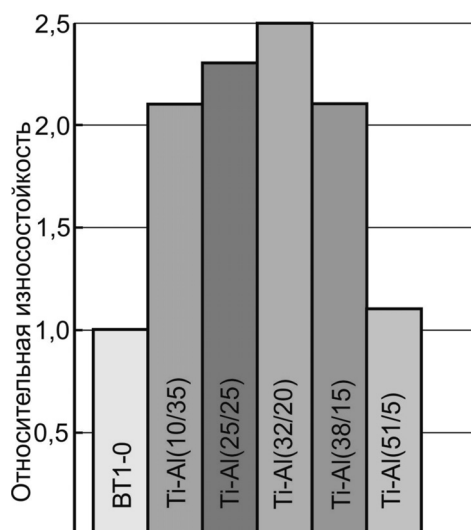


Рис. 7. Относительная износостойкость материалов в условиях трения о закрепленные частицы абразива

анализируемых материалов. Наиболее твердые материалы Ti-Al(25/25) и Ti-Al(32/20) характеризуются максимальной износостойкостью. Относительная износостойкость этих сплавов примерно в 2,5 раза выше по сравнению с технически чистым титаном BT1-0. Минимальный уровень износостойкости зафиксирован при испытаниях образца Ti-Al(51/5), характеризующегося структурой α -Ti и наиболее низкими значениями твердости.

Одним из качеств, характерных для титана и ограничивающих его применение как материала конструкционного назначения, является высокий уровень коэффициента трения в условиях трения скольжения. В соответствии с экспериментальными данными даже в присутствии смазки коэффициент трения образцов из сплава BT1-0 составляет 0,32...0,36. Проведенные триботехнические испытания свидетельствуют о существенном улучшении свойств сплавов, легированных алюминием. В табл. 2 приведены значения коэффициентов трения для четырех материалов при их испытаниях в присутствии смазки. Анализ представленных данных позволяет сделать вывод о том, что лучшими свойствами обладают образцы из сплава Ti-Al(10/35). По сравнению с технически чистым титаном коэффициент трения этого материала в 34 раза ниже.

Представленные в таблице количественные показатели антифрикционных свойств хорошо согласуются с данными, полученными при исследовании топографии изношенных в процессе трения образцов (рис. 8). Для поверхностей трения на образцах из титана BT1-0 характерны такие особенности, как присутствие глубоких бороздок, задиров, напылов металла, каверн (рис. 8, а). Возникновение дефектов этого типа обусловлено малой толщиной окислов на титановых заготовках, проявлением эффекта микросварки в холодном состоянии, схватыванием взаимодействующих в процессе трения тел. Поверхности изнашивания образцов, легирован-

Таблица 2

Коэффициент трения материалов при испытаниях в присутствии смазки

Материал			
BT1-0	Ti-Al (10/35)	Ti-Al (25/25)	Ti-Al (32/20)
0,32...0,36	0,08...0,13	0,20...0,25	0,28...0,29

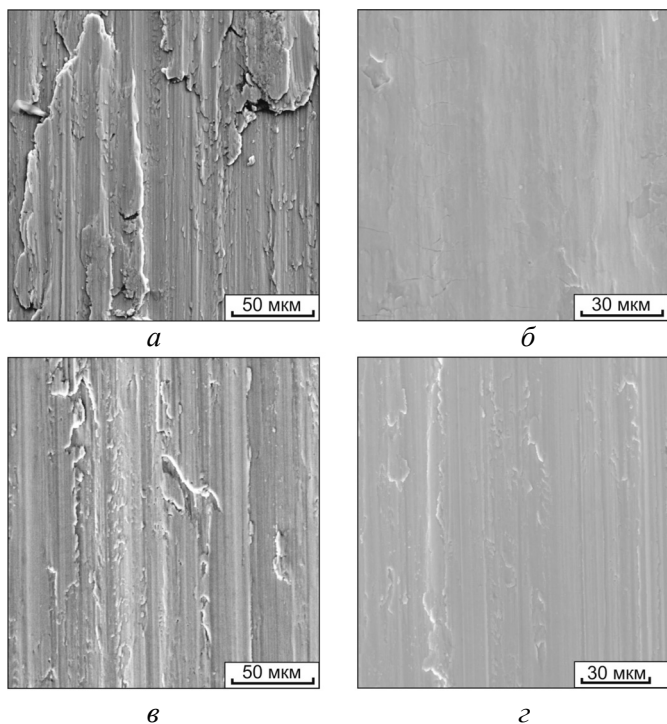


Рис. 8. Морфология поверхностей трения образцов:

a – титан VT1-0 без смазки; *б* – Ti-Al(32/20) со смазкой;
в – Ti-Al(10/35) без смазки; *г* – Ti-Al(10/35) со смазкой

ных алюминием, менее дефектны. Основным структурным фактором, определяющим улучшение триботехнических свойств титана в результате легирования его алюминием, считается присутствие в поверхностных слоях образцов алюминидов титана. Соединения Ti_3Al и $TiAl$, обладающие набором физических, химических и механических свойств, обеспечивают более высокий комплекс триботехнических характеристик, что делает эти материалы намного более предпочтительными по сравнению с титаном для изготовления конструктивных элементов, эксплуатация которых связана с процессами трения и изнашивания.

Заключение

Методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей, содержащих алюминий, на плоских заготовках из технического чистого титана сформированы поверхностно упрочненные слои толщиной ~ 2 мм. Максимальный уровень микротвердости поверхностно легированных материалов достигает ~ 600 HV. Основным структурным фактором, обеспечивающим рост прочностных свойств материалов

наплавленных слоев, является формирование алюминидов титана Ti_3Al . В зависимости от содержания алюминия в исходной порошковой смеси и в поверхностных слоях фазами, образующимися в наплавленных материалах, являются твердый раствор алюминия в α -титане, α_2 -фаза (Ti_3Al) и γ -фаза ($TiAl$). Триботехнические свойства разработанных материалов существенно превышают аналогичные показатели сплава VT1-0. В условиях трения о закрепленные частицы абразива уровень относительной износостойкости наплавленных материалов коррелирует с их твердостью. При испытаниях по схеме трения скольжения лучшими свойствами обладают образцы из сплава Ti-Al(10/35). По сравнению с технически чистым титаном коэффициент трения этого материала в 3–4 раза ниже.

Список литературы

1. Murray J.L. The Al-Ti (aluminum-titanium) system // Phase Diagrams of Binary Titanium Alloy. – Materials Park, Ohio: ASM International, 1987. – P. 12–24. – ISBN 0871702487. – eISBN 9780871702487.
2. Schuster J.C., Palm M. Reassessment of the binary aluminum-titanium phase diagram // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2006. – Vol. 27, iss. 3. – P. 255–277. – doi: 10.1361/154770306X109809.
3. Mishin Y., Herzig Chr. Diffusion in the Ti-Al system // Acta Materialia. – 2000. – Vol. 48, iss. 3. – P. 589–623. – doi: 10.1016/S1359-6454(99)00400-0.
4. Кристаллогеометрические и кристаллохимические закономерности образования бинарных и тройных соединений на основе титана и никеля: монография / А.А. Клопотов, А.И. Потеекаев, Э.В. Козлов, Ю.И. Тюрин, К.П. Арефьев, Н.О. Солоницина, В.Д. Клопотов; под общ. ред. А.И. Потеекаева. – 2-е изд., стер. – М.: Флинта, 2011. – 312 с. – ISBN 978-5-9765-1214-6.
5. Sahu P. Lattice imperfections in intermetallic Ti-Al alloys: an X-Ray diffractions study of the microstructure by the Rietveld method // Intermetallics. – 2006. – Vol. 14. – P. 180–188. – doi: 10.1016/j.intermet.2005.05.004.
6. Frobel U., Appel F. Strain ageing in γ (TiAl)-based titanium aluminides due to antisite atoms // Acta Materialia. – 2002. – Vol. 50. – P. 3693–3707. – doi: 10.1016/S1359-6454(02)00182-9.
7. Иванов В.И., Ясинский К.К. Эффективность применения жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов Ti_3Al и $TiAl$ для работы при температурах 600–800 °С в авиакосмической технике // Технология легких сплавов. – 1996. – № 3. – С. 63–68.

8. Суперсплавы II: жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. В 2 кн.: пер. с англ. / под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля. – М.: Металлургия, 1995.
9. *Huang S.C.* Alloying considerations in gamma-based alloys // The 1st International Symposium on Structural Intermetallics, Champion, PA, 26–30 September 1993: proceedings. – Champion, PA: TMS, 1993. – P. 299–308. – ISBN 0-87339-253-1.
10. *Appel F., Paul J.D.H., Oehring M.* Gammatitanium aluminide alloys: science and technology. – Weinheim: Wiley-VCH, 2011. – 745 p. – ISBN 9783527315253. – eISBN 9783527636204. – doi: 10.1002/9783527636204.
11. Explosively welded multilayer Ti-Al composites: structure and transformation during heat treatment / D.V. Lazurenko, I.A. Bataev, V.I. Mali, A.A. Bataev, Iu.N. Maliutina, V.S. Lozhkin, M.A. Esikov, A.M.J. Jorge // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 102. – P. 122–130. – doi: 10.1016/j.matdes.2016.04.037.
12. Metal-intermetallic laminate Ti-Al₃Ti composites produced by spark plasma sintering of titanium and aluminum foils enclosed in titanium shells / D. Lazurenko, V. Mali, I. Bataev, A. Thoenmes, A. Bataev, A. Popelukh, A. Anisimov, N. Belousova // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2015. – Vol. 46, iss. 9. – P. 4326–4334. – doi: 10.1007/s11661-015-3002-5.
13. *Miyake M., Tajikara S., Hirato T.* Fabrication of TiAl₃ coating on TiAl-based alloy by Al electrodeposition from dimethylsulfone bath and subsequent annealing // *Surface and Coatings Technology*. – 2011. – Vol. 205, iss. 21–25. – P. 5141–5146. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.05.019.
14. *Parlikar C., Alam M.Z., Das D.K.* Effect of Al₃Ti diffusion aluminide coating on tensile properties of a near α -Ti alloy // *Materials Science and Engineering: A*. – 2011. – Vol. 530. – P. 565–573. – doi: 10.1016/j.msea.2011.10.021.
15. *Leyens C., Peters M., Kaysser W.A.* Intermetallic Ti-Al coatings for protection of titanium alloys: oxidation and mechanical behavior // *Surface and Coatings Technology*. – 1997. – Vol. 94–95. – P. 34–40. – doi: 10.1016/S0257-8972(97)00472-6.
16. In situ synthesis of titanium-aluminides in coating with supersonic free-jet pvd using ti and al nanoparticles / A. Yumoto, F. Hiroki, I. Shiota, N. Niwa // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – Vol. 169–170. – P. 499–503. – doi: 10.1016/S0257-8972(03)00152-X
17. Laser cladding of γ -TiAl intermetallic alloy on titanium alloy substrates / Iu.N. Maliutina, H. Si-Mohand, R. Piolet, F. Missemer, A.I. Popelyukh, N.S. Belousova, Ph. Bertrand // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2014. – Vol. 47, iss. 1. – P. 378–387. – doi: 10.1007/s11661-015-3205-9.
18. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum / M.G. Golkovski, I.A. Bataev, A.A. Bataev, A.A. Ruktuev, T.V. Zhuravina, N.K. Kusanov, R.A. Salimov, V.A. Bataev // *Materials science and Engineering: A*. – 2013. – Vol. 578. – P. 310–317. – doi: 10.1016/j.msea.2013.04.103.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (74), January – March 2017, Pages 51–60

Surface alloying of titanium with aluminium by non-vacuum electron beam cladding of powder mixtures

Bataev I.A.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ivanbataev@ngs.ru

Lazurenko D.V.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: pavlyukova_87@mail.ru

Golkovski M.G.², Ph.D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, e-mail: mikhail.golkowsky@yandex.ru

Laptev I.S.¹, Ph.D. student, e-mail: ilya_laptev_nstu@mail.ru

Chakin I.K.², Research Engineer, e-mail: tchakin.ivan@yandex.ru

Ivanchik I.S.³, Head of Laboratory, e-mail: ivanchik.ilya@yandex.ru

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

²Budker Institute of Nuclear Physics, 11 akademika Lavrentieva prospect, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³Siberian State University of Water Transport, 33 Schetinkina st., Novosibirsk, 630099, Russian Federation

Abstract

Titanium aluminides are promising materials for structural and high temperature applications. They possess low density and a high strength level which are very important properties for the aircraft. However, they have a range of disadvantages. Among them, there are low plasticity and crack growth resistance. One of the solutions which allow making use of beneficial properties of intermetallics consists in the formation of intermetallic layers on the surface of metallic samples. In this study the method of non-vacuum electron beam cladding of powder mixtures consisted of aluminium and titanium was used to obtain the surface layers reinforced with intermetallics on cp-titanium workpieces. Microstructure, microhardness and tribological properties of surface alloyed materials were investigated. An average thickness of coatings was about 2 mm. The microstructure of coatings was characterized mainly by formation of lamellar crystals. The maximum microhardness level of the coatings was about 600 HV. The reasons of microhardness increase consisted in the formation of titanium aluminides and action of the solid solution hardening mechanism. Phase composition of different clads varied from γ -TiAl to α -Ti according to Al percentage in the powder mixture. In comparison with cp-titanium the obtained materials possessed a lower level of a friction coefficient and a lower tendency to adhesion at a contact with a steel indenter. The best results obtained in the process of a sliding friction test were obtained for the Ti-Al(10/35) sample. It possessed 3-4-fold decrease of a friction coefficient compared to pure titanium. Relative wear resistance values obtained during interaction of samples with fixed abrasive particles correlated with their microhardness.

Keywords

titanium aluminides; electron beam cladding; structure; properties.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-51-60

References

1. Murray J.L. The Al-Ti (aluminum-titanium) system. *Phase Diagrams of Binary Titanium Alloy*. Materials Park, Ohio, ASM International, 1987, pp. 12–24. ISBN 0871702487. eISBN 9780871702487.
2. Schuster J.C., Palm M. Reassessment of the binary aluminum-titanium phase diagram. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2006, vol. 27, iss. 3, pp. 255–277. doi: 10.1361/154770306X109809
3. Mishin Y., Herzig Chr. Diffusion in the Ti-Al system. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, iss. 3, pp. 589–623. doi: 10.1016/S1359-6454(99)00400-0
4. Klopotov A.A., Potekaev A.I., Kozlov E.V., Tyurin Yu.I., Aref'ev K.P., Solonitsina N.O., Klopotov V.D. *Kristallogeometricheskie i kristalloghimicheskie zakonomernosti obrazovaniya binarnykh i troinykh soedinenii na osnove titana i nikelya* [Crystal geometry and crystal pattern formation of binary and ternary titanium and nickel based compounds]. 2nd ed. Moscow, Flinta Publ., 2011. 312 p. ISBN 978-5-9765-1214-6.
5. Sahu P. Lattice imperfections in intermetallic Ti-Al alloys: an X-Ray dif-fractions study of the microstructure by the Rietveld method. *Intermetallics*, 2006, vol. 14, pp. 180–188. doi: 10.1016/j.intermet.2005.05.004
6. Frobel U., Appel F. Strain ageing in γ (TiAl)-based titanium aluminides due to antisite atoms. *Acta Materialia*, 2002, vol. 50, pp. 3693–3707. doi: 10.1016/S1359-6454(02)00182-9
7. Ivanov V.I., Yasinskii K.K. Effektivnost' primeneniya zharoprochnykh splavov na osnove intermetallidov Ti₃Al i TiAl dlya raboty pri temperaturakh 600–800 °C v aviakosmicheskoi tekhnike [The effectiveness of heat-resistance alloys based on Ti₃Al and TiAl intermetallics for operation at 600–800 °C in aerospace engineering]. *Tekhnologiya legkikh splavov – Technology of light alloys*, 1996, no. 3, pp. 63–68.
8. Sims Ch.T., Stoloff N.S., Hagel W.C., eds. *Superalloys II: heat-resistant materials for the aerospace and industrial power plants*. New York, Wiley, 1987 (Russ. ed.: *Supersplavy II: zharoprochnye materialy dlya aerokosmicheskikh i promyshlennykh energostanovok*. V 2 kn. Ed. by Ch.T. Sims, N.S. Stoloff, U.K. Khagel'. Moscow, Metallurgiya Publ., 1995).
9. Huang S.C. Alloying considerations in gamma-based alloys. *The 1st International Symposium on Structural Intermetallics: proceedings*, Champion, PA, 26–30 September 1993, pp. 299–308. ISBN 0-87339-253-1.
10. Appel F., Paul J.D.H., Oehring M. *Gamma titanium aluminide alloys: science and technology*. Weinheim, Wiley-VCH, 2011. 745 p. ISBN 9783527315253. eISBN 9783527636204. doi: 10.1002/9783527636204
11. Lazurenko D.V., Bataev I.A., Mali V.I., Bataev A.A., Maliutina Iu.N., Lozhkin V.S., Esikov M.A., Jorge A.M.J. Explosively welded multilayer Ti-Al composites: structure and transformation during heat treatment. *Materials & Design*, 2016, vol. 102, pp. 122–130. doi: 10.1016/j.matdes.2016.04.037
12. Lazurenko D., Mali V., Bataev I., Thoemmes A., Bataev A., Popelukh A., Anisimov A., Belousova N. Metal-intermetallic laminate Ti-Al₃Ti composites produced by spark plasma sintering of titanium and aluminum

foils enclosed in titanium shells. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, vol. 46, iss. 9, pp. 4326–4334. doi: 10.1007/s11661-015-3002-5

13. Miyake M., Tajikara S., Hirato T. Fabrication of TiAl₃ coating on TiAl-based alloy by Al electrodeposition from dimethylsulfone bath and subsequent annealing. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 205, iss. 21–25, pp. 5141–5146. doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.05.019

14. Parlikar C., Alam M.Z., Das D.K. Effect of Al₃Ti diffusion aluminide coating on tensile properties of a near α -Ti alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 530, pp. 565–573. doi: 10.1016/j.msea.2011.10.021

15. Leyens C., Peters M., Kaysser W.A. Intermetallic Ti-Al coatings for protection of titanium alloys: oxidation and mechanical behavior. *Surface and Coatings Technology*, 1997, vol. 94–95, pp. 34–40. doi: 10.1016/S0257-8972(97)00472-6

16. Yumoto A., Hiroki F., Shiota I., Niwa N. In situ synthesis of titanium-aluminides in coating with supersonic free-jet pvd using ti and al nanoparticles. *Surface and Coatings Technology*, 2003, vol. 169–170, pp. 499–503. doi: 10.1016/S0257-8972(03)00152-X

17. Maliutina Iu.N., Si-Mohand H., Piolet R., Missemer F., Popelyukh A.I., Belousova N.S., Bertrand Ph. Laser cladding of γ -TiAl intermetallic alloy on titanium alloy substrates. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, vol. 47, iss. 1, pp. 378–387. doi: 10.1007/s11661-015-3205-9

18. Golkovski M.G., Bataev I.A., Bataev A.A., Ruktuev A.A., Zhuravina T.V., Kuksanov N.K., Salimov R.A., Bataev V.A. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum. *Materials science and Engineering: A*, 2013, vol. 578, pp. 310–317. doi: 10.1016/j.msea.2013.04.103

Funding

This work was supported by RFBR, research project No. 15-38-20776 mol_a_ved.

Article history

Received 16 December 2016

Revised 17 January 2017

Accepted 15 February 2017

Рекомендации по написанию научной статьи

Оформление русскоязычной части статьи, подаваемой в научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)», должно соответствовать по стилю и содержанию определенным минимальным требованиям еще до того, как она будет принята на рассмотрение для публикации. Статьи, не соответствующие этим минимальным требованиям, получают мотивированный отказ редактора – их даже не отправляют на рассмотрение в редакционный совет. Вопросы новизны и оригинальности исследования решаются авторами статьи.

Отметим одно необходимое условие, сформировавшееся за время работы в журнале, – нельзя подавать на рассмотрение работу, которая предварительно не прошла оценки качества самим автором (и научным руководителем в случае недостаточного опыта автора в подготовке научных статей). Кроме того, текст должен быть внимательно прочитан всеми авторами (а не одним автором, как это зачастую бывает), так как все авторы несут коллективную ответственность за содержание работы.

1. Общие комментарии

Пишите доходчивым и простым языком – абстрактные формулировки и излишне длинные фразы трудны как для чтения, так и для понимания.

Статья не должна быть слишком длинной, даже если журнал не указывает максимального объема статьи. Пишите лаконично и грамотно, соблюдая правила написания по русскому языку.

Избегайте:

- неряшливости, например, многочисленных опечаток, небрежного стиля, маленьких иллюстраций, уравнений с ошибками и др.;
- длинного текста (абзаца), содержащего избыточные высказывания.

Научная статья должна иметь определенную структуру, которая описана ниже.

2. Заглавие и сведения об авторах

Используйте лаконичное описательное название, содержащее основные ключевые слова темы статьи. Перед заглавием обязательно указывается УДК.

После заглавия по порядку следуют И.О. ФАМИЛИЯ авторов, их ученая степень, ученое звание, в скобках указываются сокращенное название организации, город. Ниже – данные для переписки: Фамилия И.О. основного автора, почтовый адрес и полное название организации, e-mail.

3. Аннотация (реферат)

Аннотация содержит ключевые слова и представляет собой сжатый обзор содержания работы, указывает на основные проблемы, к которым обращается автор, на подход к этим проблемам и на достижения работы (не менее 10 строк).

4. Ключевые слова

Ключевые слова должны отображать и покрывать содержание работы. Ключевые слова служат профилем вашей работы для баз данных.

5. Введение

Раздел «Введение» должен быть использован для того, чтобы определить место вашей работы (подхода, данных или анализа). Подразумевается, что существует нерешенная или новая научная проблема, которая рассматривается в вашей работе. В связи с этим 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) 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 ^{31}P spectroscopy) are related to several pathophysiologic indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative ^{13}C -glucose turnover studies show a profound decrease in neurotransmitter (glutamate-glutamine) cycling relative to oxidation in the sclerotic hippocampus. Increased extracellular glutamate (which has long been associated with increased seizure likelihood) is significantly linked with declining energetics as measured by ^{31}PMR , as well as with increased EEG measures of Teager energy, further arguing for a direct role of glutamate with hyperexcitability.

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

Фрагменты из рекомендаций авторам журналов издательства Emerald

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

Авторское резюме включает следующее.

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

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

– следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;

– не включать несущественные детали;

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

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

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

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

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

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

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

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

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» публикует статьи, содержащие новые и оригинальные результаты исследований по следующим научным направлениям (рекомендованные ВАК): 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; 05.02.08 – Технология машиностроения; 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.09 – 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 – А4. Шрифт – *Times New Roman*, размер шрифта основного текста – 14 пт, параметры страницы – все поля 2 см. Выравнивание по ширине. Межстрочный интервал **полуторный**. Абзацный отступ – 1,25 см. Переносы включены. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть четкими и понятными, могут быть включены в текст статьи.

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

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

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

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

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

Научная публикация должна иметь следующую структуру

1. Заглавие (должно быть как можно короче и отражать содержание текста).

2. Аннотация:

• **на русском языке** на основе ГОСТ 7.995 – сжатый обзор содержания работы (по ГОСТ **не менее 10 строк, 850 знаков**), указывает на ключевые проблемы, на подход к этим проблемам и на достижения работы; следует применять значимые слова из текста статьи;

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

3. Ключевые слова (должны отображать содержание работы). На английском языке – использовать термины из контролируемых словарей.

4. Введение (1-2 стр., краткий обзор по состоянию проблемы с цитатами или ссылками на актуальную литературу; в конце раздела необходимо сформулировать цель или задачу нового исследования и то, как вы это сделали).

5. Теория (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать 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* описание этих публикаций.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ПРИМЕРЫ ССЫЛОК

Описание статьи из журналов:

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

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

Описание статьи из электронного журнала:

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

Если статья имеет DOI – обязательно указать его!

Описание статьи с DOI:

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

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

Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

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

Описание материалов конференций:

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

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

Sen'kin A.V. [Issues of vibration diagnostics of elastic spacecraft]. *Problemy teorii i praktiki v inzhenernykh issledovaniyakh. Trudy 33 nauchnoi konferentsii RUDN* [Problems of the Theory and Practice of Engineering Research. Proc. Russ. Univ. People's Friendship 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 vozrozhdeniyu: prichiny i posledstviya razrusheniya SSSR [From disaster to rebirth: the causes and consequences of the destruction of the Soviet Union]. Moscow, HSE Publ., 1999. 381 p.

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

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

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

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

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

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

Описание переводной книги:

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

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

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

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

Описание неопубликованного документа:

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

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

Описание Интернет-ресурса:

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

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

Описание диссертации или автореферата диссертации:

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

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

Описание ГОСТа:

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

или

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

Описание патента:

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

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

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

Описание анонимных документов:

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

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

Code of Business Conduct of OJSC "LUKOIL". Available at: http://www.lukoil.ru/materials/doc/documents/lukoil_corp_code.pdf. (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.

Расширенная версия **ULTIMATE** для успеха в научной работе

Представляем коллекцию новых научных баз данных EBSCO.



Academic Search™ Ultimate



Applied Science & Technology
Source™ Ultimate



Business Source® Ultimate



Humanities Source™ Ultimate



Sociology Source™ Ultimate

Предоставьте
пользователям

• **БОЛЬШЕ** •

для максимально

успешной научной работы:

- **Больше** признанных научных журналов
- **Больше** научных журналов с экспертной оценкой
- **Больше** научных журналов, входящих в ведущие предметные указатели
- **Больше** международных материалов на разных языках со всего мира

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



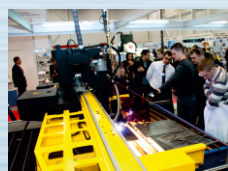
С 2014 научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» является организатором ежегодной (третья декада марта) Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении»/ «Actual Problems in Machine Building» совместно с «ИТЕ Сибирь» в рамках Международной выставки оборудования для металлообработки и сварки Masheх 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.

