

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309

№ 4 (69) ОКТЯБРЬ–ДЕКАБРЬ 2015 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



III Международная научно-практическая конференция
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ»
III International Scientific and Practical Conference
"ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING"
30 Марта/March 2016 г.
Подробная информация на странице 128

НОВОСИБИРСК

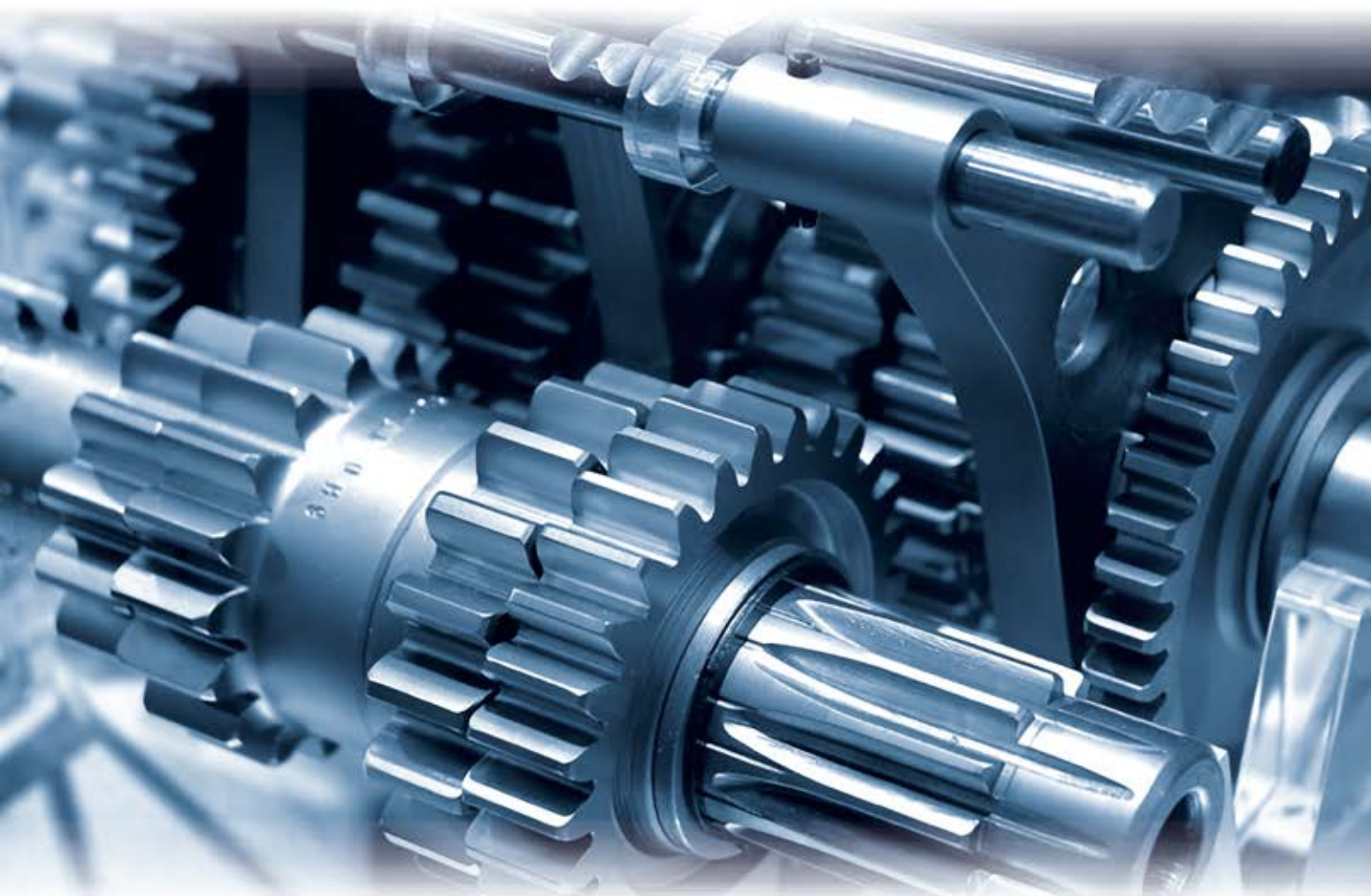


Международная выставка машиностроения
и металлообработки

29.03–01.04 2016

Россия, Новосибирск

mashex-siberia.ru



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

Генеральный
информационный партнер:
**СТАНОЧНЫЙ
ПАРК**

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309

№ 4 (69) ОКТЯБРЬ–ДЕКАБРЬ 2015 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

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

Члены совета

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

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

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

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

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

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

СОУЧРЕДИТЕЛИ

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Атапин Владимир Григорьевич – профессор,
доктор технических наук

Скиба Вадим Юрьевич – доцент, кандидат технических наук

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

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

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

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

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

Индекс: **70590** («РОСПЕЧАТЬ»)

Адрес редакции:

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

Тел. (383) 346-17-77

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

Смагин Г.И., Карманов В.С., Федин И.В. Использование базовой модели процесса сверления для нормирования режимов резания.....	6
---	---

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

Солер Я.И., Май Д.Ш. Выбор абразивных кругов при маятниковом шлифовании деталей из титанового сплава ВТ22 по высотным параметрам шероховатости.....	18
Вальтер А.В., Аксенов В.В., Бегляков В.Ю., Чазов П.А. Определение погрешности расположения секторов стабилизирующей секции геохода на основе данных координатного контроля.....	31
Лукина С.В. Формирование системы частных показателей для оценки качества режущего инструмента на этапе технической подготовки производства.....	43
Подгорный Ю.И., Скиба В.Ю., Кириллов А.В., Максимчук О.В., Лобанов Д.В., Глейм В.Р., Жигулев А.К., Саха О.В. Выбор конструктивных параметров несущих систем машин с учетом технологической нагрузки.....	51

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Малютина Ю.Н., Степанова Н.В., Черков А.Г., Чучкова Л.В. Сварка разнородных материалов с использованием промежуточных вставок, содержащих медь и тантал.....	61
Степанова Н.В., Батаев А.А., Ситников А.А., Осколкова Т.Н. Износостойкость заэвтектоидной стали, легированной медью и алюминием.....	72
Макаров А.В., Скорынина П.А., Осинцева А.Л., Юровских А.С., Саврай Р.А. Повышение трибологических свойств аустенитной стали 12Х18Н10Т наноструктурирующей фрикционной обработкой.....	80
Логинова М.В., Яковлев В.И., Ситников А.А., Иванов С.Г., Собачкин А.В., Негодяев А.З., Градобоев А.В. Влияние γ -облучения в малых дозах на структурное состояние механоактивированной смеси порошка состава Ti+Al.....	93
Кобзарева Т.Ю., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Будовских Е.А., Батаев В.А. Поверхностное упрочнение сплава ВТ6 электровзрывным легированием с карбидом бора и электронно-пучковой обработкой.....	102
Рекомендации по написанию научной статьи	113
Подготовка аннотации	116
Правила для авторов	119
III Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы в машиностроении». Информационное письмо.....	128

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 27.11.2015. Выход в свет 15.12.2015. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
 Усл. печ.л. 17,0. Уч.-изд. л. 31,62. Изд. № 242. Заказ 2. Тираж 300 экз.

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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ISSN 1994-6309

METAL WORKING and MATERIAL SCIENCE

Journal no.4 (69) October–December 2015

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

Editor of the English translation:

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

The magazine is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year

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

Edition address: Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,
Novosibirsk, 630073, Russia
Tel.: (383) 3461777
http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov
E-mail: metal_working@mail.ru

EDITORIAL COUNCIL

CHAIRMAN:

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

MEMBERS:

The Federative Republic of Brazil:

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

The Federal Republic of Germany:

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

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

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

The Republic of Belarus:

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

The Ukraine:

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

The Russian Federation:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CONTENTS

TECHNOLOGY

- Smagin G.I., Karmanov V.S., Fedin I.V.** Use of basic model of process of drilling for rationing of the modes of cutting of the hardly processed materials..... 6

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

- Soler Ya.I., Mai D.S.** Select of abrasive wheels while pendular grinding of parts from titanium alloy VT22 by high roughness parameters..... 18
- Walter A.V., Aksenov V.V., Beglyakov V.Yu., Chazov P.A.** Determining the error of location of geokhod stabilizing section sectors on the basis of coordinate measurement data..... 31
- Lukina S.V.** Formation of the system of the local indicators to assess the quality of the cutting tool at the stage of technical training of production..... 43
- Podgornyj Yu.I., Skeebe V.Yu., Kirillov A.V., Maksimchuk O.V., Lobanov D.V., Gleim V.R., Zhigulev A.K., Sakha O.V.** Selection of form factors of machine carrying systems in reliance on the process duty..... 51

MATERIAL SCIENCE

- Maliutina Iu.N., Stepanova N.V., Cherkov A.G., Chuchkova L.V.** Welding of dissimilar materials with interlayers employment containing copper and tantalum..... 61
- Stepanova N.V., Bataev A.A., Sitnicov A.A., Oskolkova T.N.** Wear resistance of hypereutectoid steel, alloy with copper and aluminum..... 72
- Makarov A.V., Skorynina P.A., Osintseva A.L., Yurovskikh A.S., Savrai R.A.** Improving the tribological properties of austenitic 12Kh18N10T steel by nanostructuring frictional treatment..... 80
- Loginova M.V., Yakovlev V.I., Sitnikov A.A., Ivanov S.G., Sobachkin A.V., Negodyaev A.Z., Grado-boev A.V.** Influence of low dose γ -irradiation on the structural state of mechanically activated powder mixtures of Ti + Al..... 93
- Kobzareva T.Yu., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V., Budovskikh E.A., Bataev V.A.** Surface hardening alloy VT6 of electroexplosion alloying with boron carbide and by electron beam treatment..... 102
- Guidelines for Writing a Scientific Paper 113
- Abstract requirements 116
- Rules for authors 119
- III International Scientific and Practical Conference "Actual problems in machine building". Information letter..... 128

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЗОВОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ДЛЯ НОРМИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

*Г.И. СМАГИН, канд. техн. наук, доцент
В.С. КАРМАНОВ, канд. техн. наук
И.В. ФЕДИН, магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 2 июля 2015

Рецензирование 3 августа 2015

Принята к печати 20 октября 2015

Смагин Г.И. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: g.smagin@ngs.ru

Предлагается методика нормирования режимов резания труднообрабатываемых материалов на примере операции сверления. Методика основана на применении новых моделей стойкости инструмента, хорошо согласующихся с результатами экспериментов, а также на построении характеристических линий и поверхностей для параметров процесса резания. Применение предложенной методики позволяет использовать закономерности экспериментальных стойкостей инструментов для различных участков факторного пространства режимов резания, что позволяет снизить количество трудоемких стойкостных экспериментов, повысить точность расчетов оптимальных режимов обработки и графическую наглядность принимаемых решений. В базовые факторы, влияющие на процесс резания, входят геометрические параметры инструмента, применяемый критерий стойкости инструмента, тип смазывающе-охлаждающей жидкости, способ крепления сверла, вылет сверла, глухое или сквозное отверстие, марка обрабатываемого материала, материал сверла, тип сверла и т.п. Методика позволяет рассчитывать как локальные оптимальные режимы резания по критерию минимума затрат, так и табличные режимы вдоль характеристической линии максимальных стойкостей для текущих значений минутных подач без учета затрат при обработке.

На основе предлагаемой методики разработан алгоритм планирования эксперимента для оценивания параметров выбранной стойкостной модели.

Для расчета оптимальных режимов сверления по критерию минимума затрат для широкого диапазона диаметров сверл (от 3 до 40 мм) и обрабатываемых материалов (с коэффициентом обрабатываемости материала от 0,2 до 1) разработан программный комплекс на основе предложенной методики.

Ключевые слова: сверление, режимы сверления, стойкость режущего инструмента, методика нормирования, характеристические линии, характеристические поверхности, планирование эксперимента, обрабатываемость материалов, поправочные коэффициенты, оптимизация, затраты.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-6-17

Введение

В традиционных методиках [1, 2] при нормировании, т. е. определении режимов резания, используются базовые стойкости инструментов. Для конкретного диаметра сверла рассматривается зависимость стойкости от двух факторов – скорости резания v , [м/с] (или частоты вращения n , [об/мин]) и подачи на оборот S_0 , [мм/об].

В современных стандартах используются степенные зависимости стойкости инструмента от режимов обработки [2, 3], хотя имеются исследования различных авторов [4–19], в которых предлагаются другие модели стойкости. В реальных экспериментах на всем поле факторного пространства поверхности отклика стойкости инструмента имеют выпуклый, холмообразный (одноэкстремальный) вид, тогда как степен-

ные зависимости дают вогнутые поверхности отклика, и расчет оптимального режима резания в этом случае становится неопределенной задачей из-за отсутствия экстремума стойкостной функции [20, 21]. Кроме того, расположение линий равного уровня минутных подач $S_M = S_0 n$ [мм/мин] на поле факторного пространства в традиционном нормировании обычно эквидистантно линиям равного уровня стойкостей, что также приводит к неопределенности при решении поставленной задачи. Поэтому за режим обработки на практике принимается режим на технологических ограничениях (режимы предельной прочности инструмента, предельные подачи инструмента по критерию максимальной шероховатости обрабатываемой поверхности и т. п.), что является малоэффективным решением для других условий обработки или режимов минимума затрат.

Алгоритм формирования банка данных рекомендуемых режимов резания в традиционном нормировании на первом этапе заключается в обработке результатов стойкостных экспериментов при определенных фиксированных условиях резания (материал сверла, вылет сверла, геометрия заточки, использование СОЖ, тип сверла) для обрабатываемого материала, который принимается за базис. При сравнении с другими материалами используется коэффициент обрабатываемости $K_{обр}$, за начальную базу принимаются условия [2], при которых принимают равным $K_{обр} = 1$ (за основу берется стойкость инструмента).

Целью данной статьи является описание новой методики нормирования режимов резания, ее базы, а также рекомендации по ее использованию, включая оптимизацию режимов по критерию минимума затрат, применения поправочных коэффициентов для условий обработки деталей, отличных от базовых условий.

Методика исследования процесса резания с использованием стойкостных экспериментов

В традиционной методике режимы резания определяются вдоль стойкостных линий равного уровня на поле двухфакторного пространства, определяемых степенными зависимостями в действующих стандартах. В предлагаемой

методике – вдоль характеристических линий и поверхностей, выявляемых при обработке стойкостных экспериментов (с учетом применения новых математических экспоненциальных моделей стойкости инструмента). При этом устраняется эффект неопределенности при назначении режима резания, характерный для традиционного нормирования. В этой методике используются стойкостные модели, хорошо согласующиеся с данными экспериментов, что, в свою очередь, позволяет снизить ошибки нормирования и шире использовать экстраполяционные возможности применяемых характеристических поверхностей. Кроме того, предлагаемая методика приводит к снижению общего количества трудоемких стойкостных экспериментов при оценивании параметров моделей и дает возможность при нормировании режимов обработки получать реально значимый экономический эффект.

В систему базовых моделей процесса резания включаются: стойкость инструмента L , [мм] – общая длина просверленных отверстий до момента затупления сверла; осевая сила $P_{ос}$, [Н]; крутящий момент $M_{кр}$, [Н×мм]; температура резания t , [°C]. Так же как и в традиционных методиках нормирования, основная роль отводится стойкости инструмента. От выбора модели стойкости во многом зависит качество и точность нормирования режимов резания.

В предыдущих работах авторов [20–22] в качестве базовой предлагается использовать экспоненциальную модель стойкости

$$L = A \exp \left\{ - \left(\frac{n - a_n}{b_n} \right)^2 - \left(\frac{S_0 - a_s}{b_s} \right)^2 \right\}. \quad (1)$$

Параметры модели имеют простой физический смысл: A – характеризует максимальное значение стойкости на поле факторного пространства; a_s, a_n – характеризуют координаты этого максимума стойкости; b_n, b_s – характеризуют полуоси эллипса стойкости на заданном уровне $A/2,73$ в координатах n, S_0 .

Оптимизация технологических условий обработки деталей включает в себя решение различных технологических, экономических, конструкторских и организационных задач. В качестве критериев оптимизации обычно принимают:

- критерий максимума стойкости режущего инструмента;

• критерий минимальной технологической себестоимости выполнения операции [23–25], например:

$$C_u = C_0 t_m + (t_m / T) \times \\ \times (C_0 t_{cs} + C_t) + C_0 (t_h + t_R) + C_m, \quad (2)$$

где C_u – производственная стоимость одной детали, [у.е.]; C_0 – операционная стоимость, [у.е./мин]; C_m – стоимость материала, [у.е./ед]; t_m – машинное время, [мин]; T – стойкость инструмента, [мин]; t_{cs} – время замены инструмента, [мин]; C_t – стоимость инструмента, [у.е.]; t_h – время загрузки и выгрузки, [мин]; t_R – быстрое время возврата, [мин];

• критерий максимальной производительности, обеспечивающий наименьшие затраты времени на обработку [23, 26], например:

$$P_t = t_m + (t_c) \frac{t_m}{T} + t_h, \quad (3)$$

где P_t – производственное время обработки одной детали, [мин]; t_m – время обработки заготовки, [мин]; $(t_c) \frac{t_m}{T}$ – время замены инструмента на одну деталь, [мин]; t_c – время однократной замены инструмента, [мин]; T – стойкость (время жизни) инструмента, [мин]; t_h – время закрепления инструмента, [мин].

При нахождении оптимальных режимов резания в качестве критерия оптимальности использовался критерий минимума затрат [27]:

$$Q(n, S_0) = \frac{C}{L(n, S_0)} + \frac{D}{S_0 n} + E, \quad (4)$$

где C , D , E – некоторые экономические параметры. К таким критериям можно отнести критерий минимума затрат, минимума себестоимости (единичного изделия, производственной линии, цеховой, заводской, отраслевой, что определяется экономическими параметрами C , D , E).

В работе [20] показано, что для некоторого класса моделей стойкости (выпуклые унимодальные) оптимальные режимы по критерию (4) лежат на линии, определяемой характеристическим уравнением

$$\frac{\partial L}{\partial n} n = \frac{\partial L}{\partial S_0} S_0. \quad (5)$$

К моделям такого класса относятся модели типа (1) и другие.

Характеристическая линия, определяемая уравнением (5), была названа кривой IIS_M и является линией, на которой расположены режимы максимальных стойкостей для текущих значений минутных подач [20, 21].

Для модели (1) характеристическая линия $\ll IIS_M$ имеет вид (рис. 1)

$$IIS_M : S_0(n) = \frac{a_s}{2} + \\ + \frac{1}{2b_n} \sqrt{b_n^2 a_s^2 - 4a_n b_s^2 n + 4b_s^2 n^2}. \quad (6)$$

На рис. 1 на поле двухфакторного пространства приведены линии равного уровня трех поверхностей – стойкость инструмента, минутные подачи и уровень затрат.

Эксперимент проводился при сверлении стали 1Х18Н9Т быстрорежущим сверлом из Р6М5 диаметром 4,2 мм, глубиной отверстия $2d$, вылетом сверла $10d$, отверстия глухие, с применением СОЖ НГЛ205, расходом 1 л/мин, критерий затупления – до поломки сверла или до характерного скрежета. Расчет затрат при обработке по уравнению (4) позволяет определять координаты режима минимума затрат, т. е. оптимальный режим. Этот режим (1660 об/мин; 0,065 мм/об) был получен при следующих параметрах: зарплата сверловщика – 20 тыс. руб/мес., зарплата заточника – 20 тыс. руб/мес., время на заточку инструмента – 5 мин, количество переточек до полного износа инструмента – 5, суммарная длина отверстий в изделии 16 760 мм, время на смену инструмента – 3 мин, покупная стоимость инструмента – 50 руб/шт.

В качестве третьего фактора, существенно влияющего на стойкость, был выбран диаметр сверла. Для различных диаметров сверл были построены регрессионные модели зависимостей параметров моделей (1) от диаметра. В результате эксперимента было установлено, что эти зависимости с приемлемой для практики точностью можно аппроксимировать логарифмически линейными моделями [22]

$$A = \alpha_A d^{\beta_A}, \quad a_n = \alpha_{an} d^{\beta_{an}}, \quad a_s = \alpha_{as} d^{\beta_{as}}, \\ b_n = \alpha_{bn} d^{\beta_{bn}}, \quad b_s = \alpha_{bs} d^{\beta_{bs}}, \quad (7)$$

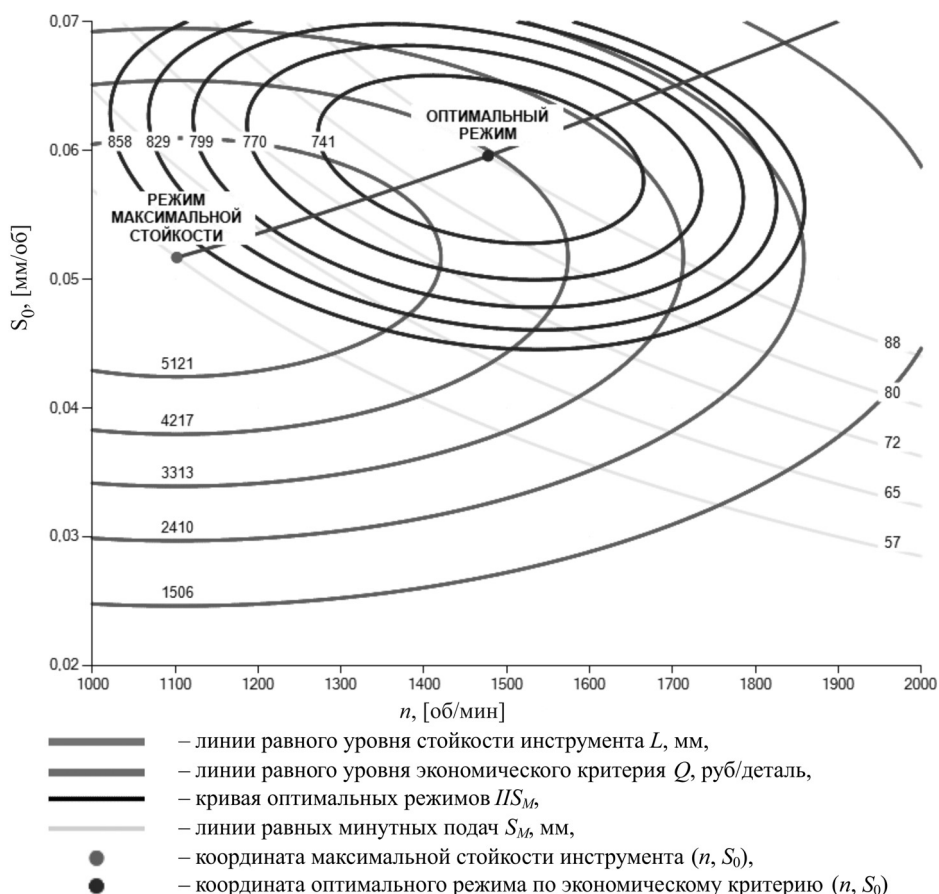


Рис. 1. Картина стойкости экспоненциальной модели и минутных подач. Коэффициент обрабатываемости материала $K_{обр} = 1$ (сталь 1Х18Н9Т), диаметр сверла $d = 4,2$ мм

и, таким образом, перейти к трехфакторной модели

$$L(n, S_0, d) = \alpha_A d^{\beta_A} \exp \times \left(- \left(\frac{n - \alpha_{an} d^{\beta_{an}}}{\alpha_{bn} d^{\beta_{bn}}} \right)^2 - \left(\frac{S_0 - \alpha_{as} d^{\beta_{as}}}{\alpha_{bs} d^{\beta_{bs}}} \right)^2 \right), \quad (8)$$

где $\alpha_A, \alpha_{an}, \alpha_{as}, \alpha_{bn}, \alpha_{bs}, \beta_A, \beta_{an}, \beta_{as}, \beta_{bn}, \beta_{bs}$ – параметры трехфакторной модели.

Другой характеристической линией является линия максимальных стойкостей для различных диаметров сверл для обрабатываемых материалов фиксированного коэффициента обрабатываемости, которую обозначим $L1$. Ее уравнение выглядит следующим образом:

$$L1 : S_0(n) = \alpha_{as} \left(\frac{n}{\alpha_{an}} \right)^{\beta_{as}}. \quad (9)$$

При нормировании режимов резания для материалов различной обрабатываемости необходимо строить регрессионные зависимо-

сти параметров трехфакторной модели (8) от $k = K_{обр}$. Опыты показывают, что показатели степени β_i изменяются незначимо, а для параметров α_i достаточно применения линейной регрессии $\alpha_i = k \tilde{\alpha}_i$, где $\tilde{\alpha}_i$ – скорректированный по результатам эксперимента коэффициент. При введении в модель нового фактора k можно перейти от характеристических линий IIS_M и $L1$ к характеристическим поверхностям $IIS_M - IIS_M$ и $L1 - L1$. Особо важное значение для нормирования режимов имеет поверхность $IIS_M - IIS_M$.

Уравнение поверхности $IIS_M - IIS_M$ имеет вид

$$IIS_M - IIS_M : S_0(n, d) = \frac{a_{sd} b_{nd} + \sqrt{(a_{sd} b_{nd})^2 - 4b_{sd}^2 a_{nd} n + 4b_{sd}^2 n^2}}{2b_{nd}}, \quad (10)$$

где $a_{sd} = \alpha_{as} d^{\beta_{as}}, a_{nd} = \alpha_{an} d^{\beta_{an}}; b_{nd} = \alpha_{bn} d^{\beta_{bn}}; b_{sd} = \alpha_{bs} d^{\beta_{bs}}$, а уравнение поверхности $L1 - L1$ имеет вид

$$L1 - L1 : \begin{cases} n = k\tilde{\alpha}_{an}d^{\beta_{an}}, \\ S_0 = k\tilde{\alpha}_{as}d^{\beta_{as}}. \end{cases} \quad (11)$$

Применение двух характеристических линий IIS_M и $L1$ и двух характеристических поверхностей $IIS_M - IIS_M$ и $L1 - L1$ позволяет завершить математическое описание «базы» нормирования режимов резания для широкого спектра материалов по их обрабатываемости и диаметров сверл.

Новым в предлагаемом нормировании режимов сверления является также применение плавающего индекса обрабатываемости материалов при изменении условия обработки.

Изменение условий обработки при определении режимов резания можно (как и в традиционном нормировании) учитывать с помощью существующего банка данных поправочных коэффициентов, хотя на сегодняшний день корректность их определения вызывает много вопросов. Это связано с тем, что эти коэффициенты определяются формально по условию сравнительных значений стойкостей при одинаковых режимах обработки, что не всегда хорошо соответствует экспериментальным данным. Следует отметить, что теории поправочных коэффициентов в резании металлов уделялось недостаточно внимания. Как показали стойкостные эксперименты, определение поправочных коэффициентов при обработке разных материалов необходимо делать не при одинаковых режимах резания, а на режимах одинаковых физических воздействий на инструмент для базового случая и для новых условий обработки. Опыты необходимо проводить на режимах одинаковых температурных и силовых воздействий на инструмент или на режимах максимальных стойкостей при обработке каждого материала, т. е. для разных материалов и одного и того же диаметра сверла будем иметь разные режимы обработки.

Базовые модели используются как для нормирования режимов обработки (табличное задание), так и для их оптимизации. Другая важная функция базовой модели – применение ее как условного эталона характеристик инструмента для сравнения их при исследованиях возможных улучшений различных параметров инструментов. Так-

же базовые модели используются при проектировании станков с системами управления со стабилизацией $M_{кр}$, $P_{ос}$ или $t^{\circ}C$ на инструменте и других способах обработки, где необходимы сравнительные стойкостные показатели. Исследования эффективности обработки с выбором различных СОТС (смазочно-охлаждающих технологических составов) также предполагают использование стойкостных моделей.

После определения коэффициентов моделей стойкости для базовых условий обработки и определения всех ее коэффициентов для сталей с обрабатываемостью от 0,2 до 1 также для базовых условий все остальные разнообразные условия обработки (режимы резания) обычно корректируются через поправочные коэффициенты. Например, поверхность обрабатываемого материала может быть после прокатки или с литевой коркой, сверление сквозное или глухое и т. п.

Существующий способ учета всех иных условий обработки связан обычно с коррекцией конкретного базового режима. Применение поправочных коэффициентов, позволяющих уточнить режимы обработки, уменьшает количество трудоемких стойкостных экспериментов.

На рис. 2 представлена характеристическая поверхность ($IIS_M - IIS_M$) режимов для материалов с различной обрабатываемостью.

Для разных материалов, обрабатываемость которых находится в диапазоне от 0,2 до 1, имеет место совокупность таких поверхностей, которая представляет всю область возможных ре-

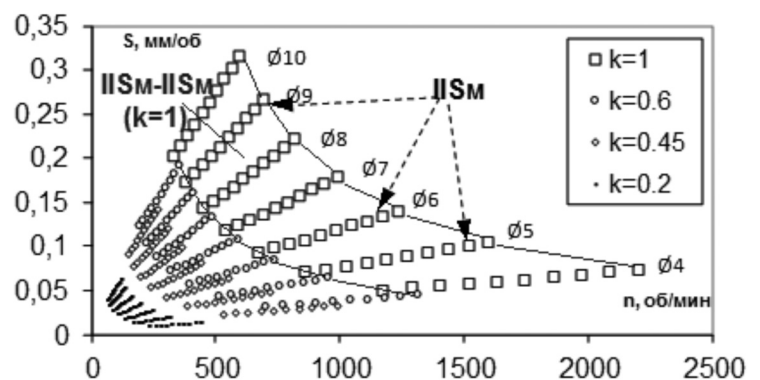


Рис. 2. Характеристические поверхности $IIS_M - IIS_M$ режимов обработки для труднообрабатываемых материалов, $K_{обп} = 1; 0,6; 0,45; 0,2$, сверла нормального исполнения $d = 4...10$ мм. Кривая IIS_M – характеристическая линия локальных максимумов стойкостей для текущих значений S_M

жимов резания, т. е. область нормирования (см. рис. 2). Возвращаясь к способу учета всех иных условий обработки для предложенной методологии нормирования, введем понятие плавающего индекса обрабатываемости.

Любое отклонение условий обработки от базовых характеристик приводит к сдвигу обрабатываемости (поверхность $IIS_M - IIS_M$). Коэффициент сдвига находится из ряда рекомендуемых существующих в настоящее время поправочных коэффициентов. Эти поправочные коэффициенты более корректно можно назвать коэффициентами сдвига поверхностей обрабатываемости (рис. 2). Отсюда и введение понятия плавающего коэффициента обрабатываемости.

Достоинствами этого приема являются простые программные вычисления режимов обработки, графическая наглядность метода, что должно упростить понимание технологами всех процедур определения оптимальных режимов обработки.

На рис. 3 показана новая характеристическая линия обрабатываемости $L1$, определенная для материала с обрабатываемостью $K = 0,8$. После этого определяется координата режима максимальной стойкости для нужного диаметра сверла и при необходимости линия IIS_M .

Компоненты вектора сдвига определялись через поправочные коэффициенты (K_V, K_S). Так как они исходили из точки пересечения линий IIS_M для искомого диаметра сверла и линии $L1$ (линии максимальных стойкостей сверл разных диаметров), то конец вектора сдвига по-

верхности обрабатываемости должен пересечь линию $L1$ нового значения обрабатываемости (см. рис. 3). Отсюда в методику и вводится понятие плавающего индекса обрабатываемости. При этом новая линия $L1^*$ имеет пересечение с линией IIS_M для того же рассматриваемого диаметра, где и определяется координата оптимального режима обработки. Достаточно полно поправочные коэффициенты представлены в [20, 21].

Итак, в предлагаемой методике при обработке результатов стойкостных экспериментов определяются параметры модели с $K_{обр} = 1$. Далее на втором этапе экспериментов по этой же методике для конкретных условий обработки определяются параметры стойкостных моделей, но для материалов с обрабатываемостью меньше единицы ($K_{обр} = 0,8; 0,6; 0,4; 0,2$). Все это и составляет базу методики нормирования. Затем в банк данных вводятся поправочные коэффициенты, которые при изменении условий обработки могут быть использованы в последующих расчетах.

Оценивание базовых параметров моделей процесса резания происходит обычно в несколько этапов и является трудоемкой операцией. Поэтому необходимо привлекать аппарат теории планирования экспериментов для повышения информативности определяемых параметров моделей.

На первом этапе исследований для получения базовой информации оцениваются параметры двухфакторной модели (1) по полным факторным (5^2 и 3^2) или специальным планам. На втором этапе экспериментальных исследований (через испытания различных диаметров сверл) определялись параметры трехфакторной модели. На третьем этапе для материалов с различной обрабатываемостью проводились эксперименты вдоль линий S_M и IIS_M по специальным двухуровневым планам для уточнения параметров модели (8). По этим планам стойкостных экспериментов на первом уровне испытаний определяются координаты режимов максимальных стойкостей для выбранных двух значений минутных подач. После этого через эти координаты режимов обработки графически проводится линия IIS_M , на которой ставятся (2-й уровень

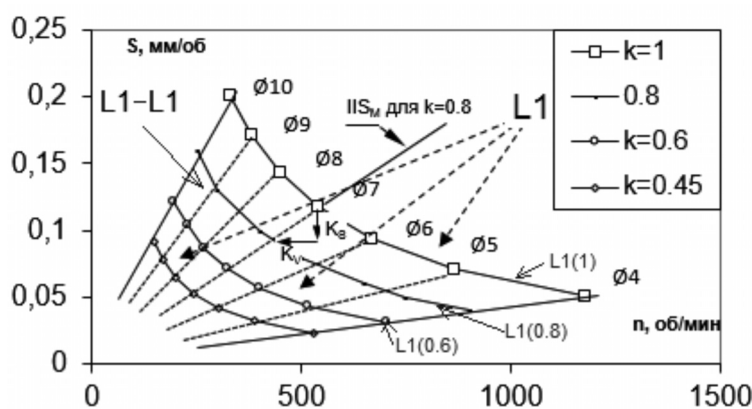


Рис. 3. Характеристическая поверхность $L1-L1$. $L1$ – характеристическая линия максимальных значений стойкостей для текущих диаметров сверл для сталей различной обрабатываемости, определение характеристической линии $L1(0,8)$ вычисляется через поправочные коэффициенты

опытов) дополнительные эксперименты, чтобы определить параметры уравнения IIS_M .

Все экспериментальные значения стойкости первого и второго уровней используются для расчета параметров стойкостной модели (1), а при использовании результатов нескольких планов эксперимента для различных диаметров сверл – расчета параметров стойкостных моделей (8).

Предлагаемая методика рассматривается на примере операции сверления, с небольшими изменениями она может быть применена для других процессов обработки материалов и других видов обработки при безнаростовом стружкообразовании (точение, фрезерование и др.).

Результаты экспериментов по определению базовых стойкостных моделей

Параметры уравнения модели (8) были рассчитаны по экспериментальным данным [18] (для материалов с $K_{обр} = 1$, инструмент из быстрорежущей стали P6M5):

$$L(S_0, n, d) = 4112d^{0,43} \exp \times \left[- \left(\frac{S_0 - 0,0052d^{1,59}}{0,0017d^{1,81}} \right)^2 - \left(\frac{n - 7758d^{-1,36}}{6049d^{-1,4}} \right)^2 \right];$$

$$P_{oc} = -404,42 - 0,044n + 9529S_0 + 85,84d;$$

$$M_{кр} = -519 + 1,53n + 44079S_0 - 983d + 96245S_0^2 + 129d^2 - 24S_0n; \quad (12)$$

$$t \text{ } ^\circ\text{C} = -33,6 + 39,7d + 0,33n - 470,3S_0 - 0,82d^2 - 9 \cdot 10^{-5}n^2 + 850S_0^2 + 0,98S_0n.$$

Для измерения температуры использовался метод естественной (искусственной) термопары и метод оплавления тонких пленок металла, нанесенных на заднюю поверхность инструмента. По предлагаемому алгоритму нормирования были рассчитаны режимы резания для различных групп обрабатываемости сталей. Результаты расчетов сводятся в табличные режимы.

Итак, при нормировании режимов резания выявляются закономерности изменения стойкости инструментов для определения условий обработки, которые можно описать характеристическими поверхностями $IIS_M - IIS_M$ и $L1 - L1$. Поверхности $IIS_M - IIS_M$ для материалов разной обрабатываемости используются для расчета табличных режимов резания или непосредственных расчетов режимов резания конкретного материала и конкретного используемого инструмента (например, режимы для специального станка). При этом в табличных режимах даются координаты режимов обработки от режимов максимума стойкости до режимов максимума производительности на малой стойкости (режимы вдоль характеристических линий IIS_M), чего нет в традиционном нормировании – там обычно дается рекомендация для одного режима. Применение характеристической поверхности $IIS_M - IIS_M$ позволяет использовать экстраполяционные процедуры для расчета режимов обработки сверлами большого диаметра (диаметром от 10 до 60 мм), для которых проведение стойкостных экспериментов проблематично, что также неосуществимо при традиционном нормировании.

Характеристическая поверхность $L1 - L1$ удобна при использовании коррекции режимов резания как раз при экстраполяционных процедурах, где необходимо страховать от возможных расчетных ошибок при определении режимов резания. Для этого используются следующие физические закономерности, установленные эмпирически при изнашивании инструмента: для любого диаметра сверла пересечение линий IIS_M с соответствующей ей линией $L1$ характеризуется температурой $\approx 300 \text{ } ^\circ\text{C}$ [21] и определенным удельным давлением на задней поверхности инструмента. Эти эмпирические закономерности позволяют проверять вычислительные эксперименты и строить экстраполяцию вне экспериментальной области.

Программный комплекс

По предложенной методике нормирования на примере операции сверления разработан программный комплекс проектирования режимов резания. Для корректной работы этого Windows-приложения требуется установка приложения

Microsoft .NET Framework v4.0.30319. Работоспособность комплекса проверена в операционных системах Windows 7, Windows 8 и Windows 8.1. Предусмотрена защита от ввода некорректных данных.

Программа имеет интуитивно понятный интерфейс с наглядной визуализацией. Окно интерфейса разделено на две части. Левое – поле ввода параметров, которое разделено на тематические блоки: «Отображаемые линии», «Дополнитель-

ные факторы модели», «Параметры критерия». Правую часть окна занимает поле графической интерпретации и результатов оптимизации, где расположены вкладки, каждая из которых соответствует различным факторам режимов резания: частота вращения [об/мин], подача на оборот [мм/об], скорость вращения [м/мин], минутная подача [мм/мин]. В программе предусмотрена визуализация стойкостной модели в пространстве перечисленных факторов (рис. 4).

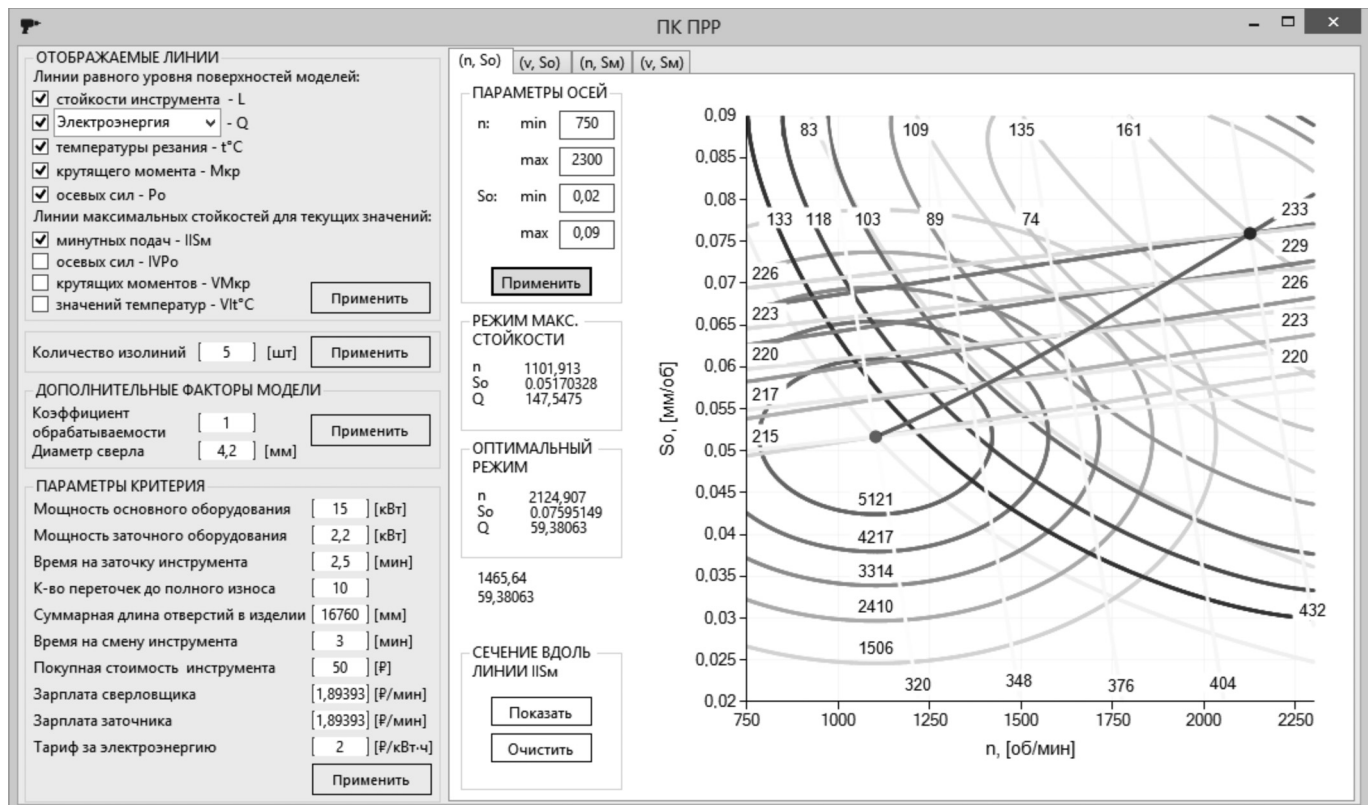


Рис. 4. Интерфейс программного комплекса

Выводы

На основе базовых стойкостных экспериментов и определения стойкостных закономерностей, включая также математическое описание процесса стойкости при сверлении труднообрабатываемых материалов, для разработки программного комплекса расчета режимов сверления была получена информация:

1) общего нормирования режимов сверления, а также возможности оптимизации частных режимов резания по критерию минимума затрат;

2) возможности расчета табличных режимов сверления для различных диаметров сверл

для различных по обрабатываемости материалов;

3) корректировки режимов резания для иных условий обработки по сравнению с базовыми при использовании существующих поправочных коэффициентов и применении процедуры плавающего индекса обрабатываемости;

4) разработки экстраполяционных расчетов оптимальных режимов для областей факторного пространства, для которого отсутствуют прямые экспериментальные данные о стойкости инструментов, например, для сверл большого диаметра: 15...40 мм;

Программный комплекс позволяет повысить графическую наглядность рассчитываемых

режимов резания и облегчает технологю получение информации о дальнейшем их изменении как по производительности, так и по стойкости инструмента и по снижению производственных затрат.

Список литературы

1. Общемашиностроительные нормативы режимов резания: справочник. В 2 т. Т. 1 / А.Д. Локтев и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 640 с: ил. – ISBN 5-217-01190-4.

2. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справочник / Я.Л. Гуревич и др. – М.: Машиностроение, 1976. – 176 с.

3. *Островский В.И.* Теория резания металлов. Расчет оптимальных режимов резания: учебное пособие. – Л.: СЗПИ, 1986. – 68 с.

4. *Colding B., Konig W.* Validity of the Taylor equation in metal cutting // *CIRP Annals*. – 1971. – Vol. 19, N 4. – P. 793–812.

5. *Силин С.С., Баранов А.В., Рыкунов А.Н.* Научно-обоснованное нормирование операций механообработки // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. – 1996. – № 4. – С. 29–32.

6. *Макаров А.Д.*, Износ и стойкость режущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1966. – 264 с.

7. *Грановский Г.И.* О стойкости инструмента как исходном параметре для расчетов режима резания // *Вестник машиностроения*. – 1965. – № 8. – С. 59–60.

8. *Varatharajulu M., Loganathan C., Baskar N.* Influence of cutting parameters on burr height and burr thickness in drilling of Duplex 2205 using Solid Carbide // *International Journal of ChemTech Research*. – 2015. – N 8 (2). – P. 768–777.

9. *Shunmugesh K., Panneerselvam K., Jospaul T.* A nova based optimization of machining parameters in drilling of glass fiber reinforced polymer (GFRP) composites // *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*. – 2014. – Vol. 2, iss. 3. – P. 53–60.

10. *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.

11. *Gaitonde V.N., Karnik S.R.* Selection of optimal process parameters for minimizing burr size in drilling using taguchi's quality loss function approach // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2012. – Vol. 34, N 3. – P. 238–245. – doi: 10.1590/S1678-58782012000300003.

12. *Bădan I., Oancea Gh., Vasiloni M.* Mathematical model for drilling cutting forces of 40CrMnMoS8-6 steel // *Bulletin of the Transilvania University of*

Braşov. Series I: Engineering Sciences. – 2012. – Vol. 5 (54), N 1. – P. 31–38.

13. *Killickap E.* Determination of optimum parameters on delamination in drilling of GFRP composites by Taguchi method // *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. – 2010. – Vol. 17. – P. 265–274.

14. *Shunmugesh K., Panneerselvam K., Jospaul T.* Optimising drilling parameters of gfrp by using grey relational analysis // *International Journal of Research in Engineering and Technology*. – 2014. – Vol. 3, iss. 6. – P. 302–305.

15. *Ficici F., Koksal S., Karacadag M.C.* Optimization of cutting parameters for surface roughness of stainless steel in drilling process // *International Journal of Science and Advanced Technology*. – 2012. – Vol. 2, N 3. – P. 114–121.

16. 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.

17. Selection of optimum drilling parameter in drilling of commercial acrylic sheet to achieve minimum hole expansion by using Taguchi approach / I. Khan, D. Luthra, M. Verma, S. Singh // *International Journal of Engineering Science and Technology*. – 2012. – Vol. 4, iss. 4. – P. 1256–1261.

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

19. *Manikandan C., Rajeswari B.* Study of cutting parameters on drilling EN24 using Taguchi method // *International Journal of Engineering Research & Technology*. – 2013. – Vol. 2, iss. 7. – P. 146–149.

20. *Карманов В.С.* Исследование математических моделей стойкости режущего инструмента // *Научный вестник НГТУ*. – 2006. – № 2 (23). – С. 55–64.

21. *Смагин Г.И.* Оптимизация режимов сверления по критерию минимума затрат: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 68 с.

22. *Смагин Г.И., Карманов В.С.* Алгоритм нормирования режимов резания труднообрабатываемых материалов по методу характеристических линий и поверхностей при использовании специальных планов эксперимента // *Научный вестник НГТУ*. – 2011. – № 3 (44). – С. 149–158.

23. *Zuperl U., Cus F.* Optimization of cutting conditions during machining by using neural networks // *Proceedings of the 12th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Dresden, Germany, 15–17 July 2002*. – Dresden, 2002. – P. 502–511.

24. *Dereli T., Filiz I.H., Baykasoglu A.* Optimizing cutting parameters in process planning of prismatic parts by using genetic algorithms // *International Journal of Production Research*. – 2001. – Vol. 39, iss. 15. – P. 3303–3328. – doi: 10.1080/00207540110057891.

25. *Deepak S.S.K.* Cutting speed and feed rate optimization for minimizing production time of turning process // *International Journal of Modern Engineering Research*, 2012. – Vol. 2, iss. 5. – P. 3398–3401.

26. *Ab Rashid M.F.F., Izwandi S.* Optimization of turning parameters to minimize production cost using

genetic algorithm [Electronic resource] // *Proceedings of the 2nd CUTSE International Conference*, Miri, Sarawak, Malaysia, 24–25 November 2009. – Sarawak, 2009. – Available at: http://umpir.ump.edu.my/5277/1/CUTSE_MOC_02_Optimization_of_Turning_Parameters_to_Minimize_Production_Cost.PDF (accessed: 30.10.2015).

27. *Kronenberg M.* Machining science and application. Theory and practice for operation and development of machining processes. – 1st ed. – Oxford: Pergamon Press, 1966. – 410 p.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(69), October – December 2015, Pages 6–17

Use of basic model of process of drilling for rationing of the modes of cutting of the hardly processed materials

Smagin G.I., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: g.smagin@ngs.ru

Karmanov V.S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: vitaly_karmanov@ngs.ru

Fedin I.V., Master's Degree student, e-mail: ivan_fedin@outlook.com

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

Abstract

A method of cutting regimes normalization for hard-to-machine materials using the example of drilling operation is offered. The method is based on application of new models of tool life well consistent with the experiments results as well as on building characteristic lines and surfaces for the cutting process parameters. Applications of the suggested method allows using the mechanism of experimental tools lifetime for different zones of the cutting regimes factor space, which allows to decrease the number of labor-intensive AW experiments, improve accuracy of calculations of optimal processing conditions and graphic display of adopted resolutions. A scheduling algorithm for the experiment to estimate the selected resistibility model parameters is developed on the ground of the suggested method. On the basis of the suggested method a program complex is drawn up to calculate optimal drilling regimes on the criteria of minimal expenses for range diameters of drills (from 3 to 40 mm) and processed materials (with processing ratio of the material, PR, from 0,2 to 1).

The basic variables of the cutting process include the dimensions of tools, the applied criteria of tool life, the type of cooling lubricant, the mode of drill fixation, the drill radius, blind or through bore, the material grade, the drill material, the drill type and others. The method allows calculating both local optimal cutting regimes on the criteria of minimal expenses and the table regimes along the characteristic line of maximal life for the current variables for the moment feeds without considering the processing expenses.

Keywords:

drilling, drilling regimes, cutting tool life, normalization method, characteristic lines, characteristic surfaces, design of experiment, machinability of materials, correction coefficients, optimization, expenses.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-6-17

References

1. Loktev A.D., Gushchin I.F., Batuev V.A. et al. *Obshchemashinostroitel'nye normativy rezhimov rezaniya. Spravochnik. V 2 t. T. 1* [Engineering industry standards cutting modes. Manual. In 2 vol. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 640 p. ISBN 5-217-01190-4

2. Gurevich Ya.L., Gorokhov Ya.V., Zakharov V.I. et al. *Rezhimy rezaniya trudnoobrabatyvaemykh materialov. Spravochnik* [Cutting hard materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 176 p.
3. Ostrovskii V.I. *Teoriya rezaniya metallov. Raschet optimal'nykh rezhimov rezaniya* [Theory of cutting. Calculation of optimum cutting conditions]. Leningrad, SZPI Publ., 1986. 68 p.
4. Colding B., Konig W. Validity of the Taylor equation in metal cutting. *CIRP Annals*, 1971, vol. 19, no. 4, pp. 793–812.
5. Silin S.S., Baranov A.V., Rykunov A.N. Nauchno-obosnovannoe normirovanie operatsii mekhanoobrabotki [Science-based regulation of machining operations]. *Traktory i sel'skokhozyaistvennyye mashiny – Tractors and agricultural machinery*, 1996, no. 4, pp. 29–32.
6. Makarov A.D. *Iznos i stoikost' rezhushchikh instrumentov* [Wear resistance of cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 264 p.
7. Granovskii G.I. O stoikosti instrumenta kak iskhodnom parametre dlya raschetov rezhima rezaniya [About the tool life as the initial parameters for the calculation of cutting mode]. *Vestnik mashinostroeniya – Russian Engineering Research*, 1965, no. 8, pp. 59–60.
8. Varatharajulu M., Loganathan C., Baskar N. Influence of cutting parameters on burr height and burr thickness in drilling of Duplex 2205 using Solid Carbide. *International Journal of ChemTech Research*, 2015, vol. 8, no. 2, pp. 768–777.
9. Shunmugesh K., Panneerselvam K., Jospaul T. A nova based optimization of machining parameters in drilling of glass fiber reinforced polymer (GFRP) composites. *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, 2014, vol. 2, iss. 3, pp. 53–60.
10. Ivantsivsky V.V., Skeebe V.Yu. Sovmeshchenie operatsii poverkhnostnoi zakalki i finishnogo shlifovaniya na odnom tekhnologicheskoye 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.
11. Gaitonde V.N., Karnik S.R. Selection of optimal process parameters for minimizing burr size in drilling using taguchi's quality loss function approach. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2012, vol. 34, iss. 3, pp. 238–245. doi: 10.1590/S1678-58782012000300003
12. Bădan I., Oancea Gh., Vasiloni M. Mathematical model for drilling cutting forces of 40CrMnMoS8-6 steel. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series I: Engineering Sciences*, 2012, vol. 5 (54), iss. 1, pp. 31–38.
13. Kilickap E. Determination of optimum parameters on delamination in drilling of GFRP composites by Taguchi method. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 2010, vol. 17, pp. 265–274.
14. Shunmugesh K., Panneerselvam K., Jospaul T. Optimising drilling parameters of GFRP by using grey relational analysis. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2014, vol. 3, iss. 6, pp. 302–305.
15. Ficici F., Koksall S., Karacadag M.C. Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness of Stainless Steel in Drilling Process. *International Journal of Science and Advanced Technology*, 2012, vol. 2, iss. 3, pp. 114–121.
16. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., Skeebe V.Yu. Kontaknyye 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.
17. Khan I., Luthra D., Verma M., Singh S. Selection of optimum drilling parameter in drilling of commercial acrylic sheet to achieve minimum hole expansion by using Taguchi approach. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2012, vol. 4, no. 04, pp. 1256–1261.
18. Skeebe V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 12, pp. 1408–1411. doi: 10.1080/10426914.2014.973595.
19. Manikandan C., Rajeswari B. Study of cutting parameters on drilling EN24 using Taguchi method. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2013, vol. 2, iss. 7, pp. 146–149.
20. Karmanov V.S. Issledovanie matematicheskikh modelei stoikosti rezhushchego instrumenta [Investigation of mathematical models of the cutting tool]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 2 (23), pp. 55–64.
21. Smagin G.I. *Optimizatsiya rezhimov sverleniya po kriteriyu minimuma zatrat* [Drilling optimization by the criterion of minimum cost]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2000. 68 p.
22. Smagin G.I., Karmanov V.S. Algoritm normirovaniya rezhimov rezaniya trudnoobrabatyvaemykh materialov po metodu kharakteristicheskikh linii i poverkhnostei pri ispol'zovanii spetsial'nykh planov eksperimenta [Algorithm

of norming cut modes of a hard preparing materials by charactical lines and surfaces method used special experimental plans]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 3 (44), pp. 149–158.

23. Zuperl U., Cus F. Optimization of cutting conditions during machining by using neural networks. *Proceedings of the 12th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, Dresden, Germany, 15–17 July 2002, pp. 502–511.

24. Dereli T., Filiz I.H., Baykasoglu A. Optimizing cutting parameters in process planning of prismatic parts by using genetic algorithms. *International Journal of Production Research*, 2001, vol. 39, iss. 15, pp. 3303–3328. doi: 10.1080/00207540110057891

25. Deepak S.S.K. Cutting speed and feed rate optimization for minimizing production time of turning process. *International Journal of Modern Engineering Research*, 2012, vol. 2, iss. 5, pp. 3398–3401.

26. Ab Rashid M.F.F., Izwandi S. Optimization of Turning Parameters to Minimize Production Cost using Genetic Algorithm. *Proceedings of the 2nd CUTSE International Conference*, Miri, Sarawak, Malaysia, November 24–25, 2009. Available at: http://umpir.ump.edu.my/5277/1/CUTSE_MOC_02_Optimization_of_Turning_Parameters_to_Minimize_Production_Cost.PDF (accessed: 30.10.2015).

27. Kronenberg M. Machining science and application. Theory and practice for operation and development of machining processes. 1st ed. Oxford, Pergamon Press, 1966. 410 p.

Article history:

Received 2 July 2015

Revised 3 August 2015

Accepted 20 October 2015

ВЫБОР АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ ПРИ МАЯТНИКОВОМ ШЛИФОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT22 ПО ВЫСОТНЫМ ПАРАМЕТРАМ ШЕРОХОВАТОСТИ

*Я.И. СОЛЕР, канд. техн. наук, доцент
Д.Ш. МАЙ, аспирант
(ИрНИТУ, г. Иркутск)*

Поступила 19 июня 2015

Рецензирование 17 июля 2015

Принята к печати 20 октября 2015

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

Шлифование деталей из титановых сплавов используется намного реже, чем других конструкционных материалов, что не отвечает запросам машиностроительного производства. Причина сказанного связана с налипанием стружки на рабочие поверхности абразивных инструментов из карбида кремния и электрокорунда. Это обусловлено высокой адгезионной активностью между титаном и традиционными абразивами при рабочих температурах резания. Радикальным средством решения данной проблемы служит использование при шлифовании титановых сплавов высокопористых кругов (ВПК) из кубического нитрида бора марки CBN30, 100 %-й концентрации на связке V (K27) с порообразующей КФ40, в которых варьировались зернистость: В76, В126, В151 (ГОСТ Р 53922–2010) и твердость: М, О (ГОСТ Р 52587–2006). Дополнительно были испытаны круги *Norton* из карбида кремния зеленого нормальной пористости 39С (46, 60) К8 VK, различающиеся по зернистостям. С учетом случайного характера процесса шлифования, нарушений однородности дисперсий и нормальности распределений интерпретация наблюдений шероховатостей проведена с привлечением непараметрического метода статистики, характеристиками которого служат медианы и квартильные широты. Установлено, что варьирование переменных процесса для каждой группы инструментов признано незначимым по мерам положения. Круги *Norton* обеспечивают снижение высот шероховатостей в 1,6... 1,7 раза по сравнению с нитридборовыми ВПК. Их рекомендовано использовать на чистовом этапе шлифования, а ВПК CBN30 – на предварительном для снижения теплового воздействия на деталь. По стабильности процесса первое место занимают круги *Norton* с зернистостью 46, а среди нитридборовых – CBN30 В76 100 OV К27 – КФ40.

Ключевые слова: шлифование, титановый сплав, шероховатость, статистика, среднее, медиана, мера рассеяния.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-18-30

Введение

Титановые сплавы обладают уникальной комбинацией свойств: высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью в самых разнообразных средах и жаропрочностью. Они востребованы в авиационной и космической технике, газоперекачивающей аппаратуре, хи-

мическом оборудовании и судостроении [1, 2]. При этом титановые сплавы имеют один существенный недостаток – низкую обрабатываемость абразивным инструментом, в связи с чем до сих пор удельный вес шлифования титановых деталей намного ниже, чем стальных. Сказанное сдерживает технический прогресс в машиностроении [2–4].



Титановый сплав VT22 относится к двухфазным ($\alpha + \beta$). Большое содержание в нем β -стабилизаторов: 11,8 %, что позволяет проводить эффективную термическую обработку (закалку+старение). В таком состоянии детали VT22 входят в группу высокопрочных титановых сплавов ($\sigma_B > 1000$ МПа), которая характеризуется самой низкой обрабатываемостью шлифованием [3, 5].

Причинами низкой шлифуемости заготовок из титана являются адгезионное и диффузионное взаимодействие между абразивными и обрабатываемыми материалами, а также интенсивное засаливание рабочей поверхности абразивного инструмента. К основным направлениям повышения обрабатываемости титановых деталей следует отнести: применение инертных и износостойких абразивных зерен; использование высокопористых кругов (ВПК); создание в зоне шлифования реакционной среды, способствующей пассивации металла и, как следствие, уменьшению его взаимодействия с абразивным материалом [2–19].

По результатам работ установлено, что при шлифовании титановых заготовок традиционными абразивами предпочтение следует отдать карбидам кремния. Это связано с тем, что титан интенсивно отдает электроны атомам алюминия в корунде, вызывая адгезионный износ электрокорундовых зерен. Адгезионное взаимодействие с карбидом кремния отмечено менее интенсивным, чем с электрокорундом. Свойства титана, влияющие на его взаимодействие с абразивными материалами, отражаются на их износостойкости. Так, для сплава VT22 износостойкость карбида кремния относительно корундовых материалов более двух раз [5]. Информация по выбору зерен карбидов кремния зеленого и черного носит частный характер и требует дополнительного исследования в каждом конкретном случае. Абразивными материалами, атомы которых не принимают электроны титана и тем самым сводят адгезию к минимуму, являются кубический нитрид бора (КНБ) и алмаз. Засаливание рабочей поверхности кругов вызвано низкими антифрикционными свойствами титана, который имеет малую износостойкость и высокую склонность к схватыванию при трении. Тонкая окисная пленка легко разрушается, поскольку является более

хрупкой, чем нижележащий материал, что обусловлено диффузией водорода, кислорода и азота при температурах шлифования, начиная с 400...600 °С [5].

Качество поверхности деталей из сплава VT22 оцениваем по высотам шероховатостей, которые являются наиболее значимыми характеристиками ее топографии. Их формируют следующие первичные величины [20; 21, с. 41–46]:

$$H = \sum_{m=1}^5 h_m, \quad (1)$$

где h_1 – составляющая профиля, отражающая кинематический перенос геометрических характеристик рельефа рабочей поверхности инструмента на заготовку (слепок); h_2 – составляющая, возникающая в результате колебания круга и заготовки вследствие разновысотности и хаотического расположения зерен в связке; h_3 – составляющая, обусловленная пластической деформацией поверхности при врезании зерен в металл; h_4 – составляющая адгезионного взаимодействия зерен с заготовкой; h_5 – составляющая их упругих деформаций в черепке круга.

По мнению В.А. Носенко, доминирующей составляющей в (1) служит h_1 , а все остальные h_m , $m = 2; 5$, являются вторичными величинами [3]. Установлено, что радиус режущей части зерен зависит не только от их материала, но и от глубины внедрения в металл. С увеличением глубины царапины отдельные мелкие риски сливаются в одну большую [22].

Наиболее слабым звеном в технологической системе процесса шлифования является абразивный круг. В то же время в рассмотренных публикациях акцент сделан на другие технологические приемы и условия шлифования, а круг дан без должного обоснования. По этой причине решено остановиться на выборе зернистости нитридборовых (CBN) ВПК и кругов Norton стандартной пористости, а также дополнительно изучить влияние твердости ВПК CBN на шероховатость поверхности. Учитывая чувствительность сплава VT22 к концентраторам напряжений, считаем целесообразным оптимизировать характеристики кругов по критерию шероховатости деталей с учетом наибольшей высоты профиля.

1. Методика исследования

1.1. Условия проведения эксперимента

Оборудование, форма и размеры инструментов, режимы шлифования приведены в табл. 1.

В условиях эксперимента подача $s_{\text{п}}$ выбрана на двойной ход, поэтому имеет смысл пояснить их функциональное назначение. Опускание круга на глубину вели в момент смещения продольного стола в крайнее левое положение относительно оператора. В связи с этим перемещение стола слева направо считаем рабочим. Срезание металла с поверхности протекало по схеме встречного шлифования, поскольку круг имеет вращение по часовой стрелке. Тогда обратное движение стола вместе с заготовкой в преде-

лах заданной подачи $s_{\text{п}}$ становится выхаживающим, формирующим микрорельеф поверхности. Учитывая, что величина $s_{\text{п}}$ меньше высоты абразивного инструмента, оставшаяся рабочая поверхность круга обеспечивает выхаживание поверхности в обоих направлениях продольного перемещения стола. Но и в этом случае завершающий проход инструмента протекал в условиях попутного шлифования. Схема врезания круга выбрана по результатам исследования [3], в котором заготовки титановых сплавов обрабатывали в условиях глубинного (однопроходного) шлифования и получали снижение высот шероховатостей на одну категориальную величину (КВ) [25] по сравнению с альтернативной схемой встречного шлифования.

Таблица 1

Основные условия проведения эксперимента

Станок	Круг	Форма и размеры	Технологические параметры				
			$v_{\text{к}}$	$s_{\text{пр}}$	$s_{\text{п}}$	t	z
ЗЕ711В	ВПК <i>CBN</i>	1А1 200×20×76×5, мм [23]	28	6	4	0,01	0,1
ЗГ71	<i>Norton</i>	01 250×20×76, мм [24]	35				

Примечание: $v_{\text{к}}$ – скорость круга, м/с; $s_{\text{пр}}$ – продольная подача, м/мин; $s_{\text{п}}$ – поперечная подача, мм/дв.ход; t – глубина резания, мм; z – операционный припуск, мм

Заготовками служили образцы из титанового сплава ВТ22 ($\sigma_{\text{в}} = 1200$ МПа, $\delta = 8...12$ %, $E = 115$ ГПа [1]) с размерами $B \times L \times H = 40 \times 40 \times 50$ мм, шлифуемые по плоскости $B \times L$ без выхаживания. СОЖ – 5 %-я эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148845-98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7...10 л/мин. Число дублирующих опытов – $n = 30$ ($v = \overline{1; 30}$). Переменные условия шлифования представлены кодом « $dijv$ », удобным для анализа выходных параметров процесса с использованием статистических методов. В данном случае индекс $d = 1; 2$ отражает направление расположения шероховатости: 1 – параллельно вектору $s_{\text{п}}$, 2 – параллельно вектору $s_{\text{пр}}$. Характеристики кругов закодированы индексом $i = \overline{1; 6}$: 1 – СBN30 В76 100 ОV К27-КФ40; 2 – СBN30 В126 100 MV К27-КФ40; 3 – СBN30 В126 100 ОV К27-КФ40; 4 – СBN30 В151 100 ОV К27-КФ40; 5 – 39С 46 К8 VK; 6 – 39С 60 К8 VK. ВПК $i = \overline{1; 4}$ относятся к нитридовым инструментам [23, 26], в которых варьировались зернистость от В76 (200/250*) до

В151 (100/120*) и твердость от М (средней) до О (среднетвердой). Знаком «*» представлены зернистости в мешах. Круги *Norton* $i = 5, 6$ из зерен карбида кремния зеленого 8-й структуры (обычной пористости) имеют среднемягкую твердость (К) и различались зернистостями: 46 (355...300 мкм) и 60 (300...250 мкм) по ISO 8486-1, где в скобках указаны размеры зерен основной фракции. Индекс $j = \overline{1; 3}$ использован в коэффициентах стабильности, которые рассмотрены ниже для различных мер рассеяния: 1 – по SD_{di} , 2 – по R_{di} , 3 – по $KШ_{di}$.

Параметры шероховатости [27]: ($R_a, R_q, R_z, R_{\text{max}}$) $_{di}$ – измерены с помощью системы на базе профилографа – профилометра модели 252 завода «Калибр».

1.2. Статистическая интерпретация экспериментальных данных

Учитывая неустойчивость процесса шлифования и случайную природу формирования шероховатостей, анализ наблюдений ведем с

привлечением статистических подходов. Рассматриваем их случайными величинами (СВ), образующими независимые множества

$$\{y_{iv}\}, i = \overline{1;6}, v = \overline{1;30}. \quad (2)$$

В технических приложениях используются параметрические и непараметрические методы статистики (например, ранговые). Характеристиками одномерного распределения частот для множества (2) служат [28–30]: для первого направления – средние $y_i = y_{i\bullet}$, стандарты отклонений $(SD)_i$, размахи $R_i = |y_{\max} - y_{\min}|_i$; для второго направления – медианы \tilde{y}_i , квартильные широты $KШ_i = |y_{0,75} - y_{0,25}|_i$, охватывающие 50 % наблюдений множества (2). Первая частота характеризует меру положения (опорное значение), а последующие – меры рассеяния (прецизионность). Сдвиги \tilde{y}_i относительно $y_{i\bullet}$ обусловлены асимметрией (скошенностью) кривых распределений и находятся из выражений

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

Каждый метод статистики имеет свою область рационального применения. Для параметрического метода необходимо, чтобы множества (2) удовлетворяли требованиям нормальности и гомоскедастичности распределений (синонимы – однородность и гомогенность дисперсий). Второе ограничение, накладываемое на множества (2), должно выполняться наиболее строго. В противном случае точные параметрические оценки могут привести к принятию неверных гипотез. При нарушении оговоренных требований к СВ следует воспользоваться непараметрическим методом, который не связан со свойствами конкретного семейства распределений. Проведение одномерного дисперсионного анализа (ОДА) и множественного поиска ожидаемых опорных значений $(\hat{y}_{i\bullet}, \hat{m}\hat{y}_i)$, $i = \overline{1;6}$ связано с большим объемом вычислений, в силу чего обе процедуры выполнены с использованием программы *Statistica 6.1.478.0* [31; 32].

Влияние непараметрического метода на меры положения оценивается медианными коэффициентами при неизменных $d = 1$ (ограничились основным направлением для высотных шероховатостей) и $i = \overline{1;6}$:

$$K_{M1i} = (\tilde{y} / y_{i\bullet})_{1i}, \quad (4)$$

$$\overline{K}_{M1i} = (m\hat{y} / \hat{y}_{i\bullet})_{1i}. \quad (5)$$

Оценку работоспособности кругов $i = \overline{2;6}$ относительно базового ВПК CBN30 B76 100 OV K27-КФ40 ($i = 1$) ведем для обеих характеристик одномерного распределения частот множества (2) в поперечном направлении [28; 31; 32]:

$$K_{1i} = (\tilde{y}_i / \tilde{y}_1)_{1i}, \quad (6)$$

$$\overline{K}_{1i} = (m\hat{y}_i / m\hat{y}_1)_{1i}, \quad (7)$$

$$K_{CT1i1} = (SD_1 / SD_i)_{1i}, \quad (8)$$

$$K_{CT1i2} = (R_1 / R_i)_{1i}, \quad (9)$$

$$K_{CT1i3} = (KШ_1 / KШ_i)_{1i}. \quad (10)$$

2. Результаты исследования и их обсуждение

2.1. Выбор статистического метода интерпретации множества (2)

Тестирование множества (2) на однородность дисперсий (нуль-гипотез H_0) проведено для восьми параметров шероховатости в двух направлениях $d = \overline{1;2}$ при работе кругами $i = \overline{1;6}$, для чего были привлечены три группы критериев ($\omega = \overline{1;3}$): 1 – Хартли, Кохрена, Бартлетта (в программе представлены одной совокупностью), 2 – Левене, 3 – Брауна–Форсайта. По результатам тестирования H_0 принималась, если количество решений в ее пользу составляло $f_0 \in [2; 3]$. Установлено, что для шероховатостей $(R_a, R_q, R_z, R_{\max})_2$ в продольном направлении H_0 приняты при $f_0 = 3$. В ортогональном направлении $d = 1$ для первой группы критериев $\omega = 1$ все H_0 приняты с незначительной ошибкой 2-го рода. По остальным статистикам $\omega = 2,3$ гомогенность дисперсий подтверждена для параметров $R_{q1}(\omega = 2; 3)$ и $R_{q1}(\omega = 3)$ при наличии ошибок 2-го рода.

Гипотезы о нормальности распределений множества (2) по кругам $i = \overline{1;6}$ и параметрам шероховатости приняты по критерию Шапиро–Уилка при выполнении неравенств: $\alpha_i > 0,5$. Результаты тестирования представлены в табл. 2.

Проверка множества (2) на нормальность распределений по кругам и параметрам шероховатости

Круг $i = \overline{1;6}$	α_i							
	R_{a1}	R_{q1}	R_{z1}	$R_{\max 1}$	R_{a2}	R_{q2}	R_{z2}	$R_{\max 2}$
1	0,2998	0,8766	0,5747	0,0011	0,3962	0,7245	0,2484	0,6016
2	0,2157	0,4178	0,8307	0,8647	0,9507	0,6199	0,9890	0,7033
3	0,6026	0,4251	0,3410	0,0059	0,0482	0,1261	0,0124	0,3536
4	0,2437	0,1237	0,0252	0,4048	0,1250	0,1409	0,0366	0,2759
5	0,0924	0,1149	0,0994	0,3367	0,000002	0,000001	0,0003	0,00001
6	0,7766	0,8126	0,9436	0,4131	0,000008	0,000005	0,00003	0,00003

Примечание: круги i – см. раздел 1.1.

Как видно из табл. 2, наилучшие результаты по нормальности распределений получены при шлифовании деталей ВТ22 нитридборовым ВПК В126 с твердостью M ($i = 2$): из восьми параметров H_0 приняты для шести. Если учесть, что параметры шероховатости в направлении $d = 1$ превышают аналоги в продольном направлении и доминируют в обеспечении эксплуатационных свойств деталей [9], то приоритеты между кругами следует перераспределить. На первую позицию выдвигается круг 39С ($i = 6$) с крупностью зерен 60, для которого обеспечена нормальность распределений по всем поперечным параметрам. На следующую позицию передвигаются нитридборовые ВПК $i = 1; 2$. Как видим, требования к СВ, которые предъявляет параметрический метод, обеспечены в неполном объеме. Это предопределило приоритетным направлением для интерпретации экспериментальных данных принять ранговые статистики.

2.2. Оценка режущих свойств кругов по мерам положения

На первом этапе анализа экспериментальных данных уточним их соотношение в двух ортогональных направлениях. По опытным медианам $(\tilde{y}_1 / \tilde{y}_2)_i$, $i = \overline{1;6}$ установлено, что для конкретных параметров шероховатости имеют место соотношения: $(\tilde{R}_{a1} / \tilde{R}_{a2})_i = 2,23 - 3,14$; $(\tilde{R}_{q1} / \tilde{R}_{q2})_i = 2,26 - 3,14$; $(\tilde{R}_{z1} / \tilde{R}_{z2})_i = 2,37 - 3,22$; $(\tilde{R}_{\max 1} / \tilde{R}_{\max 2})_i = 2,16 - 2,83$. Наименьшая анизотропия шероховатостей по инстру-

ментам предсказана при шлифовании нитридборовым ВПК СВN30 В126 100 MV К27-КФ40, а наибольшая – кругом Norton с зернистостью 46 ($i = 5$). По параметрам шероховатости наименьшая изотропность топографии относится к R_z , а наибольшая – к R_{\max} . Анизотропность шероховатостей $d = 1; 2$ следует использовать для повышения эксплуатационных свойств деталей, располагая их при шлифовании таким образом, чтобы при эксплуатации машин продольные шероховатости воспринимали наибольшие нагрузки.

При работе машин наибольшей информативностью обладают высотные параметры $(R_a, R_{\max})_1$, расположенные в поперечном направлении. По их опорным значениям проведена оценка режущих способностей кругов $i = \overline{1;6}$, табл. 3).

Полученные опытные и ожидаемые опорные значения проанализируем в двух аспектах: с позиций статистики и технологии шлифования. В первом случае выявлено, что для параметров $(R_a, R_q, R_z, R_{\max})_1$, которые частично представлены в табл. 3, двадцать опытных медиан \tilde{Y}_{1i} , $i = \overline{1;6}$ из общего числа $N = 4 \times 6 = 24$ оказались меньше одноименных опытных средних. При этом только для одной шероховатости \tilde{R}_{a12} параметрическая мера положения превысила медиану на одну КВ. Для остальной номенклатуры шероховатостей сдвиг \tilde{Y}_{1i} относительно Y_{1i} протекал внутри КВ. Ситуация, при которой

Влияние характеристик кругов на меры положения шероховатостей и коэффициенты (4)–(7) для параметров $(R_a, R_{max})_1$

Параметр	Круг $i = 1; 6$	$y_{1i\bullet}$, МКМ	\tilde{y}_{1i} , МКМ	$\hat{y}_{1i\bullet}$, МКМ	$m\hat{y}_{1i}$, МКМ	K_{M1i} (4)	\overline{K}_{M1i} (5)	K_{1i} (6)	\overline{K}_{1i} (7)
R_{ali}	1	0,484 (0,50)	0,481 (0,50)	0,490 (0,50)	0,480 (0,50)	0,993	0,979	1,000	1,000
	2	0,509 (0,63)	0,490 (0,50)	0,494 (0,50)	0,480 (0,50)	0,963	0,971	1,019	1,000
	3	0,503 (0,63)	0,501 (0,63)	0,494 (0,50)	0,480 (0,50)	0,997	0,971	1,042	1,000
	4	0,464 (0,50)	0,447 (0,50)	0,482 (0,50)	0,480 (0,50)	0,965	0,996	0,930	1,000
	5	0,286 (0,32)	0,289 (0,32)	0,293 (0,32)	0,291 (0,32)	1,009	0,994	0,601	0,607
	6	0,300 (0,32)	0,294 (0,32)	0,293 (0,32)	0,291 (0,32)	0,979	0,994	0,610	0,607
R_{max1i}	1	2,874 (3,2)	2,747 (3,2)	2,886 (3,2)	2,817 (3,2)	0,956	0,976	1,000	1,000
	2	2,981 (3,2)	2,993 (3,2)	2,930 (3,2)	2,817 (3,2)	1,004	0,962	1,090	1,000
	3	3,001 (3,2)	2,878 (3,2)	2,941 (3,2)	2,817 (3,2)	0,959	0,958	1,048	1,000
	4	2,688 (3,2)	2,651 (3,2)	2,809 (3,2)	2,817 (3,2)	0,986	1,003	0,965	1,000
	5	1,675 (2,0)	1,655 (2,0)	1,740 (2,0)	1,700 (2,0)	0,988	0,977	0,603	0,604
	6	1,804 (2,0)	1,746 (2,0)	1,740 (2,0)	1,700 (2,0)	0,968	0,977	0,636	0,604

Примечание: круги i – см. раздел 1.1, в скобках – КВ [25].

медианные коэффициенты (4) оказались меньше единицы, вскрывает дополнительные резервы повышения эксплуатационных показателей машин или производительности шлифования. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности привлечения рангового метода взамен гауссового конкурента, который «на чужом поле» [29] показал меньшую точность поиска опорных величин. Различия между медианными коэффициентами (5) и (4) также подтверждают целесообразность проведения второго этапа ОДА. Сказанное полностью сохраняется при оценке режущих свойств кругов по формулам (6) и (7). Дело в том, что по опытным медианам (6) режущие способности кругов $i = 1; 4$

различаются между собой, а по ожидаемым аналогам $m\hat{y}_{1i}$, $\overline{2; 4}$ коэффициенты равны единице, в том числе и для шероховатостей $(R_q, R_z)_{1i}$. Таким образом, для нитридборовых ВПК $i = 1; 4$ варьирование зернистости от В76 до В151 и снижение степени твердости от O до M на 5 %-м уровне признано незначимым. Сказанное, вероятнее всего, обусловлено модулем упругости титановых заготовок, который по сравнению со сталями почти в два раза ниже. С повышением температуры резания до 350 °С он дополнительно уменьшается почти по линейному закону [5], что усиливает упругое последствие титана, которое ведет к росту сил резания по задним поверхностям зерен и соответствен-

но усиливает упругий натяг в технологическом звене «заготовка–ВПК», выполняя роль виброгасителя [33]. Отмеченные закономерности сопровождаются уменьшением составляющих h_2 и h_5 в выражении (1). Дополнительно снижаются элементарные величины h_3 и h_4 соответственно в результате низкой пластичности сплава BT22 и высокой химической инертности зерен CBN по отношению к титану. При этом относительно h_3 полагаем, что при шлифовании температуры резания 500...600 °С и выше не могут вызвать значимого снижения прочности и текучести титановых сплавов при повышении их пластичности, как отмечено в [5] при сплошном нагреве образцов. Это обусловлено тем, что указанные температуры шлифования на поверхности детали характеризуются высоким градиентом снижения.

Особенности шлифования деталей BT22 становятся более убедительными, если воспользоваться результатами, полученными в аналогичных условиях для быстрорежущих пластин (БП) P9M4K8 и заготовок из стали 06X14H6Д2МВТ-Ш (ЭП817-Ш). Установлено, что при шлифовании БП наиболее гладкая поверхность предсказана при зернистости B126, которая оказалась меньше на две КВ, чем при B76 и B151. При этом возрастание твердости ВПК $i = 2; 3$ в указанном интервале сопровождалось снижением опорных значений также на две КВ. Одновременно при шлифовании заготовок ЭП817-Ш усилилась роль выбора твердости ВПК: меры положения для различных параметров шероховатости снизились на 2...3 КВ. При этом минимум шероховатости достигнут при зернистости B151. Полученные результаты свидетельствуют о том, что увеличение модуля упругости стальных заготовок почти в два раза по сравнению с титаном усилило влияние размеров зерен CBN и твердости нитридных ВПК на формирование опорных значений шероховатости. Выявлено, что рекомендации по их выбору для материалов BT22, P9M4K8, ЭП817-Ш оказались различными. В разделе 1.1 было указано, что доминирующий вклад в шероховатость (1) вносит составляющая h_1 , а остальные следует отнести к второстепенным величинам [3]. Однако приведенные результаты выявили значительные различия шероховатостей при неизменной составляющей h_1 .

Режущие способности кругов Norton по зернистостям 46 и 60 предсказаны по ожидаемым медианам равнозначными. Инструменты Norton позволили снизить шероховатости относительно нитридных ВПК в 1,6...1,66 раза или на три КВ. Полученные результаты делают целесообразным вести предварительное шлифование ВПК CBN с целью минимизации теплового воздействия на деталь [14,16], а чистовое – кругами Norton для более эффективного снижения микронеровностей.

2.3. Выбор кругов по мерам рассеяния шероховатостей

При обработке операционной партии заготовок на настроенных станках высокую роль играет стабильность (воспроизводимость) процесса шлифования, которая регулируется мерой рассеяния. В табл. 4 представлены все три параметра прецизионности: $(SD, R, KШ)_{1i}$. В условиях приоритетного использования непараметрического метода предпочтение отдано результатам, предсказанным по $KШ_{1i}$ и коэффициентам (10).

Выявлено, что варьирование зернистости ВПК от B76 до B151 при неизменной степени твердости O аппроксимируется экстремальной кривой с максимумом $KШ_{13}$ при зернистости B126. При этом минимум зависимости кривой $KШ = \psi$ (зернистость) для параметров R_{a14} , R_{max14} (см. табл. 4), R_{q14} , достигнут при шлифовании крупнозернистым ВПК B151 ($i = 4$), а для высоты неровностей профиля – при зернистости B76 ($i = 1$). Для сопоставления при обработке заготовок ЭП817-Ш минимум $KШ$ отмечен при наименьшей зернистости B76, а $KШ_{max}$ – при B126 для всех параметров шероховатости. Последнее полностью совпало с результатами шлифования деталей BT22. В ВПК $i = 2; 3$ варьировалась только степень твердости соответственно от средней ($i = 2$) до среднетвердой ($i = 3$). Единая корреляционная связь по $KШ$ между ними не выявлена: $KШ_{12} = KШ_{13}$ – для параметра R_{a1} ; $KШ_{12} < KШ_{13}$ – для наибольшей высоты профиля. Другая ситуация сложилась для деталей ЭП817-Ш: повышение твердости ВПК в изучаемом диапазоне вызвало снижение меры рассеяния по параметрам R_{a1} и R_{max1} соответственно в 2,5 и 2,3 раза. Параметрические оценки прецизионности для деталей BT22 предсказаны более стабильными и расположили ВПК в сле-

Выборочные оценки режущих свойств кругов по мерам рассеяния

Параметр	Круг $i = \overline{1; 6}$	SD_{li}	R_{li}	$КШ_{li}$	K_{ctlj}		
		мкм			$j = 1 (8)$	$j = 2 (9)$	$j = 3 (10)$
R_{ali}	1	0,053	0,257	0,060	1,000	1,000	1,000
	2	0,069	0,311	0,090	0,769	0,826	0,667
	3	0,080	0,370	0,090	0,661	0,694	0,667
	4	0,062	0,286	0,064	0,857	0,898	0,938
	5	0,052	0,264	0,055	1,025	0,973	1,091
	6	0,050	0,195	0,087	1,062	1,319	0,690
R_{maxli}	1	0,294	1,154	0,430	1,000	1,000	1,000
	2	0,406	1,894	0,572	0,724	0,609	0,752
	3	0,634	2,671	0,594	0,463	0,432	0,724
	4	0,334	1,277	0,413	0,880	0,904	1,041
	5	0,273	1,230	0,387	1,077	0,938	1,111
	6	0,280	1,098	0,462	1,051	1,051	0,931

Примечание: круги i – см. раздел 1.1.

дующей возрастающей последовательности мер рассеяния: 1-В76, 2-В151, 3-В126М, 4-В126О. Как видно из табл. 4, минимальная и наибольшая прецизионности по зернистостям для обоих методов статистики совпали. По $(SD, R)_{li}$, $i = 2; 3$ получены однозначные результаты, свидетельствующие о снижении воспроизводимости процесса шлифования с увеличением твердости ВПК от M до O : в 1,16...1,56 раза по SD и 1,13...1,41 раза по размахам. В обоих случаях наибольшее снижение стабильности процесса шлифования предсказано для параметра R_{maxli} . Как было выявлено в разделе 2.1, при шлифовании деталей ВПК наблюдения (2) характеризуются высокой степенью гомогенности дисперсий, а ранговый метод их интерпретации выбран в результате нарушений нормальности распределений (табл.1). Вероятно, по этой причине получены довольно стабильные оценки по параметрическим мерам рассеяния. Отметим, что повышение стабильности процесса шлифования посредством варьирования твердости ВПК должно проводиться с учетом материала шлифуемых деталей. В частности, для ВТ22 ее целесообразно снижать, а для ЭП817-Ш, напротив, повышать.

По кругам *Norton* наибольшая стабильность по $КШ_{li}$, $i = 5; 6$ показана при использовании более крупных зерен 46. Эта характеристика оказалась даже выше, чем для базового ВПК $i = 1$, о чем свидетельствуют коэффициенты (10): 1,09...1,11. Параметрические оценки мер рассеяния по кругам *Norton*, особенно по размахам, для большинства случаев шлифования показали возрастание воспроизводимости обработки при использовании кругов *Norton* с более мелкими зернами (при зернистости 60).

Выводы

1. В условиях нарушений однородности дисперсий и нормальности распределений привлечение непараметрического метода взамен широко применяемого в технических приложениях гауссового конкурента оказалось целесообразным, в частности, при поиске мер положения. Установлено, что имеет место снижение медиан относительно средних, хотя данное явление протекало в пределах КВ. Об этом свидетельствуют медианные коэффициенты (4) и (5), которые оказались в большинстве случаев меньше единицы.

Это позволяет повысить производительность шлифования при сохранении качества поверхности деталей неизменным.

2. Выявлено, что при шлифовании деталей из титанового сплава ВТ22 круги *Norton* обеспечивают наибольшее снижение высот микронеровностей по сравнению с нитридборовыми ВПК: по ожидаемым медианам различие предсказано в 1,6...1,7 раза. По этой причине ВПК СВН30 следует использовать на предварительном этапе шлифования, чтобы снизить тепловое воздействие круга на деталь, а круги *Norton* – на окончательном шлифовании при высоких требованиях к шероховатостям деталей. Титановые сплавы оказались мало чувствительными по мерам положения к варьированию зернистости и твердости кругов независимо от материала зерен. По всей вероятности сказанное обусловлено низким модулем упругости титана.

3. Меры рассеяния следует признать более переменными по сравнению с медианами и средними к переменным условиям шлифования. При использовании нитридборовых ВПК наименьшие $KШ_{1i}$ предсказаны при $i = 1; 4$ (т. е. при зернистостях В76 и В151). Для зернистости В126 стабильность процесса по $KШ_{13}$ снизилась в 1,4...1,5 раза. Варьирование твердости ВПК от среднетвердой ($i = 3$) до средней ($i = 2$) следует признать незначимым по $KШ$. Одновременно по $(SD, R)_{1i}$, $i = 2; 3$ отмечено возрастание прецизионности процесса. Последнее свидетельствует, что при высоком уровне однородности дисперсий параметрические оценки оказались более точными, чем по квартильным широтам.

Список литературы

1. Фрезы и фрезерование / О.М. Балла и др. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. – 172 с. – ISBN 5803803774.
2. Титановые сплавы в машиностроении / Б.Б. Чечулин и др. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
3. Носенко В.А., Носенко С.В. Технология шлифования металлов: монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 616 с. – (Тонкие наукоемкие технологии). – ISBN 978-5-94178-373-1.
4. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications / ed. by C. Leyens, M. Peters. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2003. – 532 p. – ISBN 978-3-527-30534-6.

5. Кремень З.И., Юрьев В.Г. Шлифование супералюминидов высокопластичных сплавов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 167 с. – ISBN 978-5-7422-1034-1.

6. Исследование химического состава поверхностного слоя титанового сплава при шлифовании его кругом из карбида кремния без использования СОТС / С.В. Носенко, В.А. Носенко, А.А. Крутинова, Л.Л. Кременецкий // СТИН. – 2015. – № 1. – С. 26–29.

7. Применение высокопористых кругов из синтеркорунда при профильном шлифовании фасонного режущего инструмента / Е.Г. Полканов, О.С. Кискин, С. Големы, С.Л. Рябцев // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – № 11. – С. 30–32.

8. *Wójcik R.* The grinding of titanium alloys // Archives of Mechanical Technology and Automation. – 2013. – Vol. 33, N. 4. – P. 49–60.

9. Саютин Г.И., Богуцкий А.Д., Мельников Г.А. Применение кругов из эльбора для шлифования титановых и жаропрочных сплавов // Станки и инструмент. – 1975. – № 2. – С. 30–31.

10. Саютин Г.И. Выбор шлифовальных кругов (для обработки жаропрочных сплавов и инструментальных сталей). – М.: Машиностроение, 1976. – 64 с.

11. Саютин Г.И., Татаринцев И.П. Выбор материала круга при шлифовании титановых сплавов // Станки и инструмент. – 1985. – № 7. – С. 21–22.

12. *Yang Ch.Y., Xu J.H., Ding W.F., Tong S.T.* Grinding titanium alloy with brazed monolayer CBN wheels // Key Engineering Materials. – 2007. – Vol. 359/360. – P. 33–37. – doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.359-360.33.

13. *Xu X., Yu Y., Huang H.* Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys // Wear. – 2003. – Vol. 255, iss. 7–12. – P. 1421–1426. – doi: 10.1016/S0043-1648(03)00163-7.

14. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении / под ред. З.И. Кременя. – СПб: Политехника, 2007. – 425 с. – ISBN 978-5-7325-0517-7

15. Кремень З.И. Высокопористые круги – эффективное средство повышения производительности шлифования и качества деталей из различных материалов // Инструмент и технологии. – 2001. – № 5/6. – С. 34–37.

16. Кремень З.И., Поповский Д.А., Юрьев В.Г. Шлифование титановых сплавов шлифовальными кругами на основе эльбора и алмаза // Вестник машиностроения. – 2013. – № 5. – С. 66–69.

17. Макаров В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов. – СПб: Лань, 2013. – 320 с. – ISBN 978-5-8114-1481-9.

18. *Turley D.M.* Factors affecting surface finish when grinding titanium and a titanium alloy (Ti-6Al-4V) // *Wear*. – 1985. – Vol. 104, iss. 4. – P. 323–335. – doi:10.1016/0043-1648(85)90040-7.

19. Experimental investigation on conventional grinding of Ti-6Al-4V using SiC abrasive / G. Guoqiang, L. Zhiqiang, A. Qinglong, Ch. Ming // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2011. – Vol. 57, iss. 1. – P. 135–142. – doi: 10.1007/s00170-011-3272-z.

20. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслев, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов, С.Г. Бишутин, И.В. Говоров, А.О. Горленко, Д.И. Петрешин, В.И. Сакало, С.Ю. Съянов, В.П. Тихомиров, О.Н. Федонин, В.П. Федоров, Д.Н. Финатов, А.Н. Щербаков; под ред. А.Г. Суслева. – М.: Машиностроение, 2008. – 318 с. – ISBN 978-5-217-03427-7.

21. *Унянин А.Н.* Научное и технологическое обеспечение шлифования заготовок из пластичных сталей и сплавов с предотвращением засаливания абразивных кругов: дис...д-ра техн. наук: 05.03.01 / Ульяновский государственный технический университет. – Ульяновск, 2006. – 537 с.

22. *Королев А.В., Решетникова О.П., Носков А.С.* Геометрические параметры режущей части абразивных зерен // *СТИН*. – 2015. – № 5. – С. 2–7.

23. ГОСТ 53923–2010. Круги алмазные и из кубического нитрида бора (эльбора) шлифовальные. Технические условия. ISO 22917:2004. Superabrasives – Limit deviations and run-out tolerances for grinding wheels with diamond or cubic boron nitride (MOD) – Введ. 2012–01–01. – М.: Стандартинформ, 2010. – 32 с.

24. Шлифкруги. NORTON [Electronic resource]. – URL: <http://www.tehnotools.com/upload/iblock/9be/9be7e214f25e68c5398c87614355aa31.pdf> (дата обращения: 02.11.2015).

25. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. – Взамен ГОСТ 2789–1959; введ. 1975–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 10 с.

26. ГОСТ 53922–2010. Порошки алмазные и из кубического нитрида бора (эльбора). Зернистость и зерновой состав шлифпорошков. Контроль зернового состава. ISO 6106:2005. Abrasive products – Checking the grit size of superabrasives (MOD). – Введ. 2012–01–01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 11 с.

27. ГОСТ 25142–82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. – Введ. 1983–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 20 с.

28. *Уилер Д., Чамберс Д.* Статистическое управление процессами: оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта: пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. – 409 с. – ISBN 978-5-9614-0832-4.

29. *Hollander M., Wolfe D.A.* Nonparametric statistical methods. – 2nd ed. – New York: Wiley-Interscience, 1999. – 816 p. – ISBN-10 0471190454. – ISBN-13 978-0471190455.

30. ГОСТ Р ИСО 5725–1–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 1. Основные положения и определения. – Введ. 2002–11–01. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 24 с.

31. Экспериментальный и статистический методы исследования шлифуемости высокопрочных титановых сплавов эльборовыми кругами высокой пористости по критерию шероховатости / Я.И. Соллер, И.А. Гуцол, В.Л. Нгуен и др. // *Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием*. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – С. 46–53.

32. *Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu.* Selecting abrasive wheels for the plane grinding of airplane parts of the basis surface roughness // *Russian engineering research*. – 2010. – Vol. 30, iss. 3. – P. 251–261. – doi: 10.3103/S1068798X10030111.

33. *Соллер Я.И., Михайлюк Э.А.* Динамика и точность фрезерования высокопрочных материалов // *Механика деформируемых сред в технологических процессах: межвузовский сборник научных трудов*. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. – С. 106–111.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(69), October – December 2015, Pages 18–30

Select of abrasive wheels while pendular grinding of parts from titanium alloy VT22 by high roughness parameters**Soler Ya. I.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: solera@istu.irk.ru**Mai D. S.**, Ph.D. student, e-mail: mdsmm07@gmail.com

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

Abstract

At the present time, grinding of the titanium alloys parts is performed much less than other constructional materials that don't meet the demands of branches of engineering industries: aircraft, rocket, energy and others. This is due to the sticking of chips on the working surface of the abrasive tools from silicon carbide and electrocorundum because of the high adhesion activity between the titanium and the traditional abrasives at cutting working temperatures. To solve this problem, the high porous wheels (HPW) made of cubic boron nitride CBN30 with 100% concentration on a bond V (K27), a pore-forming KF40, varied grains: B76, B126, B151 (GOST R 53922 – 2010) – and hardness: M and O (GOST R 52587 – 2006) were used to grind titanium workpieces. Additionally the Norton wheels from green silicon carbide with a normal porosity 39C (46; 60) K8 VK and with different grain size were tested. With account for the instability of the grinding process and the random nature of roughness formation, the observation analysis was led using the statistical approaches. It allowed considering the random variables (RV), the characteristics of the one-dimensional frequency distribution which are measures of position (mean, median) and measures of scattering (standard deviation, range and quartile latitudes (QL)). In the technical applications parametric and nonparametric statistical methods were used. The first direction requires that the RV have homoscedasticity and normal distribution that is not fully secured in this study. For this reason, the nonparametric method was selected priority. Its characteristics are medians and QL. It is established that varying the process variables for each group of instruments is insignificant by measures of position. Norton wheels provide reduction of roughness height 1.6 – 1.7 times in comparison with boron nitride HPW. These are recommended for the finishing grinding stage and HPW CBN30 – the preliminary to reduce the thermal effects on workpieces. By processing stability, the Norton wheels with grain 46 rank the first, and among boron nitride HPW - CBN30 B76 100 OV K27–KF40.

Keywords:

grinding, titanium alloy, roughness, statistic, mean, median, measure of position.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-18-30

References

1. Balla O.M., Zamashchikov Yu.I., Livshits O.P. et al. *Frezy i frezerovanie* [Mills and milling]. Irkutsk, IrGTU Publ., 2006. 172 p. ISBN 5803803774
2. Chechulin B.B., Ushkov S.S., Razuvaeva I.N., Gol'dfain V.N. *Titanovye splavy v mashinostroenii* [Titanium alloys in mechanical engineering]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977. 248 p.
3. Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiya shlifovaniya metallov* [Metal grinding technology]. Stary Oskol, TNT Publ., 2013. 616 p. ISBN 978-5-94178-373-1
4. Leyens C., Peters M., eds. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag, 2003. 532 p. ISBN 978-3-527-30534-6
5. Kremen' Z.I., Yur'ev V.G. *Shlifovanie superabrazivami vysokoplastichnykh splavov* [Super abrasive grinding of superplastic alloys]. Saint Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2013. 167 p. ISBN 978-5-7422-1034-1
6. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Krutinova A.A., Kremenetskii L.L. *Issledovanie khimicheskogo sostava poverkhnostnogo sloya titanovogo splava pri shlifovanii ego krugom iz karbida kremniya bez ispol'zovaniya SOTS* [The study of the chemical composition of the surface layer of the titanium alloy at grinding by silicon carbide wheel without lubricant-cooling agent]. *STIN – Russian Engineering Research*, 2015, no. 1, pp. 26–29. (In Russian)

7. Polkanov E.G., Kiskin O.S., Golemi S., Ryabtsev S.L. Primenenie vysokoporistykh krugov iz sinterkorunda pri profil'nom shlifovanii fasonnogo rezhushchego instrumenta [Application of highly porous wheels from sintered corundum for profile grinding the shaped cutting tool]. *SPRAVOCHNIK. Inzhenernyi zhurnal – HANDBOOK. An Engineering Journal*, 2008, no. 11, pp. 30–32.
8. Wójcik R. The grinding of titanium alloys. *Archives of Mechanical Technology and Automation*, 2013, vol. 33, no. 4, pp. 49–60.
9. Sayutin G.I., Bogutskii A.D., Mel'nikov G.A. Primenenie krugov iz el'bora dlya shlifovaniya titanovykh i zharoprochnykh splavov [The use CBN wheels for grinding titanium and superalloys]. *Stanki i instrument – Machines and tooling*, 1975, no. 2, pp. 30–31. (In Russian)
10. Sayutin G.I. *Vybor shlifoval'nykh krugov (dlya obrabotki zharoprochnykh splavov i instrumental'nykh staley)* [Selection of grinding wheel (for the treatment of heat-resistant alloys and tool steels)], Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 64 p.
11. Sayutin G.I., Tatarinov I.P. Vybor materiala kruga pri shlifovanii titanovykh splavov [The choice of material for grinding wheel titanium alloys]. *Stanki i instrument – Soviet Engineering Research*, 1985, no. 7, pp. 21–22. (In Russian)
12. Yang Ch.Y., Xu J.H., Ding W.F., Tong S.T. Grinding titanium alloy with brazed monolayer CBN wheels. *Key Engineering Materials*, 2007, vol. 359–360, pp. 33–37. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.359-360.33
13. Xu X., Yu Y., Huang H. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys. *Wear*, 2003, Vol. 255, iss. 7–12, pp. 1421–1426. doi: 10.1016/S0043-1648(03)00163-7
14. Kremen' Z.I., Yur'ev V.G., Baboshkin A.F. *Tekhnologiya shlifovaniya v mashinostroyeni* [Grinding technology in mechanical engineering]. Saint Petersburg, Politehnika Publ., 2007. 424 p. ISBN 978-5-7325-0517-7
15. Kremen' Z.I. Vysokoporistye krugi – effektivnoe sredstvo povysheniya proizvoditel'nosti shlifovaniya i kachestva detalei iz razlichnykh materialov [The highly porous wheels – an effective means of increasing productivity and quality of grinding parts made of various materials]. *Instrument i tekhnologii – Tools and Technology*, 2001, no. 5–6, pp. 34–37.
16. Kremen' Z.I., Popovskii D.A., Yur'ev V.G. Shlifovanie titanovykh splavov shlifoval'nymi krugami na osnove el'bora i almaza [Glazing titanium alloys by diamond-dressed and borazon-dressed wheels]. *Vestnik mashinostroeniya – Russian Engineering Research*, 2013, no. 5, pp. 66–69. (In Russian)
17. Makarov V.F. *Sovremennyye metody vysokoeffektivnoi abrazivnoi obrabotki zharoprochnykh staley i splavov* [Modern methods of highly abrasion machining of heat-resistant steels and alloys]. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2013. 320 p. ISBN 978-5-8114-1481-9
18. Turley D.M. Factors affecting surface finish when grinding titanium and a titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Wear*, 1985, vol. 104, iss. 4, pp. 323–335. doi:10.1016/0043-1648(85)90040-7
19. Guoqiang G., Zhiqiang L., Qinglong A., Ming Ch. Experimental investigation on conventional grinding of Ti-6Al-4V using SiC abrasive. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 57, iss. 1, pp. 135–142. doi: 10.1007/s00170-011-3272-z
20. Suslov A.G., Bez'yazychnyi V.F., Panfilov Yu.V., Bishutin S.G., Govorov I.V., Gorlenko A.O., Petreshin D.I., Sakalo V.I., S'yanov S.Yu., Tikhomirov V.P., Fedonin O.N., Fedorov V.P., Finatov D.N., Shcherbakov A.N. *Inzheneriya poverkhnosti detalei* [Surface engineering details]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 318 p. ISBN 978-5-217-03427-7
21. Unyanin A.N. *Nauchnoe i tekhnologicheskoe obespechenie shlifovaniya zagotovok iz plastichnykh staley i splavov s predotvrashcheniem zasalivaniya abrazivnykh krugov. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Scientific and technological support for the grinding of workpieces plastic steels and alloys to prevent clogging of abrasive wheels. Dr. eng. sci. diss.]. Ulyanovsk, 2006. 537 p.
22. Korolev A.V., Reshetnikova O.P., Noskov A.S. Geometricheskie parametry rezhushchei chasti abrazivnykh zeren [The geometrical parameters of abrasive grains cutting part]. *STIN – Russian Engineering Research*, 2015, no. 5, pp. 2–7.
23. GOST 53923–2010. *Krugi almaznye i iz kubicheskogo nitrída bora (el'bora) shlifoval'nye. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 53923–2010. Diamond and cubic boron nitride (elbor) grinding wheels. Specifications]. ISO 22917:2004. Superabrasives – Limit deviations and run-out tolerances for grinding wheels with diamond or cubic boron nitride (MOD). Moscow, Standartinform Publ., 2011. 32 p.
24. Grinding wheels. NORTON. Available at: <http://www.tehnotools.com/upload/iblock/9be/9be7e214f25e68c5398c87614355aa31.pdf> (accessed 02.11.2015) (In Russian)
25. GOST 2789–73. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry, kharakteristiki i oboznacheniya* [State Standard 2789–73. Surface roughness. Parameters and characteristics]. Moscow, Standartinform Publ., 1973. 10 p.

26. GOST 53922-2010. *Poroshki almaznye i iz kubicheskogo nitrída bora (el'bora). Zernístost' i zernovoi sostav shlifporoshkov. Kontrol' zernovogo sostava* [State Standard 53922-2010. Diamond and from cubic boron nitride (elbon) powders. Grain and grain size distribution of grinding powders. Test of grain size distribution]. ISO 6106:2005. Abrasive products – Checking the grit size of superabrasives (MOD). Moscow, Standartinform Publ., 2011. 11 p.
27. GOST 25142–82. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Terminy i opredeleniya* [State Standard 25142–82. Surface roughness. Term and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 1982. 20 p.
28. Wheeler D.J., Chambers D.S. *Understanding statistical process control*. Introduction by W. Edwards Deming. Knoxville, Tennessee, SPC Press, 1992 (Russ. ed.: Uiler D., Chambers D. *Statisticheskoe upravlenie protsessami: optimizatsiya biznesa s ispol'zovaniem kontrol'nykh kart Shukharta*. Moscow, Al'pina Biznes Buks Publ., 2009. 409 p. ISBN 978-5-9614-0832-4).
29. Hollander M., Wolfe D.A. *Nonparametric statistical methods*. 2nd ed. Wiley-Interscience Publ., 1999. 816 p. ISBN-10 0471190454. ISBN-13 978-0471190455
30. GOST R ISO 5725–1–2002. *Tochnost' (pravil'nost' i pretsizionnost') metodov i rezul'tatov izmerenii. Ch. 1. Osnovnye položeniya i opredeleniya* [Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Pt. 1. General principles and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2002. 31 p.
31. Soler Ya.I., Gutsol I.A., Nguen V.L. et al. [The experimental and statistical methods for studying high-strength titanium alloys grindability CBN wheels high porosity on the criterion of roughness]. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno–tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem “Zhiznennyi tsikl konstruktsionnykh materialov (ot polucheniya do utilizatsii)”* [Proceedings of the 3rd All-Russian scientific conference with international participation “The life cycle of construction materials (from receipt to disposal)”]. Irkutsk, 2013, pp. 46–53. (In Russian)
32. Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu. Selecting abrasive wheels for the plane grinding of airplane parts of the basis surface roughness. *Russian engineering research*, 2010, vol. 30, iss. 3, pp. 251–261. doi: 10.3103/S1068798X10030111
33. Soler Ya.I., Mihailyuk E.A. [Dynamics and precision of milling high-strength materials]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov “Mekhanika deformiruemykh sred v tekhnologicheskikh protsessakh”* [Interuniversity collection of scientific papers “Mechanics of deformable media in technological processes”]. Irkutsk, 2000, pp. 106–111. (In Russian)

Article history:

Received 19 June 2015

Revised 17 July 2015

Accepted 20 October 2015

УДК 622.002.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ СЕКТОРОВ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЙ СЕКЦИИ ГЕОХОДА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КООРДИНАТНОГО КОНТРОЛЯ*

А.В. ВАЛЬТЕР, канд. техн. наук, доцент
В.В. АКСЕНОВ, доктор техн. наук, профессор
В.Ю. БЕГЛЯКОВ, канд. техн. наук, доцент
П.А. ЧАЗОВ, ассистент
(ЮТИ ТПУ, г. Юрга)

Поступила 8 сентября 2015
Рецензирование 8 октября 2015
Принята к печати 10 ноября 2015

Вальтер А.В. – 652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26,
Юргинский технологический институт (филиал) федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
e-mail: avwalter@tpu.ru

Изложены результаты исследования фактической точности оболочки стабилизирующей секции опытного образца геохода. Работа содержит краткий обзор ряда подходов к моделированию механизмов формирования погрешностей кольцевых сегментных изделий и определению их фактической точности. Сформулирована задача экспериментальной проверки допущений, принимаемых при моделировании. Проведенное в статье исследование выполнено на основе экспериментальных данных, полученных путем координатного контроля оболочки опытного образца геохода. Для анализа экспериментальных данных, создания математических моделей, их исследования, визуализации данных и формирования отчетов разработано специальное программное обеспечение. Анализ данных проводился путем математического моделирования поверхности оболочки стабилизирующей секции в целом и поверхностей каждого отдельного сектора. Полученные математические модели основаны на аппроксимации наборов точек, полученных в процессе координатного контроля, цилиндрическими поверхностями. В статье показано, что, по меньшей мере, значительная часть отклонений геометрической формы оболочки секции (от 30,3 до 52,3 %) объясняется погрешностями расположения секторов и погрешностями их радиусов. На основе выполненного моделирования были определены абсолютные величины соответствующих погрешностей и действительные значения размеров и отклонений. Исследования подтвердили возможность обеспечения заданной точности поверхности оболочки при реализации технологии сборки, использованной в опытном производстве. В то же время близость фактических величин отклонений к предельно допустимым значениям может привести к проблемам в обеспечении стабильного качества корпусных изделий геохода в серийном производстве. Проведен корреляционный анализ данных координатного контроля и статистический анализ рядов остатков разработанных моделей. Корреляционный анализ подтвердил зависимость отклонений экспериментальных точек от их цилиндрических координат, что подтверждает значимость погрешности расположения секторов в отклонениях от геометрической точности оболочки. Результаты статистического анализа рядов остатков моделей показал, что погрешности расположения секторов и погрешности их радиусов не являются единственными значимыми факторами в формировании неточностей оболочки стабилизирующей секции.

Ключевые слова: крупногабаритные кольцевые сегментные изделия, сборка, геометрическая точность, допуск, геоход, оболочка.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-31-42

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

Введение

Корпус геохода [1] является важнейшей составной частью аппарата, выполняющей функцию базового изделия для установки большей части систем геохода и отделяющей внутреннее рабочее пространство аппарата от геосреды. В процессе эксплуатации корпус геохода подвергается серьезным нагрузкам как со стороны окружающего массива пород, так и со стороны механизмов, размещенных в аппарате [2]. В связи с этим к конструкции корпуса и качеству его изготовления предъявляются повышенные требования. Одним из важнейших аспектов данных требований является геометрическая точность оболочки (наружной поверхности), непосредственно влияющая на энергоэффективность машины и ресурс ее основных систем [3].

Корпусы геохода относятся к кольцевым сегментным изделиям, а один из наиболее существенных факторов, усложняющих технологию изготовления корпусов геохода – это их разъемность [4]. Каждый из корпусов состоит из нескольких секторов, соединенных друг с другом при помощи разъемных соединений (рис. 1). Это приводит к тому, что на геометрическую

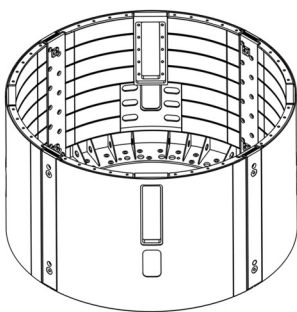


Рис. 1. Корпус стабилизирующей секции опытного образца геохода

точность влияет большое количество факторов, определяющих точность составных частей корпуса и точность сборки корпуса. В работе [5] показано, что взаимное положение секторов при сборке, а также погрешность радиуса оболочки каждого сектора оказывают самое непосредственное влияние на отклонения формы оболочки. Там же предложена модель для определения отклонений на основе значений допусков на составные части корпуса и параметры технологической наладки в процессе сборки. Модель определения отклонений, основанная на учете допусков формы сопрягаемых поверхностей,

приведена в работе [6], а расширенный на трехмерное пространство вариант модели представлен в работе [7].

В то же время практика технологии машиностроения показывает, что значимость тех или иных факторов на возникающие в технологическом процессе погрешности может быть надежно выявлена лишь по итогам реализации исследуемой технологии [8]. Это объясняется не только сложностью аналитического описания влияния разнообразных факторов на точность, но и сложным характером взаимодействия погрешностей [9]. Векторная и вероятностная природа погрешностей приводит к сложным механизмам их суммирования, при которых одна погрешность может поглощаться или компенсироваться другой. В связи с этим во многих работах, посвященных вопросам точности, закономерности формирования погрешностей исследуются на основе данных контроля изготовленных по анализируемой технологии изделий. Подобный подход, примененный к кольцевым сегментным изделиям, продемонстрирован в работе [10]. В этой работе, как и в ряде других, контроль геометрической точности изделий базируется на принципе координатного контроля [11]. Это связано с тем, что

именно координатный контроль позволяет получить достаточно широкий набор данных для дальнейшего анализа точности и выявить характер погрешностей [12].

В значительной части работ, касающихся точности кольцевых сегментных изделий, в качестве основного (зачастую единственного) фактора формирования погрешностей рассма-

тривается погрешность взаимного положения составных частей изделия [6, 7]. Такой подход не бесспорен и требует экспериментальной проверки. К тому же появившийся в последнее время производственный опыт по изготовлению стабилизирующей секции опытного образца геохода показывает, что, по всей видимости, значимыми могут оказаться такие факторы, как деформации составных частей корпусов, вызываемые процессами сварки и обработки давлением.

Все сказанное выше позволяет сформулировать задачу исследования в следующем виде:

установить величину и характер погрешности положения стабилизирующей секции геохода на основе данных координатного контроля, оценить значимость данной погрешности и возможность рассматривать ее в качестве преваляющего фактора, формирующего отклонения от геометрической точности оболочки.

1. Методика координатного контроля

Контролю подвергался корпус стабилизирующей секции геохода, изготовленный в условиях опытного производства. В качестве средства координатного контроля использовалась координатно-измерительная машина (КИМ) «FARO Arm Edge 9» типа «искусственная рука» (основные характеристики приведены в табл. 1). Выбор данного вида оборудования в первую очередь обусловлен значительными габаритами корпуса (диаметр – 3200 мм, длина – 1790 мм), которые не позволяют использовать для контроля большинство стационарных КИМ, а также затрудняют использование оптических и лазерных 3D-сканеров.

В процессе контроля корпус устанавливается вертикально на контрольную плиту. На той же плите базируется КИМ. Контроль проводится за четыре позиции КИМ – по одной на каждый сектор корпуса. Для получения координат фиксируемых точек в единой системе координат исполь-

зуется привязка КИМ по базирующим конусам. Для каждого из секторов снимаются координаты от 71 до 90 точек на поверхности оболочки (в зависимости от состояния поверхности).

Первичная обработка данных контроля проводилась в пакете программ PowerINSPECT. Координаты зафиксированных в процессе контроля точек оболочки представлялись в системе координат, связанной с плоскостью контрольной плиты. Для этого на контрольной плите при помощи КИМ были зафиксированы девять точек. Начало системы координат задавалось центром окружности, которая является сечением цилиндра, описанного вокруг всех зафиксированных точек оболочки (прилегающего цилиндра), в плоскости контрольной плиты. Результаты первичной обработки данных контроля оболочки приведены в табл. 2. Следует отметить, что полученные в результате измерений значения отклонений размеров и формы оболочки удовлетворяют требованиям конструкторской документации.

2. Анализ данных координатного контроля

Для подробного анализа и определения величин погрешностей положения секторов данные импортировались в специально разработанную программу. Функционирование программы

Таблица 1

Характеристики координатно-измерительной машины

Наименование характеристики	Значение
Размер рабочей зоны, мм	2700
Число степеней свободы	7
Погрешность линейных измерений (по ISO 10360-2:2009), мм	±0,041
Повторяемость (по ISO 10360-2:2009), мм	0,029
Тип измерений	Контактные

Таблица 2

Результаты первичной обработки данных координатного контроля

Наименование величины	Обозначение	Значение
Диаметр прилегающего цилиндра, мм	D	3195,934
Отклонение от цилиндричности, мм	Δ_C	9,463
Координаты направляющего вектора оси прилегающего цилиндра в базовой системе координат	a_{x0}	0,00146
	a_{y0}	0,00040
	a_{z0}	1,00000

основывается на создании регрессионных моделей цилиндрических поверхностей (модели оболочки корпуса в целом – МОКЦ и моделей

отдельных секторов – МОС) и их последующем исследовании [13]. Последовательность выполняемого анализа схематично приведена на рис. 2.

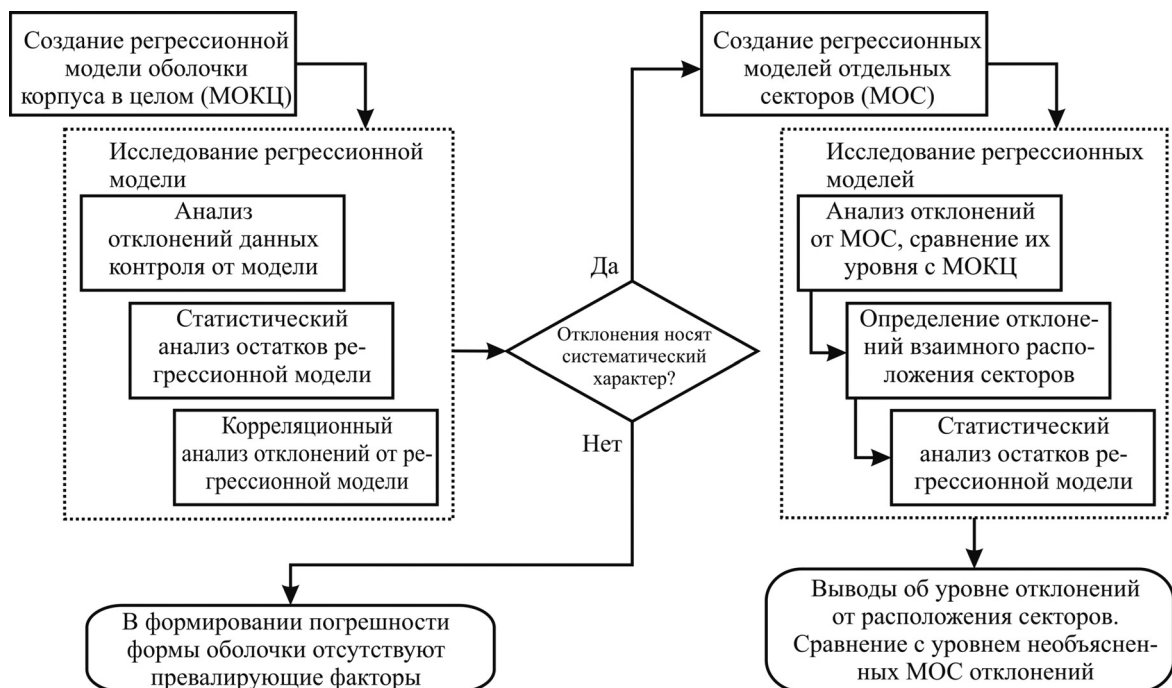


Рис. 2. Последовательность анализа данных координатного контроля

На первом этапе анализа была разработана регрессионная модель оболочки корпуса в целом, основанная на аппроксимации точек цилиндрической поверхностью. Модель формулируется следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 &\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} - r + \varepsilon_i = 0; \\
 &A = -a_y z_i - \sqrt{1 - a_x^2 - a_y^2} (y_0 - y_i); \\
 &B = \sqrt{1 - a_x^2 - a_y^2} (x_0 - x_i) + a_x z_i; \\
 &C = a_x (y_0 - y_i) - a_y (x_0 - x_i),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где x_i, y_i, z_i – координаты аппроксимируемых точек; a_x, a_y, x_0, y_0, r – неизвестные коэффициенты регрессии, имеющие следующий геометрический смысл: a_x, a_y – координаты направляющего вектора оси аппроксимирующего цилиндра; x_0, y_0 – координаты точки, через которую проходит ось аппроксимирующего цилиндра; r – радиус аппроксимирующего цилиндра (АЦ); ε_i – остаток регрессионной модели.

Направляющий вектор оси аппроксимирующего цилиндра принимался единичным, а точка оси принималась лежащей в плоскости XU , т. е.

$$\begin{aligned}
 a_z &= \sqrt{1 - a_x^2 - a_y^2}; \\
 z_0 &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Коэффициенты регрессии определялись по методу наименьших квадратов [14]. Результаты создания регрессионной модели приведены в табл. 3. На рис. 3 изображен аппроксимирующий цилиндр и зафиксированные в ходе контроля точки.

Для того чтобы сопоставить полученные в ходе контроля точки с аппроксимирующим цилиндром, их координаты преобразовывались в систему координат, связанную с его осью, и в дальнейшем переводились в цилиндрическую систему координат $Z-\theta-r$. При этом угловые координаты θ для каждого сектора переводились в первую четверть. На рис. 4 и 5 приведены зависимости радиуса r от полярных координат Z и θ . Как следует из графиков, во многих случаях существует выраженная закономерность изменения радиуса r с изменением цилиндрических координат Z и θ . О том же говорят и данные проведенного корреляционного анализа, представленные в табл. 4.

Характеристики регрессионных моделей поверхностей

Наименование величины	Обозначение	Общий цилиндр	Сектор 1	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4
Радиус аппроксимирующего цилиндра, мм	r	1595,254	1595,015	1591,890	1604,451	1610,183
Координаты точки оси аппроксимирующего цилиндра, мм	x_0	-1,210	-4,849	-7,02070	-9,36417	16,551
	y_0	0,652	2,585	-8,01030	-7,89340	-8,622
	z_0	0	0	0	0	0
Координаты направляющего вектора оси аппроксимирующего цилиндра	a_x	0,00128	0,00440	0,00637	0,00372	-0,00003
	a_y	-0,00006	-0,00185	0,00257	0,00107	0,00271
	a_z	0,99999	0,99999	0,99998	0,99999	0,99999
Стандартное отклонение, мм	σ	2,10460	1,42102	1,11303	1,32553	0,99011
Максимальное отклонение, мм	ε_{\max}	5,25217	2,75851	2,84905	3,23230	1,83216
Минимальное отклонение, мм	ε_{\min}	-4,49901	-4,03908	-3,09642	-3,32721	-2,81700
Полное отклонение, мм	ε_f	9,75118	6,79759	5,94547	6,55951	4,64916
Доля необъясненных моделью отклонений (в процентах от полного отклонения общего цилиндра)	q	100 %	69,7 %	61,0 %	67,3 %	47,7 %

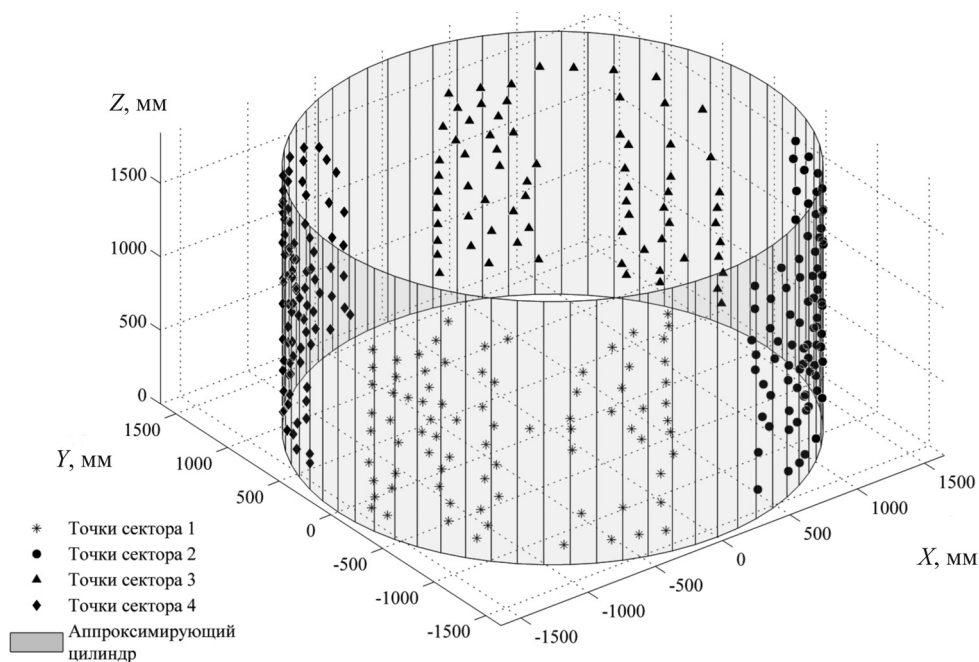


Рис. 3. Результат аппроксимации набора точек

Таким образом, можно предположить, что отклонения радиуса ρ от МОКЦ носят систематический характер. Для выявления характера отклонений от регрессионной модели исследовался ряд остатков ε (табл. 5). Проводился анализ соответствия ряда остатков закону нормального

распределения по критерию Эппса–Палли [15], наличия тренда в рядах $\varepsilon(\theta)$ и $\varepsilon(Z)$ по критерию поворотных точек [16] и наличия автокорреляции в рядах $\varepsilon(\theta)$ и $\varepsilon(Z)$ по критерию Дарбина–Уотсона [17]. Анализ показал, что ряд остатков МОКЦ не является случайным.

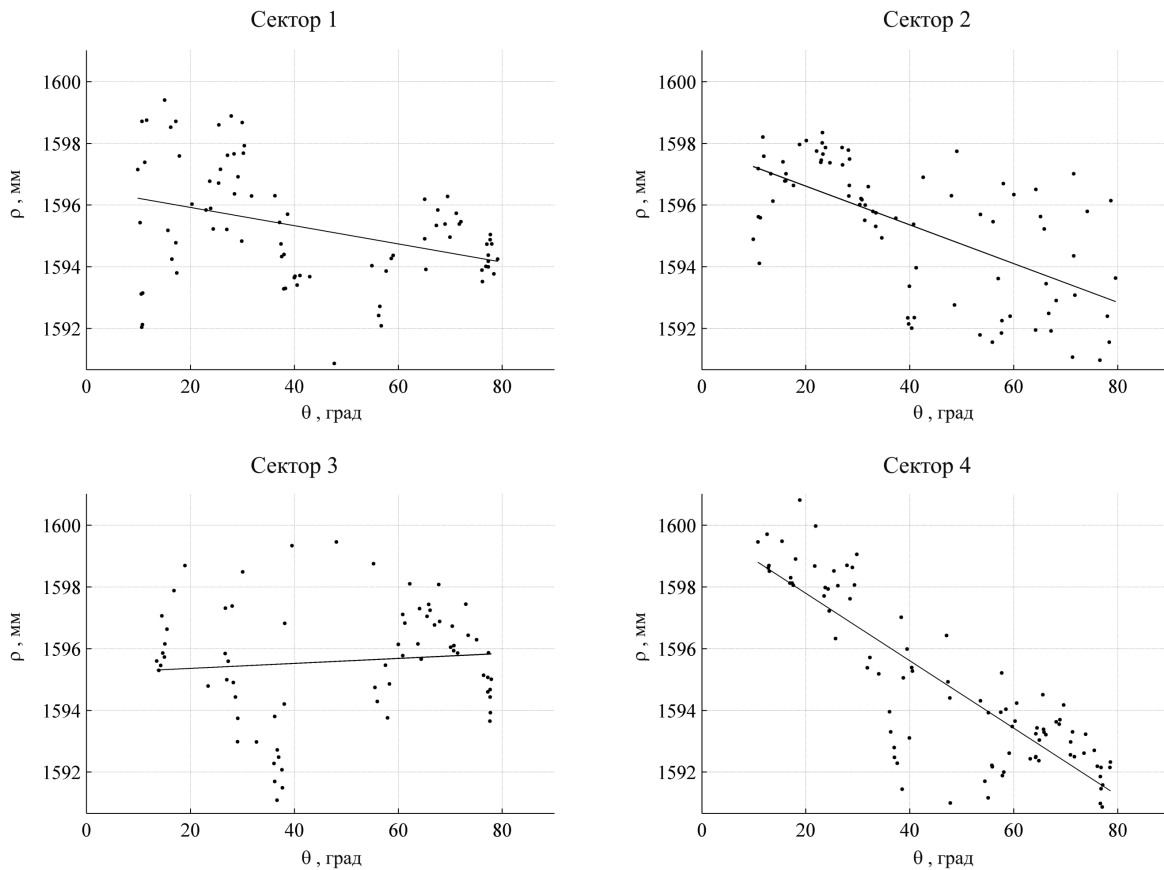
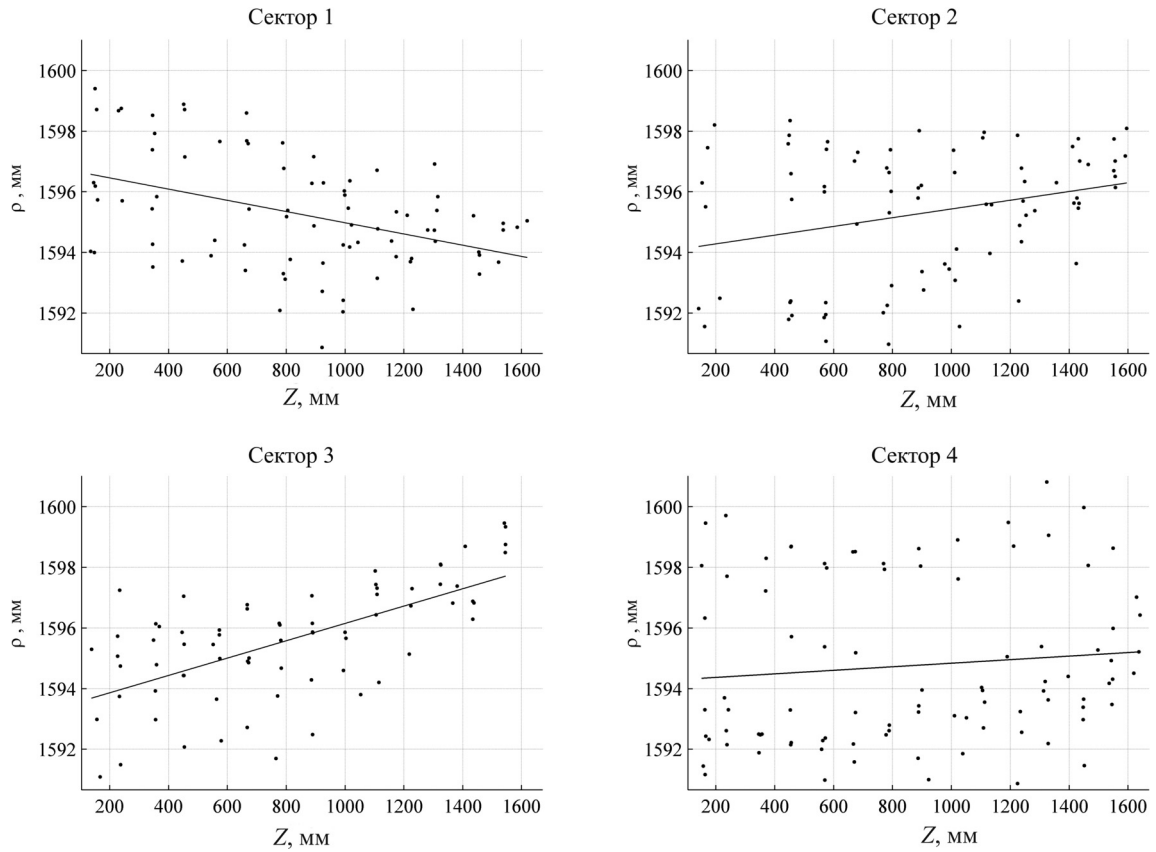


Таблица 4

Данные корреляционного анализа

Наименование величины	Общий цилиндр	Сектор 1	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4
Коэффициент корреляции $\rho(Z)$	0,1261	-0,2688	0,3687	0,7075	0,2633
Уровень значимости корреляции $\rho(Z)$	0,0237	0,0159	$7,6 \times 10^{-4}$	$5,3 \times 10^{-12}$	0,0117
Коэффициент корреляции $\rho(\theta)$	-0,1683	-0,4562	-0,7387	0,4235	0,1330
Уровень значимости корреляции $\rho(\theta)$	0,0024	$2,1 \times 10^{-5}$	$5,2 \times 10^{-15}$	$2,3 \times 10^{-4}$	0,2087
Количество точек	322	80	80	71	91

Таблица 5

Данные анализа рядов остатков

Наименование величины	Общий цилиндр	Сектор 1	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4
Статистика Эппса–Палли	0,9053	0,3363	0,6347	0,1949	0,7006
Критическое значение (уровень значимости $\alpha = 0,05$)	0,3803	0,3754	0,3754	0,3751	0,3757
Вывод о соответствии остатков закону нормального распределения	Не соответствует	Соответствует	Не соответствует	Соответствует	Не соответствует
Количество поворотных точек в ряду $\varepsilon(\theta)$	211	51	51	44	57
Вывод о наличии тренда в ряду $\varepsilon(\theta)$	Наличие тренда не выявлено				
Количество поворотных точек в ряду $\varepsilon(Z)$	204	57	52	42	62
Вывод о наличии тренда в ряду $\varepsilon(Z)$	Наличие тренда не выявлено				
Критическое число поворотных точек (уровень значимости $\alpha = 0,05$)	198,5	44,7	44,7	39,1	51,5
Статистика Дарбина–Уотсона для ряда $\varepsilon(\theta)$	0,6454	0,7655	0,9767	0,7242	1,18
Вывод о наличии автокорреляции в ряду остатков $\varepsilon(\theta)$	Имеется положительная автокорреляция				
Статистика Дарбина–Уотсона для ряда $\varepsilon(Z)$	1,8416	1,9726	1,9843	2,0224	1,9245
Вывод о наличии автокорреляции в ряду остатков $\varepsilon(Z)$	Автокорреляция отсутствует				
Интервалы значимости статистики Дарбина–Уотсона (уровень значимости $\alpha = 0,05$)	1,5488	1,4650	1,4650	1,4330	1,4989
	1,6154	1,5140	1,5140	1,4884	1,5433
	2,3846	2,4860	2,4860	2,5116	2,4567
	2,4512	2,5350	2,5350	2,5670	2,5011

Далее определялись модели каждого из четырех секторов по уравнениям и с использованием методики, аналогичной той, что применялась при определении МОКЦ. Результаты аппроксимации секторов цилиндрическими поверхностями приведены в табл. 3. На основе данных о координатах осей были вычислены отклонения расположения секторов. На рис. 6 представлены наглядные изображения отклонений расположения. В табл. 6 приведены характеристики отклонений.

Для выяснения, насколько полно погрешность формы оболочки стабилизирующей секции можно объяснить погрешностью взаимного

положения секторов, координаты точек переводились в системы координат, связанные с осями соответствующих цилиндрических поверхностей, аппроксимирующих секторы, по методике, сходной с приведенной в [18].

Аналогично МОКЦ для каждой из МОС выполнялся корреляционный анализ (табл. 4) и анализ ряда остатков (табл. 5).

3. Результаты и обсуждение

Исследование регрессионной модели оболочки корпуса в целом показало, что отклонения проконтролированных точек соответствуют

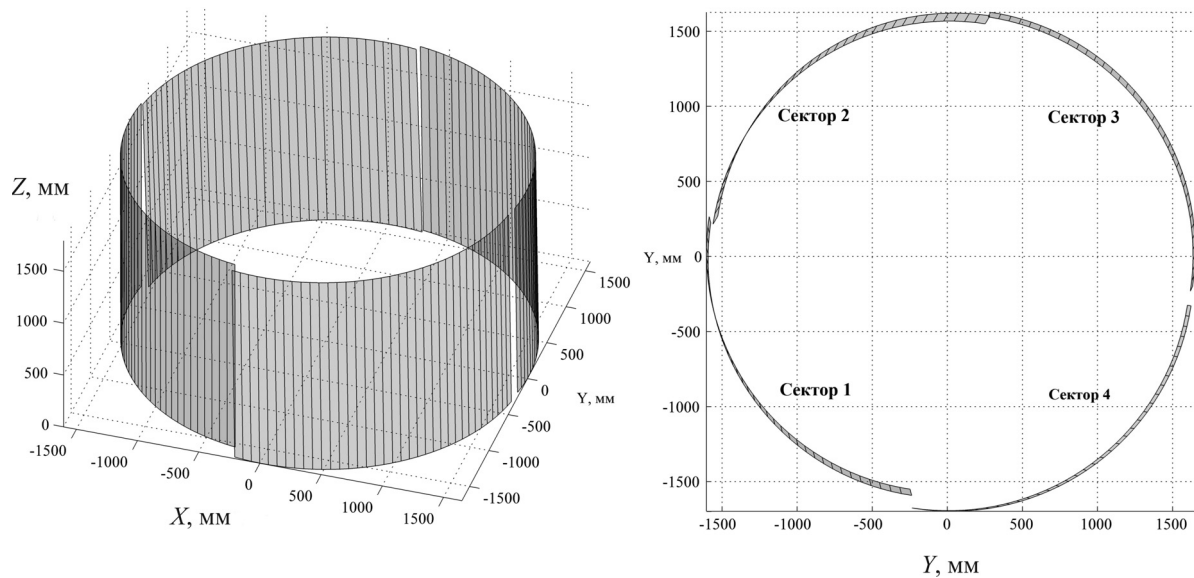


Рис. 6. Аппроксимирующие секторы (отклонения увеличены в 5 раз)

Таблица 6

Характеристики отклонений расположения секторов

Наименование величины	Обозначение	Сектор 1	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4
Смещение в плоскости XU , мм	d	4,12	10,43	11,81	20,04
Угол направления смещения, град	ψ	152,024	-123,851	-133,655	-27,57
Угол наклона сектора, град	α	0,206	0,328	0,154	0,175
Угол направления наклона, град	φ	-29,888	27,256	24,828	115,342

установленным к стабилизирующей секции требованиям точности. В то же время отклонения близки к границам полей допусков, что в серийном производстве может привести к нарушению требований к качеству продукции. Таким образом, задача повышения геометрической точности оболочек корпусов геохода может быть признана востребованной.

Корреляционный анализ зависимостей радиуса проконтролированных точек относительно оси общего цилиндра показал, что существует статистически значимая связь между полярными координатами точек и радиусом (см. табл. 3). Особенно сильно эта связь проявляется в случае, если рассматривать отдельные для каждого из секторов наборы точек, как показано на рис. 4 и 5. Наиболее естественной причиной данного явления могут являться отклонения взаимного положения отдельных секторов.

Исследование ряда остатков МОКЦ показал, что отклонения от модели носят систематический характер. Подтверждением этого является

несоответствие ряда остатков закону нормального распределения (см. табл. 5) и наличие автокорреляции в ряду остатков $\varepsilon(\theta)$. Это означает, что отклонения вызваны одним или несколькими превалирующими факторами. В качестве превалирующего фактора в исследовании рассматривались отклонения взаимного положения секторов и сложно взаимосвязанные с ними погрешности радиусов каждого из секторов, что связано с рядом проведенных ранее теоретических исследований (см. [5; 19; 20]).

Характеристики моделей отдельных секторов показывают, что секторы имеют значительные отклонения расположения относительно оболочки в целом как по углам ориентации, так и по линейным смещениям (см. табл. 6). В частности, линейные смещения достигают 20,04 мм, т. е. превышают величину допусков на геометрическую точность оболочки. Тем не менее, как отмечалось выше, оболочка в целом соответствует требованиям точности. Это связано с компенсацией погрешности радиуса сектора путем его

смещения. Подтверждением последнего является и то, что величины смещения увеличиваются с увеличением величины отклонения действительного радиуса сектора относительно номинального (см. табл. 3). Данное явление описано и теоретически обосновано в работе [5]. Таким образом, при изготовлении секций геохода может использоваться подход компенсации погрешностей по ходу различных стадий производственного процесса [21] или подбор оптимального сочетания экземпляров составных частей и их расположения в сборке [22].

Изучение величин отклонений от МОС показывает, что модели описывают существенную долю отклонений – от 30,3 до 52,3 % от полного отклонения общего цилиндра. В то же время значительная доля отклонений не объясняется лишь погрешностями взаимного положения секторов и погрешностями радиусов секторов.

Исследование рядов остатков моделей оболочек секторов (см. табл. 5) показало, что отклонения от моделей носят систематический характер. Последнее подтверждается наличием автокорреляции в ряду остатков $\varepsilon(\theta)$. Кроме того, для секторов 2 и 4 наблюдается несоответствие ряда остатков закону нормального распределения. Это позволяет говорить о том, что в процессе производства существуют другие факторы, проявляющиеся в виде погрешности формы отдельных секторов и оказывающие значительное влияние на точность оболочки в целом. Причем среди этих факторов имеются преобладающие, которые вызывают систематические отклонения от геометрической точности оболочки.

Выводы

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Отклонения от геометрической точности оболочки стабилизирующей секции опытного образца геохода имеют систематический характер, из чего следует, что формирование погрешностей связано с наличием нескольких преобладающих факторов, характер влияния которых может быть установлен путем разработки и исследования соответствующих математических моделей.

2. Значимую роль в формировании отклонений играют погрешности взаимного положения секторов стабилизирующей секции и их радиу-

сов. Величины отклонений являются существенными и способны объяснить порядка 30...50 % от общей погрешности.

3. Подтвержден сложный характер совместного влияния погрешностей взаимного положения секторов и их радиуса на точность оболочки в целом. Результаты анализа координатного контроля показывают практическую возможность компенсации неточностей отдельных секторов путем их смещения относительно номинального положения.

4. Отклонения расположения секторов и погрешности их радиусов не могут рассматриваться как единственные значимые факторы, обуславливающие формирование неточностей оболочки. Помимо них в процессе производства существуют и другие, в настоящее время не установленные механизмы формирования систематических погрешностей геометрической точности оболочки.

Список литературы

1. *Efremenkov A.B.* Forming the subterranean space by means of a new tool (geohod) // Proceedings of the 6th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2011), Harbin, 22–24 August 2011. – Harbin, 2011. – Vol. 1. – P. 348–350. – doi: <http://dx.doi.org/10.1109/IFOST.2011.6021037>.

2. *Аксенов В.В., Бегляков В.Ю., Капустин А.Н.* Анализ несущих конструкций (корпусов) известных технических систем применимых в качестве корпуса (носителя) геохода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 6 (106). – С. 34–36.

3. *Капустин А.Н.* Предпосылки разработки формы корпуса геохода // Проблемы геологии и освоения недр: труды XVII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 150-летию со дня рождения академика В.А. Обручева и 130-летию академика М.А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы, 1–6 апреля 2013 г., г. Томск: в 2 т. – Томск, 2013. – Т. 2. – С. 320–321.

4. *Вальтер А.В., Аксенов В.В.* Варианты обеспечения точности оболочек и собираемости корпусов геохода // Механика XXI века. – 2015. – № 14. – С. 89–92.

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

6. Straight-build assembly optimization: a method to minimize stage-by-stage eccentricity error in the assembly of axisymmetric rigid components (two-dimensional case study) / T. Hussain, Z. Yang, A.A. Popov, S. McWilliam // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2011. – Vol. 133, iss. 3. – P. 031014/1–031014/9. doi:10.1115/1.4004202.

7. Memon M., Hussain T., Memon Z.A. Minimizing assembly errors by selecting optimum assembly sequence in the assembly of a rigid circular structure // *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology*. – 2012. – Vol. 31, iss. 4. – P. 743–754.

8. Безъязычный Б.Ф., Непомилуев В.В. Некоторые проблемы современного сборочного производства и перспективы их преодоления // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2009. – № 8 (109). – С. 18–25.

9. Аксенов В.В., Вальтер А.В., Лагунов С.Е. Настройка положения опор методом триангуляции при сборке секций геохода // *Технологии и материалы*. – 2015. – № 1. – С. 31–36.

10. Lowth S., Axinte D.A. An assessment of “variation conscious” precision fixturing methodologies for the control of circularity within large multi-segment annular assemblies // *Precision Engineering*. – 2014. – Vol. 38. – P. 379–390. – doi:10.1016/j.precisioneng.2013.12.004.

11. Mian S.H., Al-Ahmari A. Enhance performance of inspection process on coordinate measuring machine // *Measurement*. – 2014. – Vol. 47. – P. 78–91. – doi: 10.1016/j.measurement.2013.08.045.

12. An exploration into measurement consistency on coordinate measuring machines / P. Saunders, A. Wilson, N. Orchard, N. Tatman, P. Maropoulos // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 25. – P. 19–26. – doi:10.1016/j.procir.2014.10.005.

13. Zone-Ching Lin, Wen-Jang Wu. Multiple linear regression analysis of the overlay accuracy model // *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*. – 1999. – Vol. 12, iss. 2. – P. 229–237. – doi: 10.1109/66.762881.

14. Nievergelt Y. Fitting cylinders to data // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. – 2013. – Vol. 239. – P. 250–269.

15. Modeling statistic distributions for nonparametric goodness-of-fit criteria for testing complex hypotheses with respect to the inverse Gaussian law / B.Y. Lemeshko, S.B. Lemeshko, M.S. Nikulin, N. Saaidia // *Automation and Remote Control*. – 2010. – Vol. 71. – N 7. – P. 1358–1373. – doi: 10.1134/S000511791007009X.

16. Kendall M.G., Stuart A. The advanced theory of statistics. Vol. 3. Design and analysis, and time-series. – 2nd ed. – London: Charles Griffin, 1968. – 567 p. – ISBN 0852640692. – ISBN 978-0852640692.

17. Durbin J., Watson G.S. Testing for serial correlation in least squares regression. III // *Biometrika*. – 1971. – Vol. 58, iss. 1. – P. 1–19.

18. Вальтер А.В. Программное обеспечение автоматизированного анализа кинематики процесса резания // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2008. – № 1. – С. 18–19.

19. Walter A.V., Aksenov V.V. Determining deviations in geometry of the geokhod shells // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 770. – P. 439–444. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.439.

20. Вальтер А.В., Аксенов В.В. Определение отклонений геометрической формы оболочек корпусных изделий геохода // *Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник трудов Международной научно-практической конференции*. – Томск: ТПУ, 2014. – С. 165–170.

21. Jiao Y., Djurdjanovic D. Compensability of errors in product quality in multistage manufacturing processes // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2011. – Vol. 30, iss. 4. – P. 204–213. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.439.

22. Шилин А.Н., Петров С.А., Заярный В.П. Автоматизация определения оптимальных условий сборки корпусов нефтегазового оборудования // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2010. – № 6 (119). – С. 10–14.

ОБРАБОТКА METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(69), October – December 2015, Pages 31–42

Determining the error of location of geokhod stabilizing section sectors on the basis of coordinate measurement data

Walter A. V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: avwalter@tpu.ru

Aksenov V. V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: v.aksenov@icc.kemsc.ru

Beglyakov V. Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: begljakov@gmail.com

Chazov P. A., Assistant, e-mail: chapaese@gmail.com

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

Abstract

The results of research factual accuracy of the shell stabilizing section of the geokhod prototype are presented. The paper contains an overview of a number of approaches to modeling the mechanisms of formation errors of the ring segmented items and determine its factual accuracy. The problem of experimental verification of the assumptions adopted in the simulation is posed. The study is performed on the basis of experimental data obtained by the coordinate measurement of the geokhod prototype. For the analysis of experimental data, the creation of mathematical models, its research, visualization data and reporting special software is developed. Data is analyzed by the method of mathematical simulation of the shell surface of the stabilizing section in whole and each sector. It is shown that, a significant portion of shell section geometric shape deviations (from 30,3 to 52,3 %) is due to errors in the location of sectors and errors of their radii. On the basis of the simulation absolute values of the respective errors and the actual values of dimensions and deviations are determined. The possibility of providing a given accuracy in the implementation of the shell surface assembly technology used in pilot production is confirmed. At the same time, the proximity of the actual values of the deviations to the limit values can lead to problems in ensuring the consistent quality of geokhod bodies in serial production. The correlation analysis of the data and statistical analysis of series of residuals of the developed models are made. Correlation analysis confirms the dependence of the deviations of the experimental points from their cylindrical coordinates, which confirms the importance of the location of the error sectors in deviations from the geometric precision shell. The results of the statistical analysis of series of models of residues shows that the error location and error sectors of their radii are not the only ones, are significant factors in shaping inaccuracies shell stabilizing section.

Keywords:

large segmented-ring items, assembly, accuracy, geokhod, shell.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-31-42

References

1. Efremenkov A.B. Forming the subterranean space by means of a new tool (geohod). *Proceedings of the 6th International Forum on Strategic Technology IFOST-2011*, Harbin, 22–24 August 2011, pp. 348–350. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/IFOST.2011.6021037>
2. Aksenov V.V., Beglyakov V.Yu., Kapustin A.N. Analiz nesushchikh konstruktiv (korpusov) izvestnykh tekhnicheskikh sistem primenimyykh v kachestve korpusa (nosatelya) geokhoda [Analysis of load-bearing structures (buildings) of the prior art systems useful as the body (carrier) of geokhod]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Kuzbass State Technical University*, 2014, iss. 6 (106), pp. 34–36.
3. Kapustin A.N. [Background of design hull shape geohod]. *Trudy XVII Mezhdunarodnogo simpoziuma "Problemy geologii i osvoeniya nedr" imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 150-letiyu so dnya rozhdeniya akademika V.A. Obrucheva i 130-letiyu akademika M.A. Usova, osnovatelei Sibirskoi gorno-geologicheskoi shkoly: v 2 t.* [Proceedings of the 17th International Scientific Symposium of students, Postgraduates and young Scientists devoted to the 150th Anniversary of Academician V.A. Obruchev and 130th Anniversary of Academician M.A. Usov, Founders of Siberian Mining School: in 2 vol.]. Tomsk, 1–6 April 2013, vol. 2, pp. 320–321.
4. Walter A.V., Aksenov V.V. Varianty obespecheniya tochnosti obolochek i sobiraemosti korpusov geokhoda [Options for the accuracy of shells and housings collection geohod]. *Mekhaniki XXI veku – Mechanics of the XXI century*, 2015, no. 14, pp. 89–92.
5. Aksenov V.V., Walter A.V., Beglyakov V.Yu. Obespechenie geometricheskoi tochnosti obolochki pri sborke sektsii geokhoda [Ensuring the geometric accuracy of shell during assembly of Geohod sections]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 4 (65), pp. 19–28.
6. Hussain T., Yang Z., Popov A.A., McWilliam S. Straight-build assembly optimization: a method to minimize stage-by-stage eccentricity error in the assembly of axisymmetric rigid components (two-dimensional case study). *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011, vol. 133, iss. 3, pp. 031014/1–031014/9. doi:10.1115/1.4004202
7. Memon M., Hussain T., Memon Z.A. Minimizing assembly errors by selecting optimum assembly sequence in the assembly of a rigid circular structure. *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology*, 2012, vol. 31, iss. 4, pp. 743–754.

8. Bez'yazychnyi B.F., Nepomiluev V.V. Nekotorye problemy sovremennogo sborochного производства i perspektivy ikh preodoleniya [Certain problems of modern assembling and prospect methods of their solution]. *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii – Assembling in mechanical engineering and instrument-making*, 2009, no. 8 (109), pp. 18–25.
9. Aksenov V.V., Walter A.V., Lagunov S.E. Nastroyka polozheniya opor metodom triangulyatsii pri sborke sektsii geokhoda [Adjusting the position of supports by triangulation during assembly of geokhod sections]. *Tekhnologii i materialy – Technologies and materials*, 2015, no. 1, pp. 31–36.
10. Lowth S., Axinte D.A. An assessment of “variation conscious” precision fixturing methodologies for the control of circularity within large multi-segment annular assemblies. *Precision Engineering*, 2014, vol. 38, iss. 2, pp. 379–390. doi:10.1016/j.precisioneng.2013.12.004
11. Mian S.H., Al-Ahmari A. Enhance performance of inspection process on coordinate measuring machine. *Measurement*, 2014, vol. 47, pp. 78–91. doi: 10.1016/j.measurement.2013.08.045
12. Saunders P., Wilson A., Orchard N., Tatman N., Maropoulos P. An exploration into measurement consistency on coordinate measuring machines. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 25, pp. 19–26. doi:10.1016/j.procir.2014.10.005
13. Zone-Ching Lin, Wen-Jang Wu. Multiple linear regression analysis of the overlay accuracy model. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1999, vol. 12, iss. 2, pp. 229–237. doi: 10.1109/66.762881
14. Nievergelt Y. Fitting cylinders to data. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2013, vol. 239, pp. 250–269.
15. Lemeshko B.Y., Lemeshko S.B., Nikulin M.S., Saaidia N. Modeling statistic distributions for nonparametric goodness-of-fit criteria for testing complex hypotheses with respect to the inverse Gaussian law. *Automation and Remote Control*, 2010, vol. 71, iss. 7, pp. 1358–1373. doi: 10.1134/S000511791007009X
16. Kendall M.G., Stuart A. *The advanced theory of statistics. Vol. 3. Design and analysis, and time-series*. 2nd ed. London, Charles Griffin, 1968. 567 p. ISBN-10 0852640692. ISBN-13 978-0852640692
17. Durbin J., Watson G.S. Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression. III. *Biometrika*, 1971, vol. 58, iss. 1, pp. 1–19.
18. Walter A.V. Programmnoe obespechenie avtomatizirovannogo analiza kinematiki protsessa rezaniya [The software of the automated analysis of the kinematics of the cutting process]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2008, no. 1, pp. 18–19.
19. Walter A.V., Aksenov V.V. Determining deviations in geometry of the geokhod shells. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 770, pp. 439–444. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.439
20. Walter A.V., Aksenov V.V. [Determination of deviations of geometric shapes shells case products of geokhod]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Aktual'nye problemy sovremennogo mashinostroeniya”* [Proceedings of the International scientific and practical conference “Urgent problems of up-to-date mechanical engineering”]. Tomsk, 2014, pp. 165–170. (In Russian)
21. Jiao Y., Djurdjanovic D. Compensability of errors in product quality in multistage manufacturing processes. *Journal of Manufacturing Systems*, 2011, vol. 30, iss. 4, pp. 204–213. doi: 10.1016/j.jmsy.2011.07.002
22. Shilin A.N., Petrov S.A., Zayarnyi V.P. Avtomatizatsiya opredeleniya optimal'nykh uslovii sborki korpusov neftegazovogo oborudovaniya [Automatic definitions of optimization conditions for oil and gas equipment body assembly]. *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii – Assembling in mechanical engineering and instrument-making*, 2010, no. 6 (119), pp. 10–14.

Funding

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

Article history:

Received 8 September 2015

Revised 8 October 2015

Accepted 10 November 2015

ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЧАСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ЭТАПЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

*С.В. ЛУКИНА, доктор техн. наук, профессор,
(МГТУ «СТАНКИН», г. Москва)*

Поступила 4 сентября 2015
Рецензирование 5 октября 2015
Принята к печати 10 ноября 2015

Лукина С.В. – 127055, г. Москва, Вадковский переулок, 1,
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
e-mail: lukina_sv@mail.ru

Приведена методика сравнительной оценки качества конструкций режущих инструментов на этапе технической подготовки производства. Выделено десять групп обобщенных показателей, позволяющих произвести комплексную оценку качества конструкции инструмента по сформированной совокупности частных критериев оценки, выраженных через геометрические, конструктивные, структурные и эксплуатационные параметры режущего инструмента. По выделенным показателям сформирована система целевых функций, позволяющих определить параметры, характеризующие оптимальные конструкции режущих инструментов. Методика наглядна, универсальна и автоматизирована с использованием ЭВМ.

Ключевые слова: качество, система частных показателей, целевая функция, режущий инструмент, техническая подготовка производства.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-43-50

Введение

Современное состояние и перспективы развития металлообработки характеризуются широким использованием режущего инструмента, в том числе сборного, оснащенного сменными механически закрепляемыми режущими элементами, выполненными из твердых сплавов, керамики и сверхтвердых материалов [1, 3, 9, 12]. Наибольшее применение находят следующие инструменты: токарные проходные, подрезные, отрезные, расточные и автоматные резцы, кольцевые сверла, торцевые и концевые фрезы, внутренние и наружные протяжки и другие инструменты, основные размеры которых стандартизованы.

Многообразие условий обработки и недостаточное развитие расчетных методов, не позволяющих решать задачу выбора рациональной конструкции инструмента на стадии технической

подготовки производства, привели к созданию большой номенклатуры инструмента одного назначения. В настоящее время отечественными и зарубежными производителями разработано и эксплуатируется большое количество инструментов одинакового целевого назначения, а выбор подходящей конструкции осуществляется в основном на основании рекламных материалов или производственного опыта [6].

Задача выбора рациональных конструкций режущих инструментов является сложной и трудоемкой, требующей синтеза и оценки большого количества сочетаний структурных вариантов сборочных конструктивных элементов и значений их параметров. В этой связи актуальной является задача разработки методики сравнительной оценки качества проектных решений, позволяющей осуществить направленный выбор оптимального варианта на основании анализа и

оценки широкого спектра показателей различного производственно-технического назначения.

Целью работы является формирование системы частных показателей, позволяющих выполнить сравнительную оценку качества конструкций режущих инструментов на этапе технической подготовки производства. Сформированная система показателей позволит осуществить направленный выбор конструкции инструмента и, таким образом, повысить эффективность проектных решений.

Теория

Согласно рекомендациям международного стандарта ИСО 9000 [4, 18, 19] уровень качества объектов машиностроения следует оценивать по совокупности показателей: назначения, надежности, технологичности, унификации, патентно-правовых, безопасности, экологических, эргономических, эстетических и экономических. Оценить количественно перечисленные выше показатели качества достаточно сложно [1, 2, 6, 15–17, 20, 22, 23]. На этапе технической подготовки производства одной из основных является задача обоснования выбора варианта режущего инструмента из некоторого множества конструкций, отличающихся между собой, например, организацией режущей части для протяжек или способом крепления и базирования режущих элементов (СМП) у сборных инструментов [7, 8]. Сравнительную оценку вариантов конструкций режущих инструментов корректно проводить по частным показателям, количественно приведенным к показателям качества и аналитически выраженным через систему геометрических, конструктивных и эксплуатационных параметров инструментов [11].

Согласно разработанной методике показатели назначения, характеризующие основные свойства инструмента и область его рационального использования, следует оценивать по следующей системе частных показателей: точность (погрешность δ) и чистота обработанной поверхности (шероховатость R_a), масса (M), габаритные размеры инструмента (W) и т. д. Лучшим при прочих равных условиях будет являться вариант конструкции режущего инструмента, имеющий следующие значения частных показателей:

$$\delta \rightarrow \min, Ra \rightarrow \min,$$

$$K_{\text{бл}} = \frac{Q_c}{l_1} \rightarrow \max, \quad (2)$$

$$M = \sum_{i=1}^{l_1} W_i g_i \rightarrow \min.$$

Здесь $K_{\text{бл}}$ – коэффициент блочности; Q_c – количество стандартизованных элементов в компоновке инструмента; g – плотность инструментального материала; l_1 – общее количество элементов в конструкции режущего инструмента.

Показатели надежности определяют стабильность качества инструмента вследствие сохранения высоких показателей назначения в течение заданного интервала времени. К показателям надежности инструмента следует относить показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Для достоверной оценки надежности инструмента по приведенным показателям необходимо провести многочисленные экспериментальные исследования, накопить и обработать большое количество статистического материала по каждому из проектных вариантов, что практически невозможно на стадии проектирования [21].

Согласно разработанной методике показатели надежности могут быть оценены по комплексу частных показателей, таких как стойкость конструкции T_j , напряжения в теле инструмента σ , перемещения вершины инструмента U при приложении или снятии нагрузки, время восстановления инструмента $t_{\text{вос}j}$:

$$M = \sum_{i=1}^{l_1} W_i g_i \rightarrow \min, \sigma \rightarrow \min,$$

$$\Phi_{T_j} = v_j^x S_j^y t_j^z \rightarrow \max, \quad (2)$$

$$\Phi_{t_{\text{вос}j}} = x_{\text{тр}} x_{\text{к}} \frac{\Phi_{t_{\text{о}j}}}{\Phi_{T_j}} \rightarrow \min,$$

где Φ_{T_j} – величина, численно характеризующая переменную составляющую стойкости, зависящую от конструктивных и эксплуатационных параметров проектируемого инструмента; v_j – скорость резания, м/мин; S_j – подача; t_j – глубина или ширина резания, мм; x, y, z – показатели степени при v, S и t соответственно; $\Phi_{t_{\text{вос}j}}$ – переменная составляющая времени на восстановление инструмента (переточку или по-

ворот режущего элемента); $x_{гр}$ – количество рабочих граней СМП; x_k – количество элементов крепления СМП.

Напряжения в теле инструмента σ и перемещения вершины режущей кромки инструмента U могут быть определены для каждого варианта конструкции в ходе проведения серии лабораторных или численных экспериментов [3, 5, 14].

Эргономические показатели характеризуют свойства человеко-машинной системы и учитывают физиологические, гигиенические и психологические свойства человека. К числу частных эргономических показателей проектируемого инструмента следует относить норму времени Φ_t на операцию металлообработки; наличие и состав СОТС; уровень вибрации технологической системы; допустимую скорость резания; силу крепления режущих элементов; габаритные размеры и массу инструмента [12].

Таким образом, при оценке эргономичности проектируемой конструкции необходимо обеспечить:

$$\begin{aligned} \Phi_t \rightarrow \min, A \rightarrow \min, f \rightarrow \min, \\ M \rightarrow \min, W \rightarrow \min, B \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь A – амплитуда собственных колебаний инструмента; f – частота колебаний инструмента; B – состав СОТС.

Эстетичность проектируемой конструкции режущего инструмента следует определять по наличию в ее компоновке определенного набора конструктивных элементов. Например, любая конструкция режущего инструмента состоит из рабочей x_1 и хвостовой x_2 частей: $l_1 = \{x_1, x_2\}$. Рабочая часть инструмента l_{x_1} состоит из режущей x_{11} и калибрующей x_{12} частей. Хвостовая часть инструмента l_{x_2} объединяет в себе корпусную x_{21} , направляющую x_{22} и крепежную x_{23} части. Величины $l_{x_{11}}$, $l_{x_{21}}$, $l_{x_{23}}$ и определяют области формирования основных частей режущей, корпусной, направляющей и крепежной частей инструмента соответственно.

Эстетичность проектируемой конструкции следует определять по следующим частным показателям:

$$\begin{aligned} l_{x_1} \rightarrow \min, l_{x_2} \rightarrow \min, l_{x_{11}} \rightarrow \min, \\ l_{x_{21}} \rightarrow \min, l_{x_{22}} \rightarrow \min, l_{x_{23}} \rightarrow \min, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_{1_{\min}} \leq l_1 \leq l_{1_{\max}}, l_{x_{1_{\min}}} \leq l_{x_1} \leq l_{x_{1_{\max}}}, \\ l_1 = [l_1], l_{x_1} = [l_{x_1}]. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $[l_{x_1}]$, $[l_1]$ – минимально допустимый в соответствии со служебным назначением набор конструктивных элементов рабочей части и инструмента в целом [7, 8].

Показатели технологичности характеризуют свойство проектируемой конструкции, обуславливающее оптимальное распределение материальных и трудовых ресурсов в течение жизненного цикла инструмента. К числу частных критериев, характеризующих технологичность проектируемого варианта конструкции режущего инструмента, следует относить: минимальные затраты на основные материалы Φ_{KM} ; минимальную стоимость (себестоимость) изготовления инструмента $\Phi_{ст}$; минимальную стоимость (себестоимость) сборки инструмента $\Phi_{Ксб}$; минимальное основное время на операцию металлообработки $\Phi_{то}$; минимальную длину инструмента Φ_L .

Таким образом, технологичность проектируемой конструкции может быть оценена по следующей системе частных показателей:

$$\begin{aligned} \Phi_{KM} \rightarrow \min, \Phi_{ст} \rightarrow \min, \Phi_{Ксб} \rightarrow \min, \\ \Phi_{то} \rightarrow \min, \Phi_L \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (5)$$

Экологические показатели характеризуют уровень вредного воздействия на окружающую среду, возникающего при эксплуатации инструмента. Частным показателем, отражающим уровень экологичности проектируемой конструкции инструмента, является показатель рационального стружкозаивания (стружкодробления) при резании:

$$\begin{aligned} \lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}, \gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max}, \\ S_{\min} \leq S \leq S_{\max}, r_{\min} \leq r \leq r_{\max}, \\ h_{\min} \leq h \leq h_{\max}, B_{\min} \leq B \leq B_{\max}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь λ – угол наклона главной режущей кромки инструмента; γ – передний угол; r – радиус скругления вершины режущей кромки; S_z – подъем на зуб; h – высота зуба; B – ширина резания; \min и \max – минимально и максимально допустимые значения соответствующих параметров.

Показатели безопасности характеризуют особенности проектируемой конструкции инструмента обеспечивать безопасность человека при ее эксплуатации. К частным показателям безопасности режущего инструмента следует относить показатель рационального стружкодробления при резании, максимально допустимую скорость резания v , прочность механизма крепления элементов конструкции и инструмента в целом при соблюдении ограничения:

$$P_{\min} \leq P \leq P_{\max}, \quad (7)$$

где P_{\min} , P_{\max} – минимально и максимально допустимая сила резания.

При оценке конструкции проектируемого режущего инструмента следует рассчитывать показатель патентной чистоты варианта:

$$\Phi_{K_{пт}} = \sum_{j=1}^{l_1} \sum_{i=1}^{10} \frac{l_1 - N_{ij}}{l_1} k_{ij} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где N_{ij} – количество составных элементов инструмента, защищенных авторскими свидетельствами или патентами в Российской Федерации или в странах предполагаемого экспорта; k_{ij} – коэффициент весомости j -го составного элемента конструкции Российской Федерации, защищенного авторскими свидетельствами или патентами в Российской Федерации или в странах предполагаемого экспорта по i -му показателю качества.

Среди показателей унификации, характеризующих насыщенность конструкции унифицированными и оригинальными составными элементами, следует выделить способность к унификации корпусных (l_{x21}) и крепежных (l_{x23}) элементов с различными вариантами режущих элементов (l_{x11}), вспомогательным инструментом и металлорежущим оборудованием. Показатель унификации может быть лимитирующим при оценке вариантов конструкций модульного режущего инструмента [12]. Унификацию сборного режущего инструмента следует определять по следующим соответствиям:

$$l_{x11} \subset l_{x21}, \quad l_{x11} \subset l_{x23}, \quad l_{x21} \subset l_{x23}. \quad (9)$$

Заключение о технико-экономическом уровне режущего инструмента в общем случае может быть сформулировано на основе анализа обобщенных критериев эффективности – себестоимости и производительности операции металлообработки.

стоимости и производительности операции металлообработки.

При сравнительной оценке качества вариантов конструкций инструментов, отличающихся либо компоновкой, либо типоразмером, а следовательно, своей стоимостью и временем резания, следует определять переменную составляющую технологической себестоимости операции металлообработки:

$$C = t_j(K_{3i} + K_{эnj} + K_{инj}) \rightarrow \min, \quad (10)$$

где t_j – норма времени на j -ю операцию металлообработки; K_{3j} , $K_{эnj}$, $K_{инj}$ – нормативы затрат на заработную плату основных рабочих, силовую электроэнергию, на режущий инструмент при выполнении j -й операции металлообработки.

Без учета стоимости возвратных отходов величина $K_{инj}$ характеризуется первоначальной стоимостью (или себестоимостью) единицы рабочего инструмента $C_{инj}$ и стоимостью (себестоимостью) восстановлений рабочего инструмента (переточек или поворотов режущего элемента) $C_{восj}$:

$$K_{инj} = \frac{C_{инj} + C_{восj}}{T_j n_{восj}} \rightarrow \min$$

или

$$K_{инj} = \Phi_{K_{инj}} K_{инj} \rightarrow \min, \quad (11)$$

здесь $\Phi_{K_{инj}}$ – величина, численно характеризующая переменную составляющую затрат на инструмент; $K_{инj}$ – постоянная величина затрат, не зависящая от конструктивных и эксплуатационных параметров проектируемого инструмента; T_j – средняя стойкость инструмента между двумя восстановлениями;

$$C_{восj} = \Phi_{C_{восj}} K_{восj} \rightarrow \min, \quad (12)$$

где $K_{восj}$ – возможное количество восстановлений инструмента; $\Phi_{C_{восj}}$ – величина, численно характеризующая переменную составляющую затрат на восстановление инструмента.

Например, для сборного режущего инструмента переменная составляющая затрат на восстановление определяется количеством рабочих граней режущего элемента ($x_{гр}$) и количеством режущих элементов ($x_{пл}$):

$$\Phi_{C_{восj}} = x_{гр} x_{пл} \rightarrow \min. \quad (13)$$



Для сравнительной оценки вариантов конструкций режущих инструментов, проектируемых для обработки конкретной детали, достаточно провести анализ и расчет составляющей нормы времени на операцию t_{nj} , определяемой основным временем на операцию t_{oj} и временем на восстановление режущего элемента $t_{восj}$:

$$t_{nj} = t_{oj} + t_{восj} \rightarrow \min, \tag{14}$$

где $t_{oj} = \Phi_{toj} K_{toj} \rightarrow \min$. Здесь Φ_{toj} , K_{toj} – соответственно переменные и постоянные составляющие основного времени на операцию металлообработки.

Например, для сборного режущего инструмента величины, численно характеризующие переменные составляющие нормы времени и производительности операции металлообработки, следует определять по выражениям

$$\Phi_{t_n} = \Phi_{t_o} + x_{гр} x_k \frac{\Phi_{t_o}}{\Phi_T}, \tag{15}$$

$$\Phi_{\Pi} = \frac{\Phi_T}{\Phi_{t_o} (\Phi_T + x_{гр} x_k)} \rightarrow \max.$$

Величины, численно характеризующие переменные составляющие технологической себестоимости операции металлообработки с использованием проектируемого инструмента и технологической себестоимости обработки поверхности, следует определять по выражениям

$$\Phi_C \sum_{i=1}^{l_1} (\Phi_{K_{инi}} + K_C) \Phi_{t_{\Pi i}} \rightarrow \min, \tag{16}$$

$$\Phi_{Спов} = \sum_{j=1}^{n_{\Pi}} \sum_{i=1}^{l_1} (\Phi_{K_{инi}} + K_C) \Phi_{t_{\Pi ij}} \rightarrow \min,$$

где K_C – коэффициент, определяющий долю затрат на инструмент к затратам на заработную плату и электроэнергию; $j = 1, \dots, n_{\Pi}$ – количество операций технологического процесса обработки поверхности.

Для комплексной оценки уровня качества конструкции режущего инструмента достаточно рассчитать обобщенный показатель $\Phi_{Кср}$, представляющий собой аддитивную свертку частных критериев (1)–(16):

$$\Phi_{Кср} = \sum_{j=1}^{\Phi} \sum_{i=1}^{10} \Phi_{ij} m_i \rightarrow \min. \tag{17}$$

Здесь Φ_{ij} – значение частного показателя качества режущего инструмента; m_i – параметр веса i -го показателя качества; Φ – общее число целевых функций подлежащих учету [9].

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований сформирована методика сравнительной оценки качества конструкций режущих инструментов по совокупности частных критериев.

Установлено, что сравнительная оценка качества режущих инструментов может быть произведена по совокупности частных критериев, отражающих широкий спектр показателей различного производственно-технического назначения, а именно показателей назначения, надежности, технологичности, унификации, патентно-правовых показателей, безопасности, экологических, эргономических, эстетических и экономических.

Аналитическими зависимостями (1)–(6), (8), (10)–(16) описаны целевые функции, характеризующие принятые критерии и позволяющие произвести сравнительную оценку вариантов конструкций инструментов в соответствии с производственным заданием.

Для комплексной оценки уровня качества конструкции режущего инструмента на этап технической подготовки производства сформирован обобщенный показатель, представляющий собой аддитивную свертку частных критериев (1)–(16).

Разработанная методика, представленная в виде совокупности целевых функций частных критериев сравнительной оценки и расчетных алгоритмов поиска оптимального решения, практически реализована в среде электронных таблиц Microsoft Excel для оценки качества конструкций протяжек, токарных резцов и торцевых фрез. Выбор Microsoft Excel в качестве инструмента обоснован наличием встроенных функций и алгоритмов поиска решения, высокой доступностью и наглядностью приложения [4, 8, 11, 13].

Выводы

1. Сформирована методика сравнительной оценки качества конструкций режущих

инструментов, основанная на формировании совокупности частных критериев, отражающих широкий спектр показателей различного производственно-технического назначения, и соответствующих им целевых функций, выраженных через систему геометрических, конструктивных и эксплуатационных параметров инструментов.

2. Практическая апробация методики, проведенная путем сравнительной оценки конструкций круглых и шлицевых протяжек, токарных резцов и торцевых фрез, показала обоснованность выбора оптимальных решений и работоспособность сформированного алгоритма.

Список литературы

1. Григорьев С.Н., Маслов А.Р., Завгородний В.И. Обеспечение заданного качества деталей при высокоскоростной обработке // Вестник МГТУ «Станкин». – 2010. – № 1. – С. 38–40.
2. Гришина Т.Г. Философский анализ рисков как критериев оценки технической системы // Вестник МГТУ «Станкин». – 2014. – № 1 (28). – С. 164–166.
3. Гуляев Ю.Б., Лукина С.В. Автоматизированная система проектирования и выбора сборных торцевых фрез по частным критериям оценки напряженно-деформированного состояния инструмента. – М., 2006. – 180 с. – Деп. в ВИНТИ, № 793-B2006.
4. ИСО 9000–1–94. Общее руководство качеством и стандарты по обеспечению качества. Ч. 1: Руководящие указания по выбору и применению. – М.: ВНИИС, 1995. – 50 с.
5. Косов М.Г. Современные подходы к осмыслению понятия «техническое» // Вестник МГТУ «Станкин». – 2014. – № 1 (28). – С. 156–159.
6. Кутин А.А., Вороненко В.П. Технология управления качеством и производительностью механосборочного производства // Вестник МГТУ «Станкин». – 2010. – № 1. – С. 15–23.
7. Лукина С.В. Автоматизация процедур формирования и выбора структурных компоновок сборных режущих инструментов на этапе технической подготовки производства // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 3, № 1. – С. 241–247.
8. Лукина С.В. Моделирование процедур формирования и выбора структурных компоновок сборных режущих инструментов на основе сетевых граф-моделей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2009. – № 2. – С. 28–30.
9. Лукина С.В. Оценка конкурентоспособности сборных металлорежущих инструментов на этапе их проектирования и выбора // Сборка в машиностроении и приборостроении. – 2011. – № 9. – С. 3–8.
10. Лукина С.В. Повышение эффективности проектирования сборного режущего инструмента на базе установленных взаимосвязей конструкторско-технологических и экономических решений: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1999. – 448 с.
11. Лукина С.В., Крутякова М.В. Современные проблемы организации и управления инструментальным обеспечением машиностроительных производств: учебное пособие. – М.: МГТУ «МАМИ», 2013. – 116 с.
12. Маслов А.Р. Конструирование инструментальной оснастки. – М.: Янус-К, 2012. – 151 с. – ISBN 978-5-8037-0557-4.
13. Проектирование протяжек оптимальных конструкций в среде Microsoft Excel / С.В. Лукина, М.В. Крутякова, О.П. Куприянова, П.Ф. Вялкова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 1 (46). – С. 24–26.
14. Соболев А.Н., Косов М.Г., Некрасов А.Я. Моделирование конструкций корпусных деталей с использованием расчетных макроэлементов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2014. – № 3 (30). – С. 98–101.
15. Relationships between the integration of audits and management systems: an empirical study / M. Bernardo, M. Casadesus, S. Karapetrovic, I. Heras // The TQM Journal. – 2011. – Vol. 23, iss. 6. – P. 659–672. – doi: 10.1108/17542731111175266.
16. Mani M., Lyons K., Sriram R. Developing a sustainability manufacturing maturity model // Proceedings from the IMS 2020 Summer School on Sustainable Manufacturing. – Zurich, Swiss. – 2010. – P. 311–321.
17. Action research in industrial engineering: design organization proposal for its application / C.H.P. Mello, J.B. Turrioni, A.F. Xavier, D.F. Campos // Production Journal. – 2012. – Vol. 22, N 1. – P. 1–13. – doi: 10.1590/S0103-65132011005000056.
18. Nowicki P., Kafel P., Sikora T. Selected requirements of integrated management systems based on PAS 99 specification // International Journal for Quality Research. – 2013. – Vol. 7, N 1. – P. 97–106.
19. PAS 99:2012. Specification of common management system requirements as a framework for integration. – London: BSI, 2012. – 35 p.
20. Lima E.P., Costa S.E.G., Angelis J.J. Framing operations and performance strategic management system design process // Brazilian Journal of Operations and Production Management. – 2010. – Vol. 5, N 1. – P. 23–46.
21. Sakovic M. Quality management in development of hard coatings on cutting tools // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2007. – Vol. 24, iss. 1. – P. 421–429.

22. Tari J.J., Molina-Azorin J.F. Integration of quality management and environmental management systems: similarities and the role of the EFQM model // *The TQM Journal*. – 2010. – Vol. 22, iss. 6. – P. 687–701. – doi: 10.1108/17542731011085348.

23. Zivkovic S., Takic L., Zivkovic N. The improvement of environmental performances by applying ISO 14001 standard – A case study // *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*. – 2013. – Vol. 19, N 4. – P. 541–552. – doi: 10.2298/CICEQ120513088Z.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(69), October – December, 2015, Pages 43–50

Formation of the system of the local indicators to assess the quality of the cutting tool at the stage of technical training of production

Lukina S.V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: lukina_sv@mail.ru

Moscow State University of Technology «Stankin», 1 Vadkovsky per., Moscow, 127055, Russian Federation

Abstract

The technique of a comparative assessment of quality of designs of the cutting tools on a stage of technical training of production. Ten groups of the generalized indicators allowing making a complex comparative assessment of quality of a design of the tool had allocated. Each group of the generalized indicators of quality had presented by set of local criteria. Local criteria had expressed through the variation geometric, design, structural and operational parameters of the cutting tools. The system of the target functions allowing determining parameters of optimum constructions of cutting tools depending on the selected criteria an assessment had created. For a complex comparative assessment of quality of cutting tools the generalized target function in the form of an additive convolution of private criteria had created. As an example, local target functions for comparison purposes of constructions of built-up tooling and broaches had created. The technique is evident, universal and automated with use of the personal computer.

Keywords:

quality, systems the local indicators, target function, cutting tool, technical training of production.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-43-50

References

1. Grigor'ev S.N., Maslov A.R., Zavgorodnii V.I. Obespechenie zadannogo kachestva detalei pri vysokoskorostnoi obrabotke [Guarantee of the assigned quality of the components with the high-speed working]. *Vestnik MGTU «Stankin» – Vestnik MSTU «Stankin»*, 2010, no. 1, pp. 38–40.
2. Grishina T.G. Filosofskii analiz riskov kak kriteriev otsenki tekhnicheskoi sistemy [Philosophical analysis of risks as criteria of the assessment technical system]. *Vestnik MGTU «Stankin» – Vestnik MSTU «Stankin»*, 2014, no. 1 (28), pp. 164–166.
3. Gulyaev Yu.B., Lukina S.V. *Avtomatizirovannaya sistema proektirovaniya i vybora sbornyykh tortsevykh frez po chastnym kriteriyam otsenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya instrumenta* [Automated system design and selection of interlocking surface cutters on partial criteria of assessment stress-strain state of the instrument]. Moscow, 2006. 180 p. Available from in VINITI, no. 793-B2006.
4. ISO 9000–1:1994. Quality management and quality assurance standards. Pt. 1: Guidelines for selection and use. Moscow, VNIIS Publ., 1995. 50 p. (In Russian)
5. Kosov M.G. Sovremennye podkhody k osmysleniyu ponyatiya «tekhnicheskoe» [Modern philosophical approaches to understanding the concept of «technical»]. *Vestnik MGTU «Stankin» – Vestnik MSTU «Stankin»*, 2014, no. 1 (28), pp. 156–159.
6. Kutin A.A., Voronenko V.P. Tekhnologiya upravleniya kachestvom i proizvoditel'nost'yu mekhanosborochno-go proizvodstva [Technological quality management and productivity of field assembly]. *Vestnik MGTU «Stankin» – Vestnik MSTU «Stankin»*, 2010, no. 1, pp. 15–23.

7. Lukina S.V. Avtomatizatsiya protsedur formirovaniya i vybora strukturnykh komponovok sbornykh rezhushchikh instrumentov na etape tekhnicheskoi podgotovki proizvodstva [Automating procedures for formation and choice of structural component layout of modular cutting tools in step of technical preparation production]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik Saratov State Technical University*, 2011, vol. 3, no. 1, pp. 241–247.
8. Lukina S.V. Modelirovanie protsedur formirovaniya i vybora strukturnykh komponovok sbornykh rezhushchikh instrumentov na osnove setevykh graf-modelei [Modeling procedures for formation and choice of structural component layout of modular cutting tools using network graph-models]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2009, no. 2, pp. 28–30.
9. Lukina S.V. Otsenka konkurentosposobnosti sbornykh metallorezhushchikh instrumentov na etape ikh proektirovaniya i vybora [Estimation of competitiveness of modular metal-cutting tools at a stage of their designing and a choice]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii – Assembling in mechanical engineering and instrument-making*, 2011, no. 9, pp. 3–8.
10. Lukina S.V. Povyshenie effektivnosti proektirovaniya sbornogo rezhushchego instrumenta na baze ustanovlennykh vzaimosvyazei konstruktorsko-tekhnologicheskikh i ekonomicheskikh reshenii. Diss. dokt. tekhn. nauk [Improving the efficiency of the design of the cutting tool on the basis of established relationships design and technological and economic decisions. Dr. eng. sci. diss.]. Moscow, 1999. 448 p.
11. Lukina S.V., Krutyakova M.V. *Sovremennye problemy organizatsii i upravleniya instrumental'nykh obespecheniem mashinostroitel'nykh proizvodstv* [Modern problems of organization and management of tool maintenance machine industry]. Moscow, MGТУ «MAMI» Publ., 2013. 116 p.
12. Maslov A.R. *Konstruirovaniye instrumental'noi osnastki* [Construction tooling]. Moscow, Yanus-K Publ., 2012. 151 p. ISBN 978-5-8037-0557-4
13. Lukina S.V., Krutyakova M.V., Kupriyanova O.P., Vyalkova P.F. Proektirovanie protyazhek optimal'nykh konstruksii v srede Microsoft Excel [Optimal design broaching in Microsoft Excel]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2010, no. 1 (46), pp. 24–26.
14. Sobolev A.N., Kosov M.G., Nekrasov A.Ya. Modelirovanie konstruksii korpusnykh detalei s ispol'zovaniem raschetnykh makroelementov [The modeling of constructions of gear housing details using calculating macrocells]. *Vestnik MGТУ «Stankin» – Vestnik MSTU «Stankin»*, 2014, no. 3 (30), pp. 98–101.
15. Bernardo M., Casadesus M., Karapetrovic S., Heras I. Relationships between the integration of audits and management systems: an empirical study. *The TQM Journal*, 2011, vol. 23, iss. 6, pp. 659–672. doi: 10.1108/17542731111175266
16. Mani M., Lyons K., Sriram R. Developing a sustainability manufacturing maturity model. Proceedings from the IMS 2020 Summer School on Sustainable Manufacturing. Zurich, Swiss, 2010, pp. 311–321.
17. Mello C.H.P., Turrioni J.B., Xavier A.F., Campos D.F. Action research in industrial engineering: design organization proposal for its application. *Production Journal*, 2012, vol. 22, no. 1, pp. 1–13. doi: 10.1590/S0103-65132011005000056
18. Nowicki P., Kafel P., Sikora T. Selected requirements of integrated management systems based on PAS 99 specification. *International Journal for Quality Research*, 2013, vol. 7, no. 1, pp. 97–106.
19. PAS 99:2012. Specification of common management system requirements as a framework for integration. London, BSI, 2012. 35 p.
20. Lima E.P., Costa S.E.G., Angelis J.J. Framing operations and performance strategic management system design process. *Brazilian Journal of Operations and Production Management*, 2010, vol. 5, no. 1, pp. 23–46.
21. Sakovic M. Quality management in development of hard coatings on cutting tools. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2007, vol. 24, iss. 1, pp. 421–429.
22. Tari J.J., Molina-Azorin J.F. Integration of quality management and environmental management systems: Similarities and the role of the EFQM model. *The TQM Journal*, 2010, vol. 22, iss. 6, pp. 687–701. doi: 10.1108/17542731011085348
23. Zivkovic S., Takic L., Zivkovic N. The improvement of environmental performances by applying ISO 14001 standard – A case study. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 2013, vol. 19, no. 4, pp. 541–552. doi: 10.2298/CICEQ120513088Z

Article history:

Received 4 September 2015

Revised 5 October 2015

Accepted 10 November 2015

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕСУЩИХ СИСТЕМ МАШИН С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

*Ю.И. ПОДГОРНЫЙ^{1,2}, доктор техн. наук, профессор
В.Ю. СКИБА¹, канд. техн. наук, доцент
А.В. КИРИЛЛОВ^{1,3}, канд. техн. наук, доцент
О.В. МАКСИМЧУК², канд. техн. наук, доцент
Д.В. ЛОБАНОВ⁴, доктор техн. наук, профессор
В.Р. ГЛЕЙМ¹, магистрант
А.К. ЖИГУЛЕВ¹, студент
О.В. САХА¹, студентка
¹НГТУ, г. Новосибирск,
²НТИ (филиал) «МГУДТ», г. Новосибирск,
³НГПУ, г. Новосибирск, ⁴БрГУ, г. Братск)*

Поступила 25 сентября 2015
Рецензирование 23 октября 2015
Принята к печати 15 ноября 2015

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

Рассматриваются вопросы динамического поведения несущих систем технологических машин в условиях эксплуатации. Целью данной работы является выработка рекомендаций для выбора ассортимента тканей на технологическом оборудовании (на примере ткацкого станка СТБ). Актуальность исследования обусловлена отсутствием рекомендаций по выбору технологического оборудования и единой методики, позволяющей учитывать динамический характер приложения технологического усилия. В результате проведенной работы выполнено уточнение ранее предложенной авторами расчетной модели несущих систем путем введения в нее дополнительных элементов, необходимых для работы станков при выработке определенного ассортимента тканей. Средствами САД системы SolidWorks и конечно-элементного САЕ комплекса ANSYS проведено уточнение частотного спектра собственных колебаний несущих систем для гаммы ткацких машин СТБ с заправочными ширинами 180, 190, 220, 250, 330 см. Диапазон изменения частот составляет: для первой частоты – от 24,9 Гц (СТБ-180) до 17,7 Гц (СТБ-330); для второй частоты – 26,7...20,8 Гц; для третьей частоты 54,8...25,2 Гц. Показано, что технологическая нагрузка от натяжения нитей основы может быть представлена как нагрузка от статического действия силы предварительного натяжения пружины подвижного скала и динамической составляющей, зависящей от работы механизмов машины. Также показано, что несущие системы ткацких машин при определенных режимах эксплуатации работают в условиях, близких к резонансу. Определены значения перемещений отдельных элементов несущих систем от технологической нагрузки, представленной рядом Фурье. Полученные результаты исследований позволяют выработать конкретные рекомендации в направлении разграничения ассортиментных возможностей ткацких машин типа СТБ в соответствии с установленными требованиями к санитарно-гигиеническим условиям при работе на оборудовании. На стадии проектирования технологического оборудования предлагается использовать форму и характер технологической нагрузки в виде синусоидального импульса с периодом действия, равным времени оборота главного вала станка, и амплитудой, равной статической составляющей действующей силы для определенного ассортимента тканей; проектировать конструкции несущих систем в соответствии с отношением частот вынужденных и свободных колебаний, равным трем и более, используя частотный

спектр вынужденных колебаний, полученный в результате разложения технологической нагрузки в ряд Фурье.

Ключевые слова: несущая система, технологическая машина, метод конечных элементов, частотный спектр собственных колебаний, технологическая нагрузка, гамма ткацких машин СТБ, вынужденные колебания, резонанс.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-51-60

Введение

Основные направления развития технологических машин в нашей стране – повышение технического уровня новой техники и доведение его до лучших зарубежных аналогов. Правильная оценка и прогнозирование технического состояния оборудования составляет важнейшее условие его использования. Существенной особенностью технологического оборудования текстильной промышленности является высокая кинематическая сложность движения основных механизмов и динамическая напряженность режимов их работы. Возрастание динамических нагрузок предъявляет повышенные требования к проектированию и изготовлению элементов и узлов машин, выбору упругой системы заправки [1]. Создание высокопроизводительного ткацкого оборудования сдерживается, в том числе из-за недостаточной разработки методов расчета и диагностирования технического состояния машин в целом и их отдельных узлов, в частности, конструкций несущих систем [2].

Выбор режимов эксплуатации технологического оборудования является актуальной задачей, так как в ряде случаев оборудование работает в условиях, близких к резонансным режимам, что может существенно увеличивать перемещения отдельных точек несущих систем, а это напрямую связано с санитарно-гигиеническими требованиями и качеством вырабатываемых тканей. В связи с этим при выборе режимов работы необходимо учитывать не только величины технологических нагрузок, но и время их действия [2]. Кроме того, на периоды действия технологических нагрузок оказывает влияние и частотный диапазон вращения главного вала машины. Отсутствие единой методики проектирования технологического оборудования не позволяет учитывать динамические характеристики, от которых зависит надежность и долговечность как отдельных механизмов, так и машины в целом.

Поэтому на стадии проектирования предлагается использовать математические модели несущих систем ткацких машин, которые могут определять такие диагностические параметры, как перемещения отдельных точек несущих систем и их амплитудно-частотные характеристики. В качестве обратной связи между параметрами, заложенными при проектировании и полученными на основе математической модели, можно использовать перемещения отдельных элементов, а также настройку частотного диапазона вынужденных колебаний за счет изменения частоты вращения главного вала.

Вопросам проектирования несущих систем технологического оборудования посвящены работы В.Г. Атапина, Ю.В. Кирилина, П.М. Чернянского. Так, в работах В.Г. Атапина рассматриваются вопросы проектирования и оптимизации несущих систем металлообрабатывающего оборудования [3–6]. Кирилин Ю.В. предлагает модернизацию несущих систем фрезерных станков осуществлять на основе их моделирования и расчета динамических характеристик [7–9]. В работах П.М. Чернянского даны основы проектирования кинематической схемы, несущей системы, привода, надежности и устойчивости динамической системы; особое внимание уделено физически обоснованным методам расчета точности и устойчивости динамической системы, оптимальных размеров, жесткости отдельных узлов [10, 11].

Анализ приведенных научно-исследовательских работ указывает на то, что методики синтеза и модернизации несущих систем в таком виде, как они представлены в работах, не могут быть применены для машин ткацкого производства. Несущие системы ткацких машин, по сравнению с машиностроительными конструкциями, являются более податливыми, и при их проектировании необходимо учитывать податливость элементов, контактирующих с нитями основы и тканью и входящих в упругую систему заправки.

Расчетная модель

Ранее авторами была предложена универсальная расчетная модель несущей системы для гаммы бесчелночных станков СТБ, адекватность которой подтверждена экспериментальными исследованиями [12]. В реальных условиях эксплуатации эта модель будет отличаться от той расчет-

ной модели, которая была представлена в работе [12]. В этом случае появляется необходимость в уточнении расчетной модели в связи с тем, что в нее должны быть внесены значительные изменения за счет появления дополнительных элементов, необходимых для работы оборудования. Значения инерционно-массовых характеристик приведены в табл. 1. Дополнительные элементы

Таблица 1

Значения характеристик конструктивных элементов для гаммы ткацких станков СТБ с заправочной шириной 180...330 см

Наименование конструктивного элемента	Наименование характеристики	Заправочная ширина, см				
		180	190	220	250	330
Задняя связь	Вес, Н	421	421	496	558	697,4
	Длина, мм	2290	2290	2695	3030	3790
	Форма и размеры поперечного сечения	Двутавр № 16				
Навой	Вес, Н	4000	4000	4745	5250	6620
	Длина, мм	2235	2335	2770	3065	3865
	Форма и размеры поперечного сечения	Круг (эквивалентный диаметр, мм) 167				
Подвижное скало	Вес, Н	546,2	546,2	628	684,2	854
	Длина, мм	2668	2660	3073	3408	4168
	Форма и размеры поперечного сечения	Кольцо (диаметр наружный / внутренний, мм) 130/112				
Неподвижное скало	Вес, Н	654	654	766	860	1070
	Длина, мм	2500	2500	2905	3240	4000
	Форма и размеры поперечного сечения	Кольцо (диаметр наружный / внутренний, мм) 130/112				
Подскальная труба	Вес, Н	600	600	691	765	932
	Длина, мм	2805	2805	3210	3545	4305
	Форма и размеры поперечного сечения	Кольцо (диаметр наружный / внутренний, мм)* 130/112				
Вальян	Вес, Н	576	576	682	644	926
	Длина, мм	2282	2282	2687	3022	3782
	Форма и размеры поперечного сечения	Кольцо (диаметр наружный / внутренний, мм) 220/210				
Коробка ремизного движения	Вес, Н	1753,3	1753,3	1753,3	1753,3	1753,3
	Форма и размеры	В×Н×L, мм 282×282×282				
Зевобразовательный механизм	Вес, Н	790	790	912	1016	1358
Товарный валик	Вес, Н	500	500	500	500	500

Примечание: внутри кольца в центре сплошное круглое сечение диаметром 75 мм.

ткацкой машины в уточненной расчетной модели представлены эквивалентными элементами, причем вес этих элементов оставили таким, каким он есть в действительности, а параметры сечений получали пересчетом. Причем точки закрепления этих элементов оставили в тех же местах, в которых они находятся в действительности. Окончательная расчетная модель ткацкой машины представлена на рис. 1.

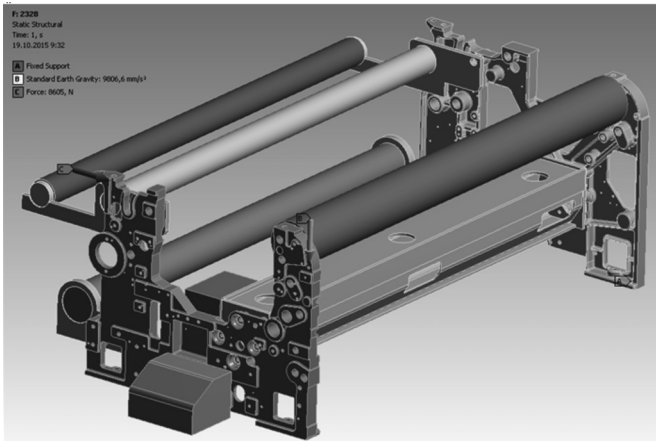


Рис. 1. Расчетная модель ткацкой машины с дополнительными конструктивными элементами

Результаты и обсуждение

На основе уточненной модели ткацкой машины типа СТБ проведен расчет частотного спектра свободных изгибно-крутильных колебаний несущих систем, а также перемещения средней части неподвижного скала станков с заправочными ширинами 180, 190, 220, 250 и 330 см средствами CAD системы *SolidWorks* и конечно-элементного CAE комплекса *ANSYS* [13–20]. Результаты расчетов приведены в виде графиков, представленных на рис. 2 (1 – для первой, 2 – для второй, 3 – для третьей собственной частоты). Для определения динамического поведения несущих систем ткацких машин типа СТБ в условиях эксплуатации на фабрике была выбрана ткань типа саржи с переплетением 3/1 (это означает, что в одном обороте три ремизки находятся вверху, а одна – внизу). Технологическая нагрузка от натяжения нитей основы представлена в виде ос-

циллограмм, изображенных на рис. 3 и 4. Так, на рис. 3 показана осциллограмма нагрузки от натяжения нитей основы, полученная при выработке ткани типа саржи 3/1 для первого оборота главного вала станка. Для второго оборота осциллограмма нагрузки от натяжения нитей основы представлена на рис. 4. На рисунках цифрой 1 указано предварительное натяжения нитей основы, а цифрой 2 показан динамический процесс натяжения нитей основы. Из анализа осциллограмм видно, что в первом обороте максимальное натяжение составило 225,8 сН, а во втором – 185 сН. Причем в первом случае максимальное натяжение соответствует полному раскрытию зева, а во втором – моменту приборя уточных нитей. Анализ осциллограмм также показывает, что на графиках присутствуют как низкочастотные, так и высокочастотные составляющие. Для проведения амплитудно-частотного анализа несущих систем технологическая нагрузка была разложена в ряд Фурье до 20-й гармоники (см. табл. 2) [2]. Значения частот, соответствующих этим гармоникам, наиболее близко подходят к частотному диапазону несущих систем. Так, при частоте вращения главного вала 221 мин^{-1} первая гармоника составляет приблизительно 3,68 Гц, а двадцатая – 73,66 Гц. Высокочастотная составляющая на осциллограмме натяжения нитей основы соответствует 25,78 Гц. Из приведенного расчета видно, что такое допущение

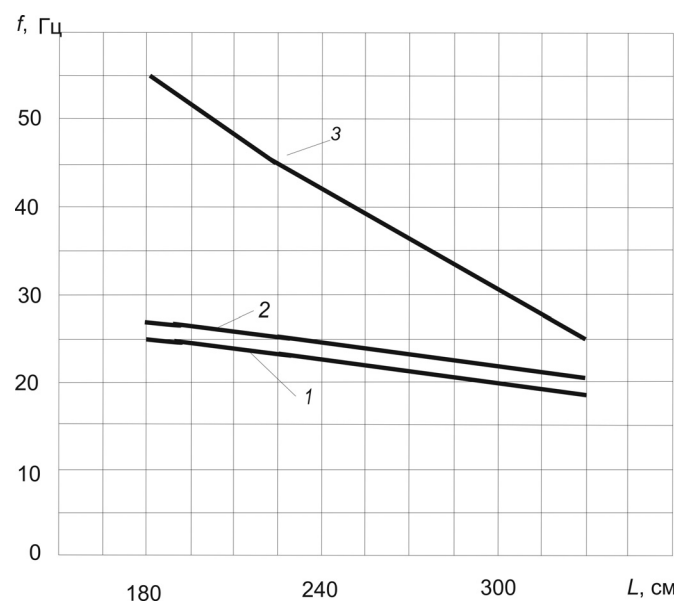


Рис. 2. Графики зависимости частот свободных изгибно-крутильных колебаний несущих систем от заправочной ширины

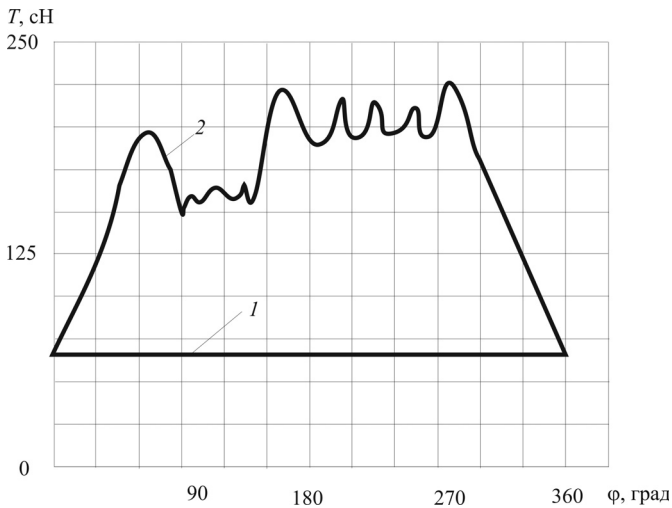


Рис. 3. Осциллограмма усилий натяжения нитей основы для первого оборота главного вала при $n = 221 \text{ мин}^{-1}$

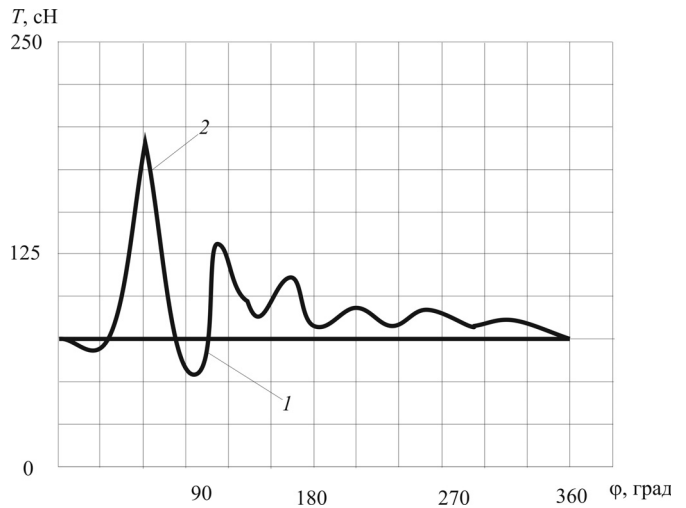


Рис. 4. Осциллограмма усилий натяжения нитей основы для второго оборота главного вала при $n = 221 \text{ мин}^{-1}$

Таблица 2

Значения гармонических составляющих усилий натяжения нитей основы, полученных в результате разложения в ряд Фурье осциллограммы натяжения нитей основы для саржи 3/1, полученной на станке СТБ-180 при частоте вращения главного вала $n = 221 \text{ мин}^{-1}$

Номер гармоники	Значение частоты вынужденных колебаний, Гц	Результаты разложения в ряд Фурье графиков зависимости натяжения нити основы	
		Полученные теоретически, сН	Полученные экспериментально, сН
1	3,68	27,07251	28,13245
2	7,36	28,12943	27,55763
3	11,04	26,57705	25,44072
4	14,72	24,54471	23,52734
5	18,40	22,04611	21,39735
6	22,08	19,20141	19,58328
7	25,76	16,20106	15,59735
8	29,44	12,92061	12,69117
9	33,12	9,719967	9,153621
10	36,80	6,635521	6,121456
11	40,48	3,704441	3,515459
12	44,16	1,361157	1,625269
13	47,84	1,325155	1,163347
14	51,52	2,957552	2,689612
15	55,20	4,242062	4,705712
16	58,88	5,077677	4,852347
17	62,56	5,465430	5,126235
18	66,24	5,435467	5,078231
19	69,92	5,037572	4,893242
20	73,60	4,336642	4,024672

вполне оправдано, так как высокочастотная составляющая натяжения нитей основы находится в интервале исследуемых частот. Порядок разложения в гармонический ряд технологического усилия предусматривает весь диапазон от самой низкой частоты до самой высокой и показывает, что диапазон их амплитуд зависит от порядка гармоники и составляет от 27,07 сН при частоте 3,68 Гц до 4,33 сН при частоте 73,60 Гц.

Согласно данным, представленным на рис. 2, первая частота собственных колебаний несущей системы составляет 24,9 Гц. Вынужденная частота колебаний, наиболее близкая к этой величине и полученная в результате разложения, 25,76 Гц с амплитудой 16,2 сН. Эта гармоническая составляющая может вызывать увеличение перемещений несущей системы, как результат близкого отношения частот, равного 1,03, к резонансу. Вторая частота свободных колебаний находится близко к значению 26,8 Гц, и ее эффект на перемещение несущей системы может быть таким же, как и в первом случае. Третья частота составляет 54,8 Гц, а усилие, полученное в результате разложения, 4,24 сН с частотой 55,2 Гц, по отношению к первой частоте амплитуда колебаний в 3,8 раза меньше. Остальные гармонические составляющие резонансов не вызывают и их действие можно рассматривать в статических условиях. Если рассматривать весь ряд станков СТБ с заправочными ширинами 180, 190, 220, 250, 330 см, то становится очевидным, что отношение частотного диапазона изменится в сторону его уменьшения в зависимости от заправочной ширины (см. рис. 2), и, как следствие, это может привести к увеличению динамического перемещения несущей системы.

Технологические усилия от натяжения нитей основы для станков различных заправочных ширины варьируются в широком диапазоне и зависят от количества нитей основы в заправке станка (табл. 3).

Посредством данных, представленных в табл. 3, были определены значения перемещений элементов в статических условиях. В качестве примера на рис. 5 изображен график изменения перемещений средней точки неподвижного скала.

На основе предложенной расчетной модели определены характеристики колебательного про-

Таблица 3

Значения количества нитей основы для ткацких станков СТБ

Ширина заправки, см	180	190	220	250	330
Количество нитей основы	3000	3200	3700	4200	5500

цесса несущих систем для гаммы станков СТБ. Как пример на рис. 6 изображена амплитудно-частотная характеристика ткацкого станка СТБ-180, которая построена для средней точки неподвижного скала при возбуждении несущей системы силой в виде синусоидального импульса.

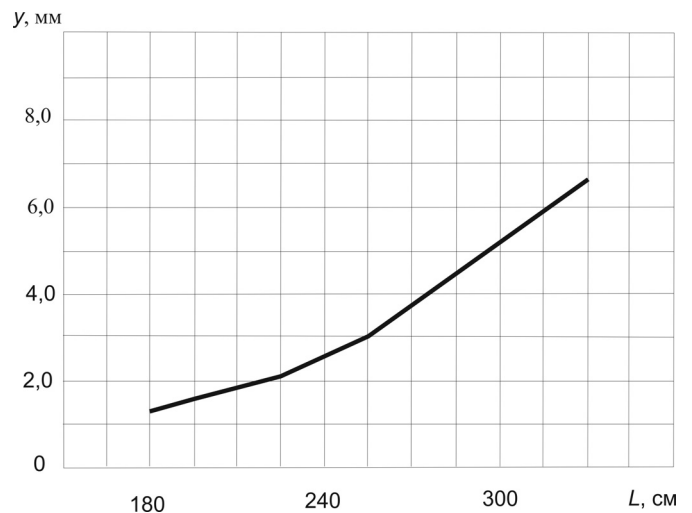


Рис. 5. График изменения перемещений средней точки неподвижного скала в статических условиях

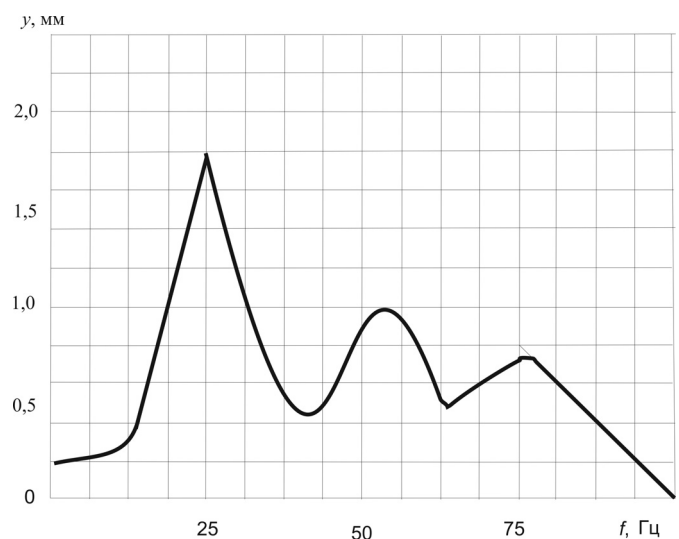


Рис. 6. График изменения перемещений средней точки неподвижного скала в динамических условиях

Как видно из графика (см. рис. 6), имеются три всплеска величины перемещений средней точки неподвижного скала, соответствующих частотам вынужденных колебаний, близких к частотному диапазону собственных частот несущей системы станка СТБ 180 (первые три собственные частоты составляют 24,9, 26,9, 54,8 Гц соответственно). Наибольшее значение перемещений наблюдается при отношении частот вынужденных и свободных колебаний, близкому к единице (при частоте вынужденных колебаний, равной 25,76 Гц, что соответствует 7-й гармонике, см. табл. 2). При более высоких значениях отношения частот перемещение неподвижного скала уменьшается, и при частотах более 80 Гц приближается к нулевому значению.

Выводы

1. Предложена уточненная расчетная модель несущих систем ткацких станков СТБ, позволяющая определять перемещения их отдельных элементов как в статических, так и динамических условиях.

2. На основе уточненной динамической модели определены частотные характеристики изгибно-крутильных колебаний для гаммы станков СТБ. Первая частота меняется в диапазоне от 24,9 Гц (при заправочной ширине 180 см) до 17,7 Гц (330 см); вторая частота – в диапазоне 26,7...20,8 Гц; третья частота – в диапазоне 54,8...25,2 Гц.

3. Определены перемещения элементов несущих систем для гаммы ткацких станков СТБ. Максимальные значения перемещений, соответствующие средней точке неподвижного скала, при выработке ткани типа «саржа» изменяются в пределах от 1,304 мм (СТБ-180) до 6,656 мм (СТБ-330).

4. Ткань типа «саржа» рекомендуется выработывать на станках с заправочными ширинами 180 и 190 см. Станки с заправочными ширинами 220 см не предназначены для выработки такого типа тканей. Они требуют дополнительной конструктивной доработки несущих систем.

5. На стадии проектирования технологического оборудования предлагается использовать форму и характер технологической нагрузки в виде синусоидального импульса с периодом действия, равным времени оборота главного

вала станка, и амплитудой, равной статической составляющей действующей силы для определенного ассортимента тканей.

6. Проектировать конструкции несущих систем в соответствии с отношением частот вынужденных и свободных колебаний, равным трем и более, используя частотный спектр вынужденных колебаний, полученный в результате разложения технологической нагрузки в ряд Фурье.

Список литературы

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

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

3. Атапин В.Г. Многоуровневое проектирование корпусных конструкций многоцелевых станков // Вестник машиностроения. – 1999. – № 1. – С. 9–12.

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

5. Атапин В.Г. Оптимизация несущей системы стола тяжелого многоцелевого станка // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 4 (33). – С. 30–32.

6. Атапин В.Г. Метод декомпозиции в проектировании многоцелевых станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 1 (62). – С. 61–68.

7. Кирилин Ю.В., Еремин Н.В. Исследование несущей системы станка методом конечных элементов // СТИН. – 2002. – № 8. – С. 19–21.

8. Кирилин Ю.В., Дышловченко П.Е., Еремин Н.В. Моделирование подвижного и неподвижного стыка металлорежущего станка // СТИН. – 2003. – № 9. – С. 22–28.

9. Кирилин Ю.В. Совершенствование несущих систем фрезерных станков на основе их моделирования и расчета динамических характеристик: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01. – Ульяновск, 2006. – 345 с.

10. Проектирование автоматизированных станков и комплексов. В 2 т. Т. 1 / под ред. П.М. Чернянского. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 336 с. – ISBN 978-5-7038-3810-5.

11. Чернянский П.М. Основы проектирования точных станков. Теория и расчет: учебное пособие. – М.: КноРус, 2010. – 239 с. – ISBN 978-5-406-00381-7.
12. Моделирование несущих систем технологических машин / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 2 (63). – С. 91–99.
13. Wang X.R., Jin J.Q., Li Y.Z. The harmonic response analysis of workover rig platform base on ANSYS Workbench // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 945–949. – P. 766–769. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.766.
14. Lee H.H. Finite element simulations with ANSYS Workbench 15. – [S. l.]: SDC Publ., 2014. – 600 p. – ISBN-10 1585039071. – ISBN-13 978-1585039074.
15. Chen X., Liu Y. Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench. – 1st ed. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 411 p. – ISBN-10 1439873844. – ISBN-13 978-1439873847.
16. 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.
17. Skeebea V., Ivancivsky V., Pushnin V. Numerical modeling of steel surface hardening in the process of high energy heating by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 288–293. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.288.
18. Zhang X., Chen Y., Yao W. Relationship between bridge natural frequencies and foundation scour depth based on IITD method // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 6, iss. 1 – P. 102–106.
19. 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.
20. Cheng L.L. The finite element and experimental analysis of the natural frequency of the cantilever sheet and model verification based on levy method // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 344. – P. 132–135. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.344.132.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(69), October – December 2015, Pages 51–60

Selection of form factors of machine carrying systems in reliance on the process duty

Podgornyj Yu. I.^{1,2}, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: pjui@mail.ru
Skeebea V. Yu.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skeebea_vadim@mail.ru
Kirillov A. V.^{1,3}, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kirillovalvs@mail.ru
Maksimchuk O. V.², Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ovmak@mail.ru
Lobanov D. V.⁴, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mf_nauka@brstu.ru
Gleim V. R.¹, Master's Degree student, e-mail: v_gleim@mail.ru
Zhigulev A. K.¹, Student, e-mail: alexey-zhigulev@mail.ru
Sakha O. V.¹, Student, e-mail: olga-v205@rambler.ru

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

²Novosibirsk Technological Institute (branch) Moscow State University of Design and Technology, 35 Krasny prospect (5 Potaninskaya st.), Novosibirsk, 630099, Russian Federation

³Novosibirsk State Pedagogical University, 28 Viluiskaya st., Novosibirsk, 630126, Russian Federation

⁴Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

Abstract

Problems of dynamic behavior in load-carrying systems of technological machines under operational conditions are discussed. The goal of this study was to develop recommendations for selection of the fabric assortment for these machines (using an STB loom as an example). This study is urgent due to the lack of recommendations for selection of technological equipment and unified methods for account of the dynamic character of a technological force. The precision of the computational model for carrying systems, suggested by the authors earlier, is improved in this study by introducing additional elements required for operation of looms during production of the determined fabric assortment. The frequency spectrum of intrinsic vibrations of load-carrying systems for a series of STB looms with

widths 180, 190, 220, 250 and 330 cm were determined more precisely using SolidWorks CAD system and finite-element CAE complex ANSYS. The first frequency varies in the range from 24.9 Hz (STB-180 loom) to 17.7 Hz (STB-330 loom), second frequency varies from 26.7 Hz to 20.8 Hz, and the third one varies from 54.8 Hz to 25.2 Hz. It is demonstrated that the technological loading from tension of warp fibers can be presented as loading from static force from preliminary tension of the mobile ram spring and dynamic component depending on operation of the machine mechanisms. It is also demonstrated that load-carrying systems of looms under certain operational conditions can approach resonance conditions. Movements of individual elements in load-carrying systems caused by technological loading presented by a Fourier series are determined. The obtained results make it possible to develop specific recommendations for discrimination of assortment ranges of STB looms in accordance with the requirements to hygiene and sanitary conditions during work on this equipment. During design of technological equipment, it is suggested to use technological loading in the form of a sinusoidal pulse with the period equal to turnaround time of the loom main shaft and amplitude equal to the static component of the acting force for chosen fabric assortment. Using the frequency spectrum of forced vibrations obtained by expansion of the technological loading in a Fourier series, it is suggested to develop constructions of load-carrying systems from the ratio between frequencies of forced and free vibrations equal to three or higher.

Keywords:

load-carrying system, technological machine, finite-element method, the frequency spectrum of intrinsic vibrations, the technological loading, series of STB looms, forced vibrations, resonance.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-51-60

References

1. Podgornyj Yu.I. *Metody issledovaniya zapravok, ikh sintez i razrabotka kriteriev optimal'nosti uslovii ekspluatatsii tkatskikh stankov pri formirovanii plotnykh tkanei. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Research methods refills, their synthesis and development of criteria of optimality conditions looms in the formation of dense tissue. Dr. eng. sci. diss.]. Kostroma, 1990. 541 p.
2. Podgornyj Yu. I., Afanas'ev Yu.A., Kirillov A.V. *Issledovanie i vybor parametrov pri sinteze i ekspluatatsii mekhanizmov tekhnologicheskikh mashin* [Research and selection of parameters in the synthesis and operation mechanisms of technological machines]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2002. 196 p.
3. Atapin V.G. *Mnogourovnevoe proektirovanie korpusnykh konstruksii mnogotselevykh stankov* [Multi-level design of hull structures of multipurpose machine tools]. *Vestnik mashinostroeniya – Russian Engineering Research*, 1999, no. 1, pp. 9–12. (In Russian)
4. Atapin V.G. *Proektirovanie nesushchikh konstruksii tyazhelykh mnogotselevykh stankov s uchetom tochnosti, proizvoditel'nosti, massy* [Structural design of heavy multipurpose machine tools, taking into account the accuracy, performance, weight]. *Vestnik mashinostroeniya – Russian Engineering Research*, 2001, no. 2, pp. 3–6. (In Russian)
5. Atapin V.G. *Optimizatsiya nesushchei sistemy stola tyazhelogo mnogotselevogo stanka* [Optimization of the support system of heavy multipurpose machine tool]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2006, no. 4 (33), pp. 30–32.
6. Atapin V.G. *Metod dekompozitsii v proektirovanii mnogotselevykh stankov* [Decomposition method in design of multifunctional machines]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 1 (62), pp. 61–68.
7. Kirilin Yu.V., Eremin N.V. *Issledovanie nesushchei sistemy stanka metodom konechnykh elementov* [Study of the support system of the machine tool using finite element method]. *STIN – Russian Engineering Research*, 2002, no. 8, pp. 19–21. (In Russian)
8. Kirilin Yu.V., Dyshlovenko P.E., Eremin N.V. *Modelirovanie podvizhnogo i nepodvizhnogo styka metallovezhushchego stanka* [Simulation of swing and fixed joint of machine tool]. *STIN – Russian Engineering Research*, 2003, no. 9, pp. 22–28. (In Russian)
9. Kirilin Yu.V. *Sovershenstvovanie nesushchikh sistem frezernykh stankov na osnove ikh modelirovaniya i rascheta dinamicheskikh kharakteristik. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Improvement of bearing systems of milling machines based on their modeling and calculation of dynamic characteristics. Dr. eng. sci. diss.]. Ul'yanovsk, 2006. 345 p.
10. Chernyanskii P.M., ed. *Proektirovanie avtomatizirovannykh stankov i kompleksov. V 2 t. T. 1* [Design of automated machine tools and complex machines. In 2 vol. Vol. 1]. 2nd ed. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 336 p. ISBN 978-5-7038-3810-5

11. Chernyanskii P.M. *Osnovy proektirovaniya tochnykh stankov. Teoriya i raschet* [Basics of designing precision machine tools. Theory and calculation]. Moscow, KnoRus Publ., 2010. 239 p. ISBN 978-5-406-00381-7
12. Podgorniy Yu.I., Skeebe V.Yu., Kirillov A.V., Pushnin V.N., Erokhin I.A., Kornev D.Yu. Modelirovanie nesushchikh sistem tekhnologicheskikh mashin [Modeling of the technological machines support systems]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 2 (63), pp. 91–99.
13. Wang X.R., Jin J.Q., Li Y.Z. The harmonic response analysis of workover rig platform base on ANSYS Workbench. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 945–949, pp. 766–769. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.766
14. Lee H.H. *Finite element simulations with ANSYS Workbench* 15. SDC Publ., 2014. 600 p. ISBN-10 1585039071. ISBN-13 978-1585039074
15. Chen X., Liu Y. Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench. 1st ed. Boca Raton, CRC Press, 2014. 411 p. ISBN-10 1439873844. ISBN-13 978-1439873847
16. 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
17. Skeebe V., Ivancivsky V., Pushnin V. Numerical modeling of steel surface hardening in the process of high energy heating by high frequency currents. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 288–293. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.288
18. Zhang X., Chen Y., Yao W. Relationship between bridge natural frequencies and foundation scour depth based on IITD method. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2013, vol. 6, iss. 1, pp. 102–106.
19. Skeebe V.Yu. ed. *Actual Problems and Decisions in Machine Building*. Pfaffikon, Trans Tech Publ., 2015. 344 p. ISBN 978-3-03835-551-9
20. Cheng L.L. The finite element and experimental analysis of the natural frequency of the cantilever sheet and model verification based on levy method. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 344, pp. 132–135. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.344.132

Article history:

Received 25 September 2015

Revised 23 October 2015

Accepted 15 November 2015

СВАРКА РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ВСТАВОК, СОДЕРЖАЩИХ МЕДЬ И ТАНТАЛ*

*Ю.Н. МАЛЮТИНА¹, аспирант
Н.В. СТЕПАНОВА¹, мл. науч. сотруд.
А.Г. ЧЕРКОВ², инженер-технолог
Л.В. ЧУЧКОВА¹, студент
(¹НГТУ, г. Новосибирск,
²ИФП СО РАН, г. Новосибирск)*

Поступила 16 июля 2015

Рецензирование 17 августа 2015

Принята к печати 20 октября 2015

Малютина Ю.Н. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: iuliamaliutina@gmail.com

Проведены исследования сварных швов, а также прочностных характеристик композитов, формируемых путем сварки взрывом пластин из титанового сплава BT20 и нержавеющей стали 09X18H10T с применением промежуточных слоев. Функцию промежуточных слоев выполняли пластины из тантала либо пара пластин «бронза – тантал». Методами микроструктурного анализа установлено, что в зоне соединений пластин образуются твердые растворы на основе меди и железа, а также титана и тантала. На границе сварки пластин из бронзы и тантала зафиксирована структура, представляющая собой механическую смесь меди и нанодисперсных включений β-тантала. В качестве критерия механических свойств композиционных материалов использовали уровень прочности соединения слоев. Максимальный предел прочности 420 МПа характерен для композиционных материалов с промежуточными слоями из бронзы и тантала.

Ключевые слова: сварка взрывом, промежуточный слой, структура швов, прочность соединения слоев.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-61-71

Введение

Титан и сплавы на его основе привлекают повышенное внимание специалистов, поскольку обладают такими важными свойствами, как высокая удельная прочность, вязкость при комнатной температуре, сопротивление коррозии, ползучесть [1, 2]. В связи с увеличением объема применения титана и его сплавов в космической, ядерной и химической промышленности все более актуальной становится проблема получения высокопрочных надежных соединений этих материалов с другими металлическими сплавами, в том числе с широко используемой в современном

производстве нержавеющей сталью. Разработанные к настоящему времени методы формирования соединений между титановыми сплавами и коррозионно-стойкими сталями, включающие в себя сварку (давлением или плавлением), пайку и прокатку, не во всех случаях удовлетворяют повышенным требованиям, предъявляемым к изделиям ответственного назначения [3, 4]. В большинстве случаев явные различия в свойствах разнородных металлических материалов приводят к химической, механической и структурной неоднородности получаемых на практике соединений [5, 6]. При непосредственном контакте заготовок из титана и нержавеющей

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00230).

стали в зонах соединения образуются различные типы интерметаллидов, негативно отражающиеся на комплексе механических свойств сварных конструкций.

Одно из эффективных решений отмеченной проблемы заключается в развитии направления, основанного на так называемом «непрямом соединении» разнородных металлов, когда между заготовками из основных (разнородных) материалов композиции фиксируются промежуточные или барьерные слои. Такой подход позволяет предотвратить нежелательную диффузию элементов взаимодействующих металлов, склонных к образованию интерметаллидов, а также получить бездефектные соединения с повышенными прочностными показателями. В качестве материалов барьерных слоев для сварки титановых сплавов и сталей нержавеющей класса чаще всего используют чистые металлы, такие как никель, серебро, медь, магний [7–10], или сплавы на их основе [11, 12]. Из этой группы особо можно выделить медь и сплавы на ее основе. Медь не образует хрупких химических соединений с элементами, входящими в состав нержавеющей стали (Fe, Cr, Ni, C). Она создает условия для релаксации напряжений, возникающих между свариваемыми материалами, которые, в свою очередь, обусловлены различием коэффициентов термического линейного расширения.

В технической литературе описаны различные схемы сварки разнородных материалов с применением промежуточных вставок. Во многих случаях эксперименты выполнены на образцах, полученных в процессе лазерной сварки заготовок. Экспериментально установлено, что предел прочности образцов, полученных при лазерной сварке титановых сплавов со сталью аустенитного класса через прослойку меди, превышает 340 МПа [13]. Процесс формирования сварного шва сопровождается интенсивным растворением стали в ванне расплавленной меди. При последующем охлаждении в пределах медной матрицы наблюдали пластинчатые включения α -фазы мартенсита [14]. Со стороны титанового сплава, в свою очередь, образуется промежуточный слой толщиной 100...150 мкм, характеризующийся повышенной твердостью (4500 МПа). Его присутствие способствует хрупкому разрушению сварного шва. Полностью исключить образование в зоне сварного соединения хрупких

интерметаллидов, отрицательно влияющих на комплекс механических характеристик композиции, невозможно. В некоторых случаях с целью повышения качества сварных швов и соответствующего улучшения комплекса механических свойств получаемых материалов предлагается использовать промежуточные вставки, состоящие из материалов двух типов [15–17]. Применение при сварке технически чистого титана ВТ1-0 и хромоникелевой стали 12Х18Н10Т композитной вставки «тантал – медь», полученной по технологии сварки взрывом, обеспечило предел прочности сварного соединения на уровне 420 МПа [17]. Это значение существенно выше по сравнению с подобными сварными швами, сформированными с использованием только медного промежуточного слоя.

В настоящей работе изучена возможность использования промежуточных слоев с целью формирования бездефектных сварных соединений при динамическом соударении пластин из титанового сплава ВТ20 и коррозионно-стойкой стали 09Х18Н10Т. Одно из анализируемых в работе технических решений было основано на использовании в качестве прослойки пластин тантала. Второе решение предусматривало сварку заготовок из титанового сплава и хромоникелевой стали с использованием одновременно двух промежуточных слоев – бронзы и тантала.

Материалы и методы исследования

В качестве основных материалов исследования в работе использовали пластины титанового деформируемого сплава марки ВТ20 и хромоникелевой аустенитной стали 09Х18Н10Т толщиной 1 и 3 мм соответственно. Пластины из бериллиевой бронзы БрБ2 и тантала ТВЧ технической чистоты толщиной 200 и 100 мкм соответственно использовали для получения промежуточного слоя между стальными и титановыми заготовками. Химический состав указанных материалов представлен в табл. 1. С целью удаления оксидных пленок поверхности всех пластин перед сваркой подвергали механической зачистке.

Сварку взрывом тонколистовых заготовок и получение слоистых композитов осуществляли в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН по схеме с параллельным расположением пластин. Процесс формирования соединений

Химический состав основных материалов (вес. %)

Материал	C	Fe	Ti	Mn	Si	Cr	Ni	Al	V	Zr	Mo	Ta	O	Cu	Be
BT20	–	–	88,69	–	–	–	–	6,58	1,41	2,27	1,05	–	–	–	–
09X18H10T	0,09	70,54	0,45	0,91	0,5	18,42	9,09	–	–	–	–	–	–	–	–
БрБ2	–	–	–	–	–	–	0,27	–	–	–	–	–	–	98,16	1,56
ТВЧ	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	98,65	1,35	–	–

из анализируемых материалов осуществлялся за один этап. Пластины из нержавеющей стали при сварке являлись неподвижными, а пластины из титанового сплава – метаемыми. Пластины из бериллиевой бронзы взаимодействовали с легированной сталью, а пластины тантала – с титановым сплавом BT20. Расположенные таким образом материалы позволяют исключить химическое взаимодействие стальных и титановых пластин. Схематически процесс получения четырехслойного композиционного материала представлен на рис. 1. Расстояние между пластинами составляло 1 мм. Функцию взрывчатого вещества выполнял аммонит 6ЖВ, распределенный слоем толщиной 10 мм непосредственно на пластине из хромоникелевой стали.

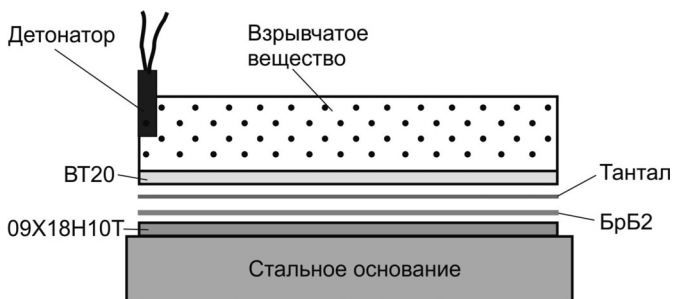


Рис. 1. Схема сварки взрывом четырехслойного композита

Структурные исследования выполнялись на поперечных образцах, вырезанных в направлении, совпадающем с направлением продвижения точки контакта во время динамического взаимодействия металлических заготовок. Полированные поверхности шлифов исследовали методами оптической металлографии на микроскопе Axio Observer Z1m. Для получения подробной информации о структуре сварных швов на различных масштабных уровнях шлифы изучали на растровом электронном микроскопе EVO 50 XVP в режиме обратно отраженных электронов. Наиболее глубокие исследования структуры, сфор-

мированной в зоне соударения пластин, были проведены с использованием методов просвечивающей электронной микроскопии (микроскоп Теснаи G2). Для проведения элементного анализа материалов на границах раздела заготовок использовали энергодисперсионный микроанализатор INCA X-ACT. Кроме того, метод растровой электронной микроскопии был использован при изучении поверхностей разрушения образцов после проведения прочностных испытаний.

Прочностные испытания четырехслойных композитов проводились на универсальной машине Instron 3369 в условиях одноосного растяжения. Скорость перемещения подвижной траверсы составляла 5 мм/с. Для проведения испытаний слоистые пакеты, полученные по технологии сварки взрывом, разрезали на заготовки сечением 50x5 мм. Методом лазерной сварки к ним приваривали дополнительные пластины, выполнявшие при растяжении функции захватов (рис. 2).

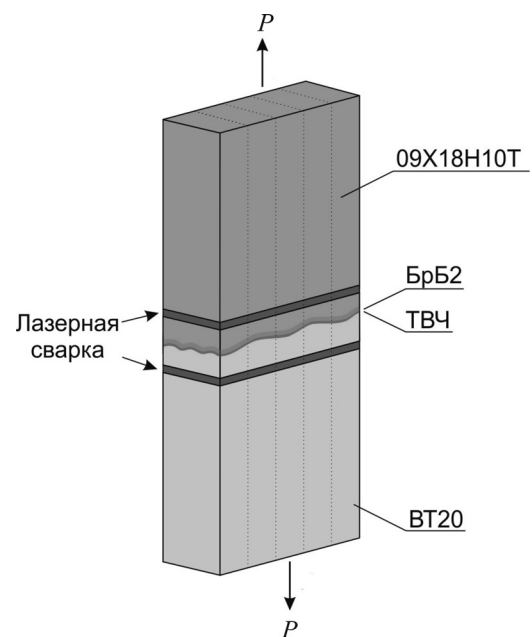


Рис. 2. Форма образцов при поперечном расположении слоев относительно приложенной нагрузки (P)

Оптимизация режимов лазерной сварки позволила избежать растрескивания стыка тантал – бронза. Из полученных заготовок вырезали образцы на растяжение. Нагрузка в процессе испытаний прикладывалась перпендикулярно плоскости сварных швов. С использованием этой схемы испытаний на растяжение в работе была определена прочность соединения слоев в композиции, полученной при сварке взрывом разнородных материалов. Для сравнения использовали экспериментальные данные, полученные при испытании аналогичных образцов, сваренных через промежуточную вставку из тантала.

Результаты и обсуждение

Общий вид композиционного материала «титан – нержавеющая сталь» с прослойкой из бронзы и тантала, сформированного по технологии сварки взрывом, представлен на рис. 3. В сваренном взрывом слоистом пакете отсутствуют микродефекты в виде трещин, пор и непроваров, что свидетельствует о прочном металлургическом соединении металлических заготовок. Методом оптической металлографии зафиксирован разный профиль возникших границ раздела, что обусловлено различием физических свойств, в том числе значений плотности свариваемых материалов. Ниже представлены результаты структурного анализа сварных швов полученного композита, выполненного с использованием методов растровой и просвечивающей электронной микроскопии.

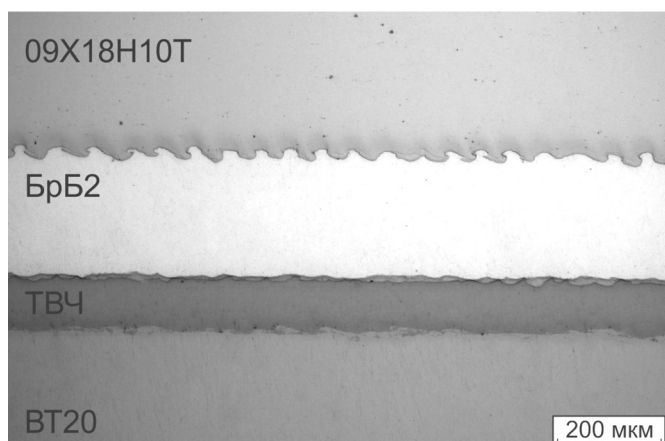


Рис. 3. Общий вид четырехслойного композиционного материала 09X18H10Т-БрБ2-ТВЧ-ВТ20

Сварной шов

«бронза–нержавеющая сталь»

Особенности сопряжения слоев из нержавеющей стали и бронзы отражены на рис. 4, а. Сварной шов имеет характерную для сварки взрывом волнообразную форму. Средние значения длины и периода волны составляют 11,0 и 6,8 мкм соответственно. Явно выраженных следов пластической деформации бронзы в виде вытянутых зерен, непосредственно примыкающих к границе сопряжения, не обнаружено. На границе раздела материалов наблюдаются области переплава, что свидетельствует об интенсивном нагреве поверхностных слоев заготовок при их динамическом взаимодействии. Результаты исследований, проведенных с использованием методов растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа, свидетельствуют о том, что зоны переплава представляют собой мелкодисперсную смесь, состоящую преимущественно из меди (~78 вес.%) и железа (рис. 4, б). Это означает, что при соударении разнородных пластин деформация реализуется главным образом за счет вовлечения в процесс более легкого и пластичного материала [18, 19]. В зонах переплава также была зафиксирована малая концентрация хрома и никеля. Незначительное содержание этих элементов обусловлено кратковременностью процесса сварки взрывом. Эффективного перемешивания всех элементов нержавеющей стали и бронзы не происходит.

Результаты анализа тонкой структуры зоны переплава между бронзой и нержавеющей сталью, выполненного методами просвечивающей электронной микроскопии, представлены на рис. 4 в, г. Область перемешивания разнородных материалов характеризуется мелкокристаллической структурой, размер зеренно-субзеренных построений в которой составляет ~ 50 нм. В пределах некоторых зерен зафиксированы двойники деформационного происхождения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что двойникование является доминирующим механизмом деформации при реализации процесса сварки взрывом. Анализ дифракционных картин показал, что в результате динамического нагружения соударяемых пластин и их последующего высокоскоростного охлаждения в зоне сварного шва произошло образование твердого раствора на основе меди и железа состава $Cu_{51}Fe_{49}$. Эта

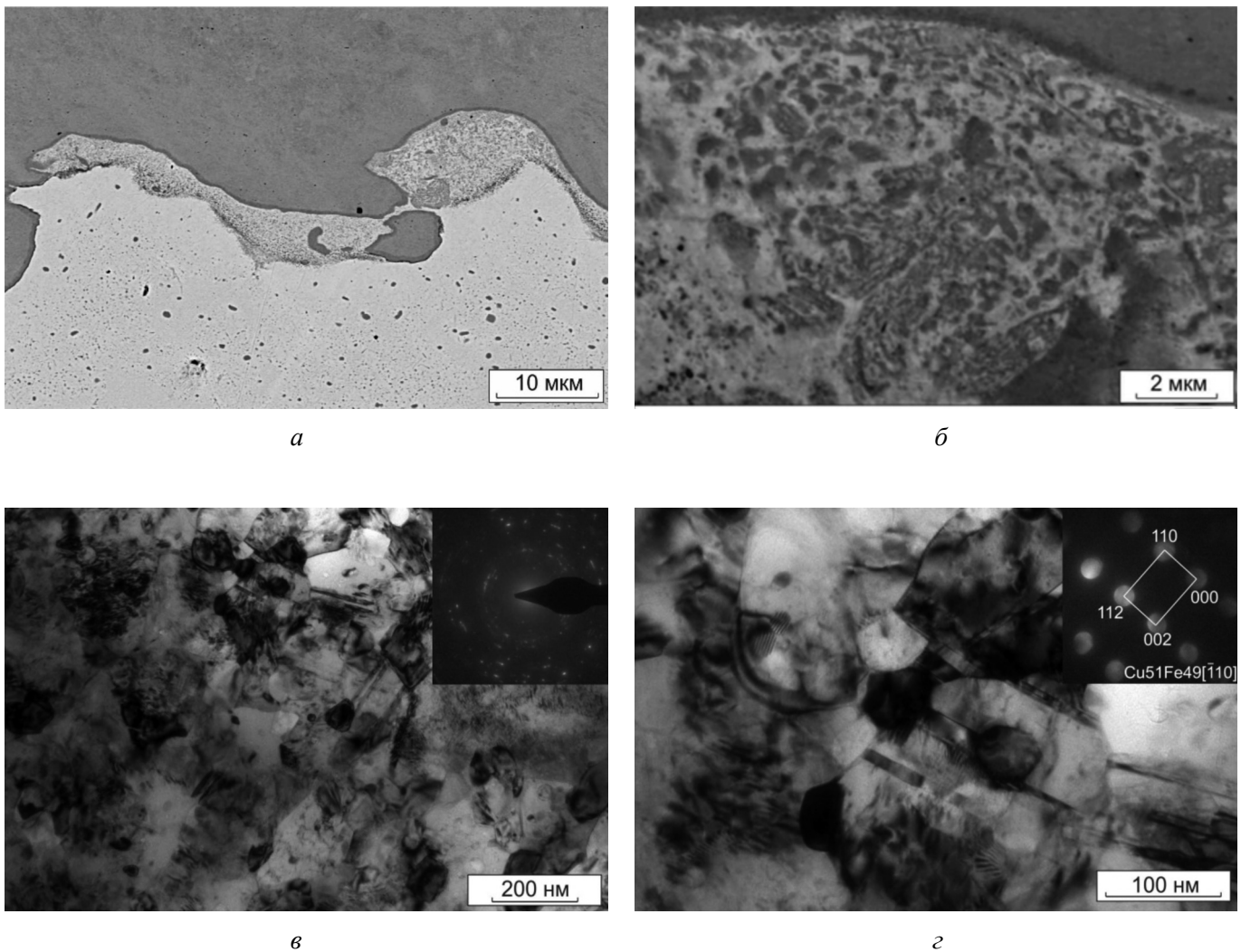


Рис. 4. Общий вид зоны сопряжения пластин из нержавеющей стали и бронзы (а) и тонкое строение зоны переплава (б–з), сформированной в процессе сварки взрывом

фаза является метастабильной и ее образование возможно только при реализации неравновесных условий.

Сварной шов «бронза – тантал»

Особенности структуры, возникшей на границе раздела «бронза – тантал», представлены на рис. 5. Граница сварного соединения имеет преимущественно безволновой характер. На поверхности сопряжения разнородных пластин возник промежуточный слой толщиной 5 мкм (рис. 5, а). Содержание меди и тантала в этом слое составляет 65 и 35 вес. % соответственно.

Тонкое строение зоны сварки бронзы и тантала было изучено методом просвечивающей электронной микроскопии (см. рис. 5). В процессе высокоскоростной деформации в пластине тантала была сформирована вытянутая субмикроструктурная структура с длиной субзерен

~1 мкм и шириной ~300...500 нм. Ориентация субзерен соответствует направлению движения фронта ударной волны в процессе сварки материалов взрывом. В структуре бронзы наблюдаются высокоплотные скопления дислокаций, свидетельствующие о пребывании материала в напряженно-деформированном состоянии.

Внутри областей перемешивания бронзы и тантала содержатся темные, хаотично распределенные в матрице частицы размером 5...60 нм формой, близкой к глобулярной (рис. 5, з). Наблюдаемые выделения представляют собой частицы тугоплавкого тантала, а матричным материалом является медь. Анализ микродифракционных картин, зафиксированных при анализе зон взаимодействия металлических заготовок, показал, что тантал в процессе интенсивной деформации из стабильной ОЦК-фазы переходит в метастабильную ГЦК-фазу, которая в литерату-

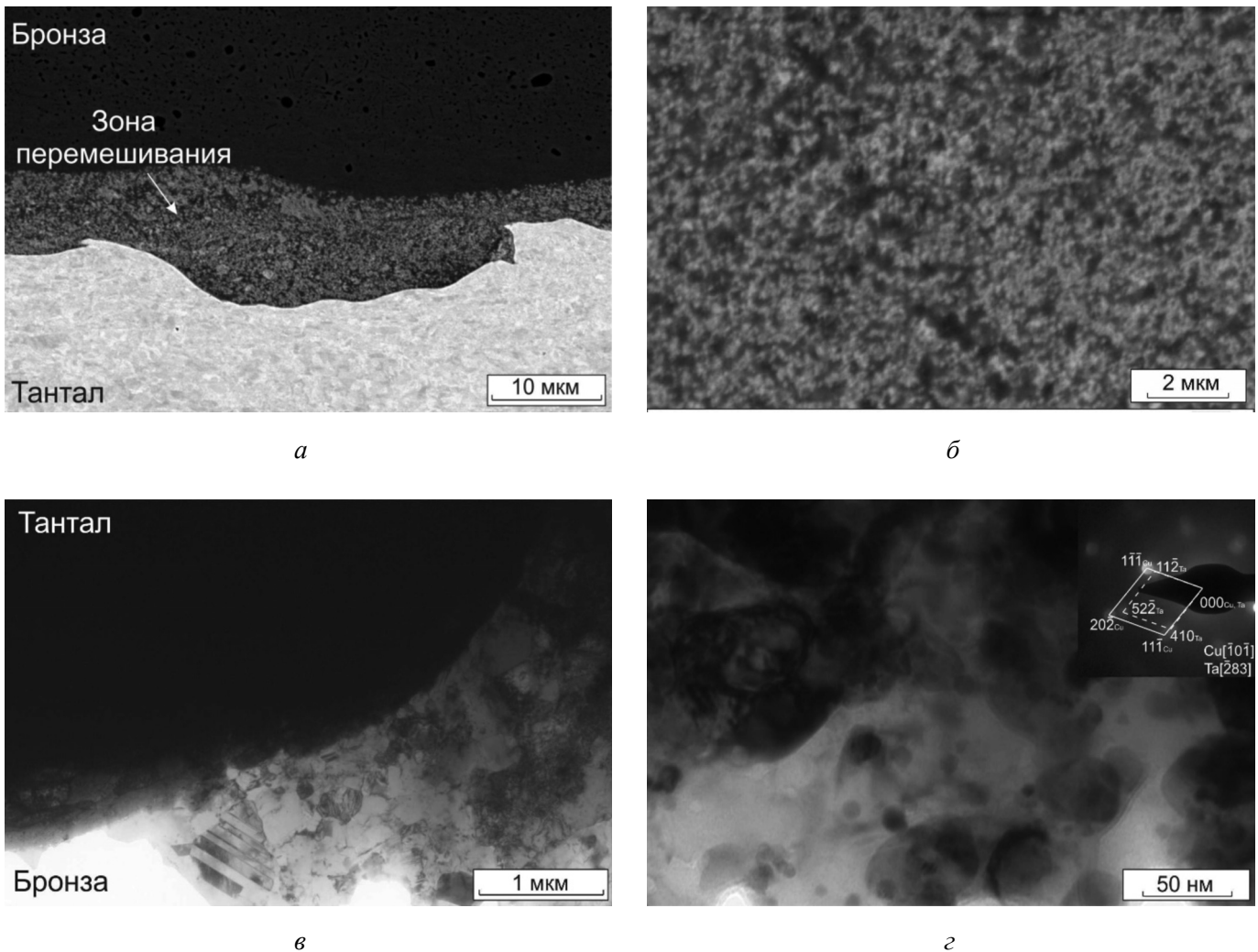


Рис. 5. Граница сварного соединения между бронзой и танталом (а) и тонкое строение области механического перемешивания (б–г)

ре описывается как β -тантал [20]. Таким образом, зона перемешивания материалов имеет структуру в виде смеси частиц β -Та и медной основы.

Сварной шов «тантал – титан»

В зонах соединения пластин тантала и титана в процессе сварки сформировался промежуточный слой толщиной от 2 до 5 мкм (рис. 6). Его структура представляет собой твердый раствор титана и тантала. Концентрация этих элементов в зоне перемешивания составляла 52 и 44 вес. % соответственно. Методом энергодисперсионного анализа зафиксировано также присутствие алюминия и ванадия, входящих в состав титанового сплава.

Механические свойства сварных соединений

Результаты испытаний материалов на растяжение представлены в табл. 2. Анализ экспери-

ментальных данных показал, что в композите, полученном при использовании тантало-бронзовой прослойки, предел прочности на отрыв составляет 420 МПа. Прочность композиционного материала, сваренного через тонколистовую пластину тантала, на 22 % меньше. При этом предел текучести обоих материалов практически одинаков – 250 МПа. Фрактографические исследования показали, что разрушение образцов с однослойной промежуточной вставкой (из тантала) происходило по сварному соединению. Об этом свидетельствует характерный волновой рельеф, возникающий в зоне сварки материалов взрывом (рис. 7, а, б). Вблизи гребней волн присутствуют участки размером до 20 мкм, соответствующие расплавленным зонам на границе между танталом и нержавеющей сталью. Из диаграммы состояния «железо – тантал» следует [21], что эта пара материалов склонна к образованию интерметаллидов типа Fe_2Ta или $FeTa$,

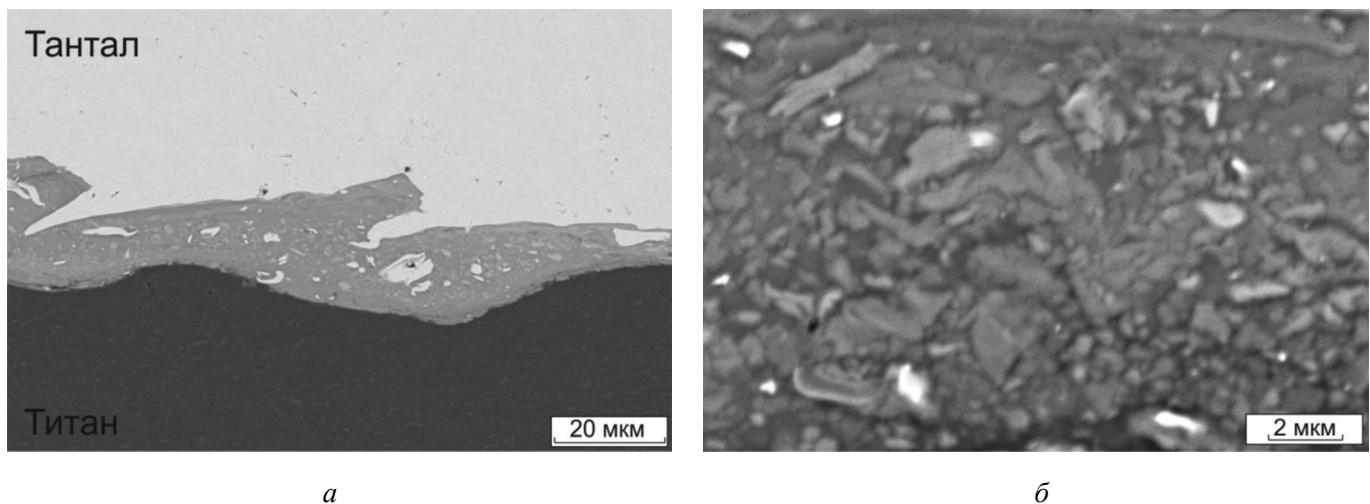


Рис. 6. Строение материала в зоне сопряжения пластин тантала (а) и титанового сплава (б)

Таблица 2

Результаты прочностных испытаний композиционных материалов с одно- и двухслойной промежуточной вставкой

Исследуемые материалы	Предел прочности, σ_B , МПа	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа
09Х18Н10Т-БрБ2-ТВЧ-ВТ20	420	250
09Х18Н10Т-ТВЧ-ВТ20	330	250

охрупчивающих и ослабляющих сварные соединения. Можно предположить, что в процессе сварки взрывом в тонких поверхностных слоях пластин из нержавеющей стали и тантала были сформированы зоны расплава, при охлаждении которых возникли малопластичные химические соединения на основе тантала и железа. Образование зон расплава подтверждается результатами фрактографических исследований образцов после проведения прочностных испытаний. Состав этих участков соответствует танталу (21 ат. %), железу (37 ат. %), а также титану, никелю и хрому, входящим в состав нержавеющей стали.

Фрактографические исследования композиционных материалов с двухслойной промежуточной вставкой (бронза – тантал) показали, что разрушение происходило не по границе сварного соединения, а по пластине бронзы. Об этом, в частности, свидетельствует характерный чашечный излом поверхности разрушения (рис. 7, в, г). Малоразвитый рельеф чашечного излома является признаком высоких прочностных свойств и ограниченной пластичности бронзы.

Проведенные механические испытания позволяют сделать вывод о том, что с позиции увеличения прочности соединения разнородных пластин из хромоникелевой стали и титанового сплава ВТ20 рационально введение между ними двухслойных промежуточных вставок «бронза – тантал».

Выводы

Использование при сварке взрывом заготовок из хромоникелевой аустенитной стали 09Х18Н10Т и титанового сплава ВТ20 дополнительных промежуточных слоев из тонколистовых пластин бронзы и тантала позволяет сформировать качественное соединение сплавов, относящихся к группе трудно свариваемых. Характер взаимодействия металлических материалов способствует формированию при сварке зон расплава, при охлаждении которых образуются твердые растворы на основе компонентов взаимодействующих материалов (бронза – нержавеющая сталь, тантал – титан) и смесь из механически несмешиваемых материалов (бронза – тантал).

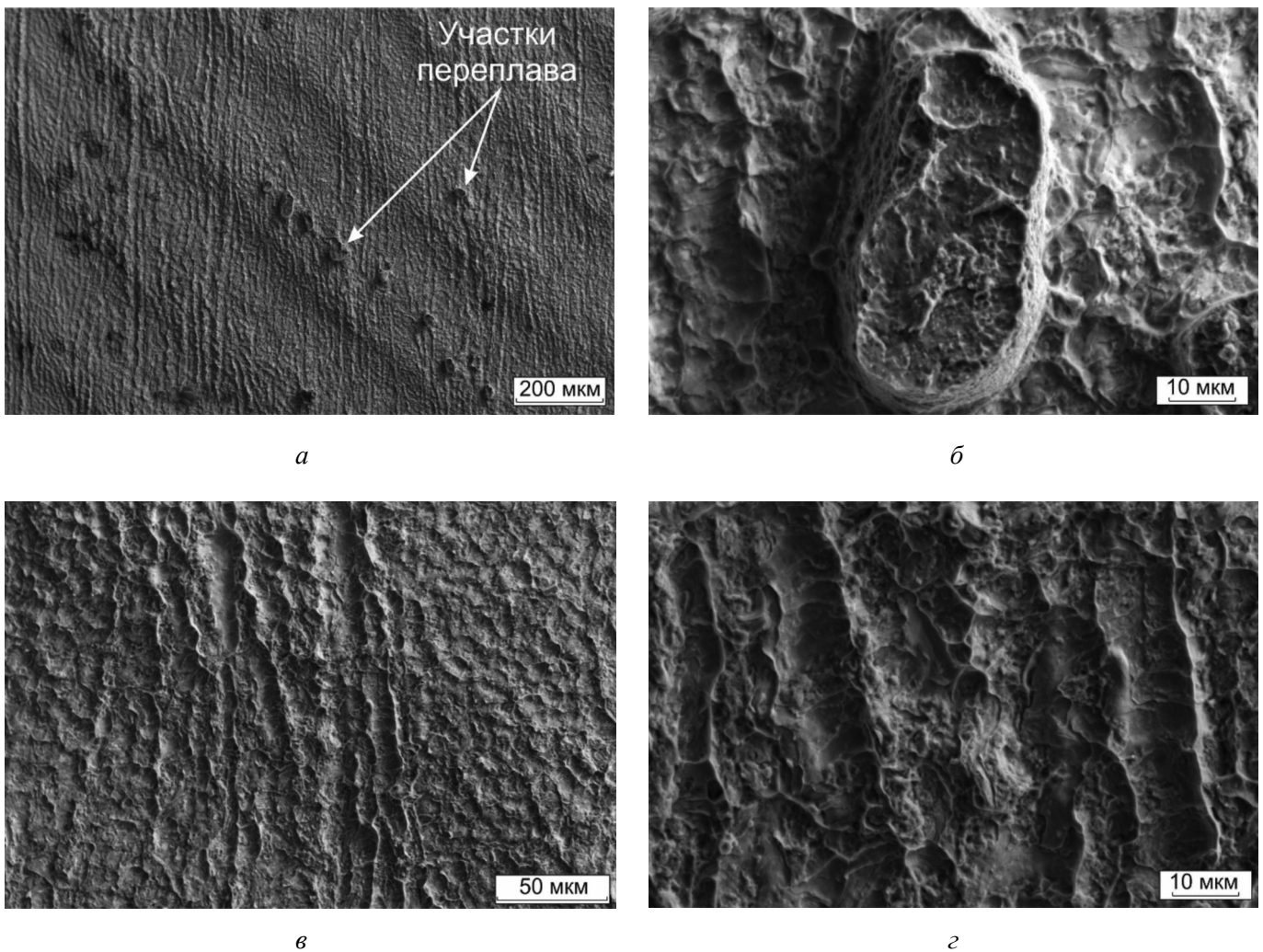


Рис. 7. Поверхности разрушения композиционных материалов с промежуточной однослойной вставкой из тантала (а, б) и двухслойной вставкой «бронза – тантал» (в, г)

Формирование сваркой взрывом барьерных слоев «бронза – тантал» в композиционном материале «титановый сплав – нержавеющая сталь» является эффективным решением, позволяющим предотвращать образование хрупких химических соединений в зоне соединения и получать сварные швы, характеризующиеся отсутствием дефектов, снижающих трещиностойкость материалов. Важным преимуществом использования барьерных слоев является возможность повышать прочностные характеристики композитов за счет дополнительного деформационного упрочнения тонколистовых пластин. Экспериментально показано, что с позиции повышения прочности соединения заготовок из разнородных материалов (стали 09Х18Н10Т и сплава ВТ20) двухслойная промежуточная вставка, сочетающая пластины бронзы и тантала, более предпочтительна по сравнению с танталовой вставкой.

Список литературы

1. Титановые сплавы в машиностроении / Б.Б. Че-чулин, С.С. Ушков, И.Н. Разуваева, В.Н. Гольдфайн. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
2. *Leyens C., Peters M.* Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2003. – 532 p. – ISBN 978-3-527-30534-6.
3. Наномодифицирование сварных соединений при лазерной сварке металлов и сплавов / А.М. Ори-шич, А.Н. Черепанов, В.Н. Шапеев, Н.Б. Пугачева. – Новосибирск: СО РАН, 2014. – 252 с. – ISBN 978-5-7692-1379-3.
4. Сварка разнородных металлов и сплавов / В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин, Р.С. Курочко, Л.Г. Стрижев-ская. – М.: Машиностроение, 1984. – 239 с.
5. Structural and mechanical properties of metallic–intermetallic laminate composites produced by explosive welding and annealing / I.A. Bataev, A.A. Bataev, V.I. Mali, D.V. Pavliukova // *Materials and Design*. – 2013. – Vol. 35. – P. 225–234. – doi: 10.1016/j.matdes.2011.09.030.

6. Неоднородность пластической деформации титановых сплавов при высокоскоростном нагружении в процессе сварки взрывом / Д.В. Павлюкова, И.А. Батаев, В.И. Мали, Т.В. Журавина, Е.Б. Макарова, П.С. Ярцев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2011. – № 2. – С. 46–47.

7. Friction welding of TiNi alloy to stainless steel using Ni interlayer / S. Fukumoto, T. Inoue, S. Mizuno, K. Okita, T. Tomita, A. Yamamoto // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2010. – Vol. 15, iss. 2. – P. 124–130. – doi: 10.1179/136217109X12577814486692.

8. Deng Y., Sheng G., Xu C. Evaluation of the microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints of titanium to stainless steel with a pure silver interlayer // *Materials and Design*. – 2013. – Vol. 46. – P. 84–87. – doi: 10.1016/j.matdes.2012.09.058.

9. Diffusion bonding of commercially pure titanium to 304 stainless steel using copper interlayer / S. Kundu, M. Ghosh, A. Laik, K. Bhanumurthy, G.B. Kale, S. Chatterjee // *Materials Science and Engineering: A*. – 2005. – Vol. 407, iss. 1/2. – P. 154–160. – doi: 10.1016/j.msea.2005.07.010.

10. Characterisation of laser welded dissimilar Ti/steel joint using Mg interlayer / M. Gao, S.W. Mei, Z.M. Wang, X.Y. Li, X.Y. Zeng // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2012. – Vol. 17, iss. 4. – P. 269–276. – doi: 10.1179/1362171812Y.0000000002.

11. Elrefaey A., Tillmann W. Solid state diffusion bonding of titanium to steel using a copper base alloy as interlayer // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209, iss. 5. – P. 2746–2752. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.014.

12. Kundu S., Sam S., Chatterjee S. Interfacial reactions and strength properties in dissimilar titanium alloy/Ni alloy/microduplex stainless steel diffusion bonded joints // *Materials Science and Engineering: A*. – 2013. – Vol. 560. – P. 288–295. – doi: 10.1016/j.msea.2012.09.069.

13. Formation of the structure of titanium and stainless steel in laser welding / S.F. Gnyusov, V.A. Klimenov, Y.V. Alkhimov, A.D. Budnitskii, A.M. Orishich, A.N. Cherepanov, et al. // *Welding*

International. – 2013. – Vol. 27, iss. 4. – P. 295–299. – doi: 10.1080/09507116.2012.715908.

14. Структура и свойства композиции нержавеющей стали – медь – титан, полученной лазерной сваркой / В.Г. Буров, Н.С. Белоусова, А.Н. Черепанов, А.Г. Маликов, Е.В. Мельникова // *Материалы 11 Всероссийской научно–практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе»*. – Новосибирск, 2013. – С. 347–351.

15. Mali V.I., Maliutina Iu.N., Skorokhod K.A. Microstructure and strength of explosively welded titanium/Ni-based alloy composite with Cu/Ta as interlayer // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 682. – P. 21–24. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.21.

16. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Арисова В.Н. Диффузия в слоистых композитах: монография. – Волгоград: Политехник, 2006. – 403 с. – ISBN 5-230-04764-X.

17. Черепанов А.Н., Оришич А.М., Мали В.И. Лазерная сварка нержавеющей стали с титановым сплавом с применением многослойной вставки, полученной взрывом // *Физика горения и взрыва*. – 2014. – Т. 50, № 4. – С. 124–129.

18. Киселев С.П., Мали В.И. Численное и экспериментальное моделирование образования струи при высокоскоростном косом соударении металлических пластин // *Физика горения и взрыва*. – 2012. – Т. 48. – № 2. – С. 100–112.

19. Геометрические преобразования тонколистовых заготовок в процессе сварки взрывом многослойных пакетов / В.И. Мали, И.А. Батаев, А.А. Батаев, Д.В. Павлюкова, Е.А. Приходько // *Физическая мезомеханика*. – 2011. – № 14. – С. 117–124.

20. Thermal stability of a Cu/Ta multilayer: an intriguing interfacial reaction / H.J. Lee, K.W. Kwon, C. Ryu, R. Sinclair // *Acta Materialia*. – 1999. – Vol. 47, iss. 15/16. – P. 3965–3975. – doi: 10.1016/S1359-6454(99)00257-8.

21. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. В 3 т. Т. 2 / под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – 1024 с. – ISBN 5-217-01569-1.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(69), October – December 2015, Pages 61–71

Welding of dissimilar materials with interlayers employment containing copper and tantalum**Maliutina Iu.N.**¹, Ph.D. student, e-mail: iuliamaliutina@gmail.com**Stepanova N.V.**¹, Junior researcher, e-mail: naty@ya.ru**Cherkov A.G.**², Technologist, e-mail: cher@isp.nsc.ru**Chuchkova L.V.**¹, Student, e-mail: twitty-kun@mail.ru¹Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation²Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the RAS, 13 Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation**Abstract**

Investigations of welded joints as well as strength properties of composites formed by explosive welding of plates from titanium alloy VT20 and stainless steel 09Cr18Ni10Ti with interlayer's employment are conducted. The duty of interlayers are performed by the plates of tantalum or «brass – tantalum». It results in the suppression of brittle intermetallic phase's formation in the joining zone and obtaining the welds characterized by lack of defects that reduce fracture strength of materials. By the means of a microstructural analysis it is found that in the bonding zone the copper and iron as well as titanium and tantalum based solid solutions are formed. By the means of a transmission electron microscopy the deformation twins are detected in some grains of melted zone between copper alloy and stainless steel. There is evidence that twinning is the predominant deformation mechanism of explosive welding process. At the welding interface of brass and tantalum plates the structure represents a mechanical mixture of copper and nano dispersive inclusions of β – tantalum. The level of layers joining strength is used as a criterion of mechanical properties of composite materials. The maximum ultimate strength 420 MPa is characteristic of composite materials with interlayers from brass and tantalum. The strength of composite materials with tantalum plate as interlayer is 22 % less than the composite with «brass – tantalum» interlayers. This reduction is probably due to the molten zones formation in the thin surfaces layers of plates between stainless steel and tantalum. During crystallization of these zones the low plastic tantalum and iron based chemical compounds were formed. Insertion of two layered «brass – tantalum» interlayer between stainless steel and titanium alloy is reasonable to increase the strength properties of composites.

Keywords:

explosive welding, interlayer, bonding structure, layers joining strength.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-61-71

References

1. Chechulin B.B., Ushkov S.S., Razuvaeva I.N., Goldfain V.N. *Titanovye splavy v mashinostroenii* [Titanium alloys in engineering]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977. 248 p.
2. Leyens C., Peters M. Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications. Weinheim, Wiley-VCH Verlag, 2003. 532 p. ISBN 978-3-527-30534-6
3. Orishich A.M., Cherepanov A.N., Shapeev V.N., Pugacheva N.B. *Nanomodifitsirovanie svarnykh soedinenii pri lazernoi svarke metallov i splavov* [Nanomodification of welded joints by laser welding of metals and alloys]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2014. 252 p. ISBN 978-5-7692-1379-3
4. Ryabov V.R., Rabkin D.M., Kurochko R.S., Strizhevskaya L.G. *Svarka raznorodnykh metallov i splavov* [Welding of dissimilar metals and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 239 p.
5. Bataev I.A., Bataev A.A., Mali V.I., Pavliukova D.V. Structural and mechanical properties of metallic–intermetallic laminate composites produced by explosive welding and annealing. *Materials and Design*, 2013, vol. 35, pp. 225–234. doi: 10.1016/j.matdes.2011.09.030
6. Pavliukova D.V., Bataev I.A., Mali V.I., Zhuravina T.V., Makarova E.B., Yartsev P.S. Neodnorodnost' plasticheskoi deformatsii titanovykh splavov pri vysokoskoprostnom nagruzenii v protsesse svarki vzryvom [Inhomogeneity of the plastic flow of titanium alloys under the high-speed loading during the explosion welding process]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 2 (51), pp. 46–47.

7. Fukumoto S., Inoue T., Mizuno S., Okita K., Tomita T., Yamamoto A. Friction welding of TiNi alloy to stainless steel using Ni interlayer. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, vol. 15, iss. 2, pp. 124–130. doi: 10.1179/136217109X12577814486692
8. Deng Y., Sheng G., Xu C. Evaluation of the microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints of titanium to stainless steel with a pure silver interlayer. *Materials and Design*, 2013, vol. 46, pp. 84–87. doi: 10.1016/j.matdes.2012.09.058
9. Kundu S., Ghosh M., Laik A., Bhanumurthy K., Kale G.B., Chatterjee S. Diffusion bonding of commercially pure titanium to 304 stainless steel using copper interlayer. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, vol. 407, iss. 1–2, pp. 154–160. doi: 10.1016/j.msea.2005.07.010
10. Gao M., Mei S.W., Wang Z.M., Li X.Y., Zeng X.Y. Characterisation of laser welded dissimilar Ti/steel joint using Mg interlayer. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, vol. 17, iss. 4, pp. 269–276. doi: 10.1179/1362171812Y0000000002
11. Elrefaey A., Tillmann W. Solid state diffusion bonding of titanium to steel using a copper base alloy as interlayer. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, iss. 5, pp. 2746–2752. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.014
12. Kundu S., Sam S., Chatterjee S. Interfacial reactions and strength properties in dissimilar titanium alloy/Ni alloy/microduplex stainless steel diffusion bonded joints. *Materials Science and Engineering: A*. 2013, vol. 560, pp. 288–295. doi: 10.1016/j.msea.2012.09.069
13. Gnyusov S.F., Klimenov V.A., Alkhimov Y.V., Budnitskii A.D., Orishich A.M., Cherepanov A.N., Afonin Yu.V. Formation of the structure of titanium and stainless steel in laser welding. *Welding International*, 2013, vol. 27, iss. 4, pp. 295–299. doi: 10.1080/09507116.2012.715908
14. Burov V.G., Belousova N.S., Cherepanov A.N., Malikov A.G., Mel'nikova E.V. [Structure and properties of stainless steel – copper – titanium composite produced by laser welding]. *Materialy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Problemy povysheniya effektivnosti metalloobrabotki v promyshlennosti na sovremennom etape"* [Proceedings of the 11th All-Russian scientific and practical conference "Problems of increasing the efficiency in the metalworking industry at the present stage"]. Novosibirsk, 2013, pp. 347–351. (In Russian)
15. Mali V.I., Maliutina Iu.N., Skorokhod K.A. Microstructure and strength of explosively welded titanium/Ni-based alloy composite with Cu/Ta as interlayer. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 21–24. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.21
16. Trykov Yu.P., Gurevich L.M., Arisova V.N. *Diffuziya v sloistykh kompozitakh* [Diffusion in layered composites]. Volgograd, Politehnik Publ., 2006, 403 p. ISBN 5-230-04764-X
17. Cherepanov A.N., Orishich A.M., Mali V.I. Lazernaya svarka nerzhavayushchei stali s titanovym splavom s primeneniem mnogoslainoi vstavki, poluchennoi vzryvom [Laser welding of stainless steel with a titanium alloy with the use of a multilayer insert obtained in an explosion]. *Fizika goreniya i vzryva – Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 124–129. (In Russian)
18. Kiselev S.P., Mali V.I. Chislennoe i eksperimental'noe modelirovanie obrazovaniya strui pri vysokoskorostnom kosom soudarenii metallicheskih plastin [Numerical and experimental modeling of jet formation during a high-velocity oblique impact of metal plates]. *Fizika goreniya i vzryva – Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2012, vol. 48, no. 2, pp. 100–112. (In Russian)
19. Mali V.I., Bataev I.A., Bataev A.A., Pavliukova D.V., Prihod'ko E.A., Esikov M.A. Geometricheskie preobrazovaniya tonkolistovykh zagotovok v protsesse svarki vzryvom mnogoslainykh paketov [Geometrical transformation of thin sheet billets in the process of explosion welding of multilayered laminals]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2011, vol. 14, no. 6, pp. 117–124. (In Russian)
20. Lee H.J., Kwon K.W., Ryu C., Sinclair R. Thermal stability of a Cu/Ta multilayer: an intriguing interfacial reaction. *Acta Materialia*, 1999, vol. 47, iss. 15–16, pp. 3965–3975. doi: 10.1016/S1359–6454(99)00257–8
21. Lyakishev N.P., ed. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem. Spravochnik. V 3 t. T. 2* [Phase diagrams of binary metallic systems. Reference book. In 3 vol. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1997. 1024 p. ISBN 5-217-01569-1

Funding

This study was supported by Russian Science Foundation (project No. 15-19-00230).

Article history:

Received 16 July 2015

Revised 17 August 2015

Accepted 20 October 2015

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ, ЛЕГИРОВАННОЙ МЕДЬЮ И АЛЮМИНИЕМ*

*Н.В. СТЕПАНОВА¹, мл. науч. сотруд.
 А.А. БАТАЕВ¹, доктор техн. наук, профессор
 А.А. СИТНИКОВ², доктор техн. наук, профессор
 Т.Н. ОСКОЛКОВА³, канд. техн. наук, доцент
 (¹НГТУ, г. Новосибирск,
²АлтГТУ, г. Барнаул,
³СГИУ, г. Новокузнецк)*

Поступила 17 июля 2015

Рецензирование 17 августа 2015

Принята к печати 20 октября 2015

Степанова Н.В – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
 Новосибирский государственный технический университет,
 e-mail: stepanova@adm.nstu.ru

Исследованы структура, механические свойства и износостойкость заэвтектоидной стали с содержанием 0,09...8,97 мас. % меди. Обнаружены три типа частиц на основе меди. Частицы первого типа имеют размер ~20 нм и располагаются в ферритных промежутках перлита. Частицы второго типа имеют размер ~1 мкм и располагаются по границам бывшего зерна γ -Fe. Частицы третьего типа имеют круглую форму и размер ~25 мкм. Повышение содержания меди сопровождается ростом микротвердости пластинчатого перлита. Введение в сталь 3 мас. % Си сопровождается ростом микротвердости перлита с 380 до 430 НВ. При этом твердость по Бринеллю увеличивается с 340 до 390 НВ. Главным образом, это связано с выделением в ферритных промежутках наноразмерных частиц ε -фазы. При испытаниях по схеме трения скольжения износостойкость заэвтектоидной стали, содержащей 8,97 % меди, в 3,5 раза выше по сравнению с бронзой БрА9ЖЗЛ и на ~23 % по сравнению с антифрикционным чугуном АЧС-1. В условиях трения о закрепленные частицы абразива относительная износостойкость заэвтектоидной стали с добавлением меди почти в 3 раза выше износостойкости бронзы БрА9ЖЗЛ. Увеличение уровня износостойкости в условиях трения скольжения, связанное с повышением содержания меди, вызвано повышением объемной доли наноразмерных частиц на основе меди.

Ключевые слова: заэвтектоидная сталь, структура, наноразмерные включения, микротвердость, износостойкость.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-72-79

Введение

Железоуглеродистые сплавы, легированные медью [1-5], относятся к группе материалов, применение которых рационально для изготовления изделий антифрикционного назначения. По мнению специалистов, в ряде случаев они способны заменить широко используемые в на-

стоящее время дорогостоящие бронзы. В первую очередь речь идет об изготовлении крупногабаритных механизмов с тяжело нагруженными узлами трения скольжения. В проведенных ранее исследованиях отмечалась возможность повышения антифрикционных свойств низкоуглеродистой стали [1] и чугуна [2] путем введения в их состав меди. Основным фактором, объяс-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00230).

няющим снижение коэффициента трения этих сплавов, является формирование в структуре на разных этапах кристаллизации материалов медьсодержащих частиц размером от нескольких нанометров до десятков микрометров. Введение алюминия повышает растворимость меди в железе [6], что является дополнительным фактором, оказывающим положительное влияние на равномерность распределения медьсодержащих частиц в железоуглеродистой матрице. Наноразмерные частицы на основе меди благоприятно отражаются также и на комплексе механических свойств железоуглеродистых сплавов. Такие частицы могут быть сформированы как при длительных изотермических отжигах закаленной стали [7–10], так и в процессе кристаллизации литых железоуглеродистых сплавов [1–4].

Целью исследования является разработка антифрикционного материала на железной основе для замены бронзы, используемой при изготовлении деталей узлов трения скольжения. Для достижения поставленной цели были изготовлены отливки из заэвтектидной стали, легированной медью и алюминием, а также исследованы структура и износостойкость полученного материала.

Материалы и методы исследования

В работе исследованы отливки из заэвтектидной стали с различным содержанием меди. Температура заливки сплавов в формы составляла 1550 °С. Химический анализ отливок контролировали на оптическом эмиссионном спектрометре ARL 3460. Элементный состав литых образцов представлен в табл. 1. Микроструктурные исследования были проведены на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer A1m. Объектами исследования являлись металлографические шлифы. Структуру материалов выявляли химическим методом с использованием в качестве травителя четырехпроцентного рас-

твора азотной кислоты в этиловом спирте. Измерения твердости по Бринеллю проведены при нагрузке на индентор 3000 кг. Твердость по Виккерсу оценивали на микротвердомере Wolpert Group 402MVD при нагрузке на алмазный индентор 100 г.

Элементный состав медьсодержащих включений определяли на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP с использованием энергодисперсионного микроанализатора [11]. Испытания образцов на износостойкость проводили на машине трения СМТ-1 по схеме «диск – плоскость» в условиях смазки при нагрузке 500 Н, скорости скольжения 50 м/мин. Относительную износостойкость определяли при испытаниях на абразивное изнашивание в условиях трения образцов о закрепленные абразивные частицы. Для сравнения результатов в работе проведены исследования типичных антифрикционных материалов: бронзы БрА9ЖЗЛ и антифрикционного чугуна АЧС-1.

Результаты и обсуждение

Полученные в работе сплавы являются многокомпонентными. Анализ структурных превращений в них осуществлялся на основании тройной диаграммы состояния Fe-C-Cu [12–15]. Схематичное представление структуры заэвтектидной стали, легированной различным содержанием меди, отражено на рис. 1. Примеры структуры реальных сплавов, полученных в работе, представлены на рис. 2. В исходном состоянии заэвтектидная сталь содержит микрообъемы пластинчатого перлита и включения вторичного цементита (рис. 2, а), выделившегося в виде сетки по границам бывших аустенитных зерен. Объемная доля цементита в сплаве составила ~ 9 %.

Особенностью, характерной для перлита стали, легированной медью, является присутствие множества мелкодисперсных включений

Таблица 1

Результаты химического анализа отливок

№ п/п	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Al	Fe
1	2,11	0,36	0,27	0,01	0,01	0,03	0,04	0,09	1,15	Ост.
2	2,10	0,36	0,29	0,01	0,01	0,03	0,04	3,01	1,25	
3	2,12	0,37	0,30	0,01	0,02	0,03	0,04	6,02	1,30	
4	2,10	0,36	0,27	0,01	0,01	0,03	0,04	8,97	1,20	

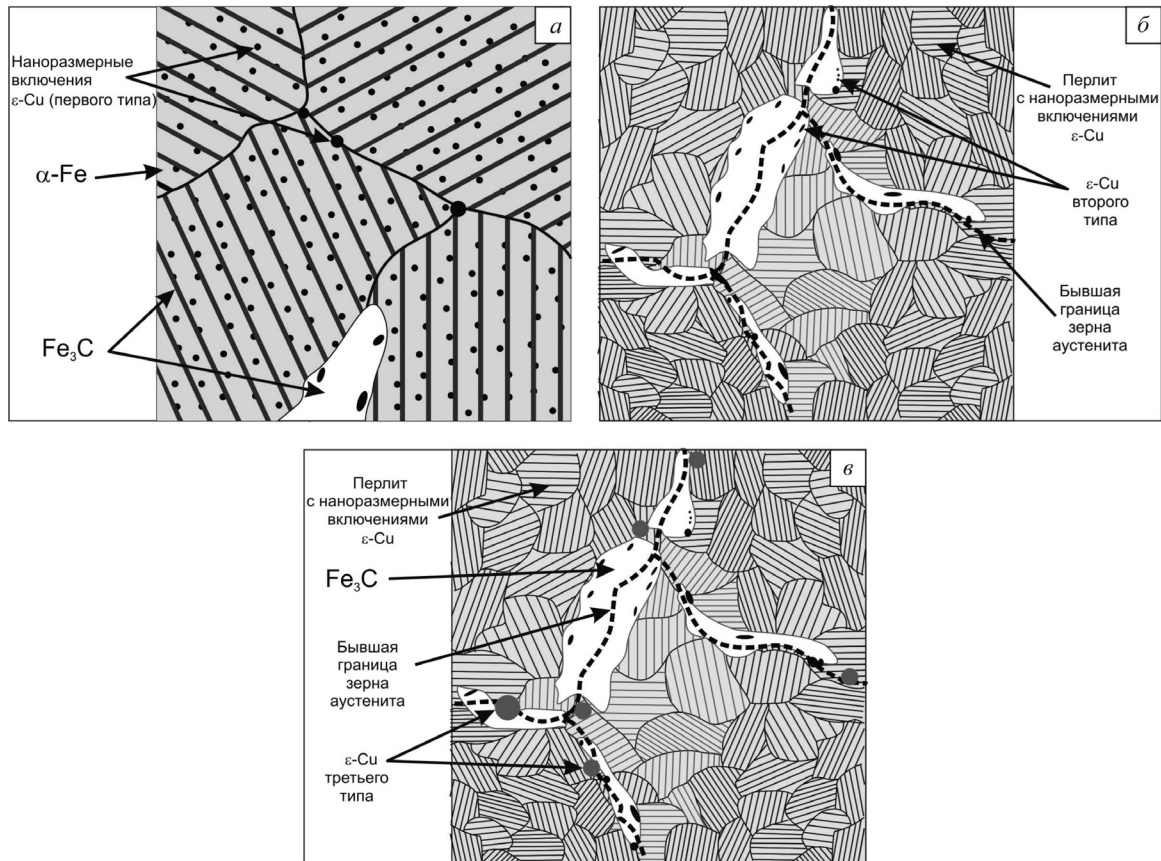


Рис. 1. Структура заэвтектоидной стали с разными типами медьсодержащих частиц (а – первого типа; б – первого и второго типа; в – первого, второго и третьего типа)

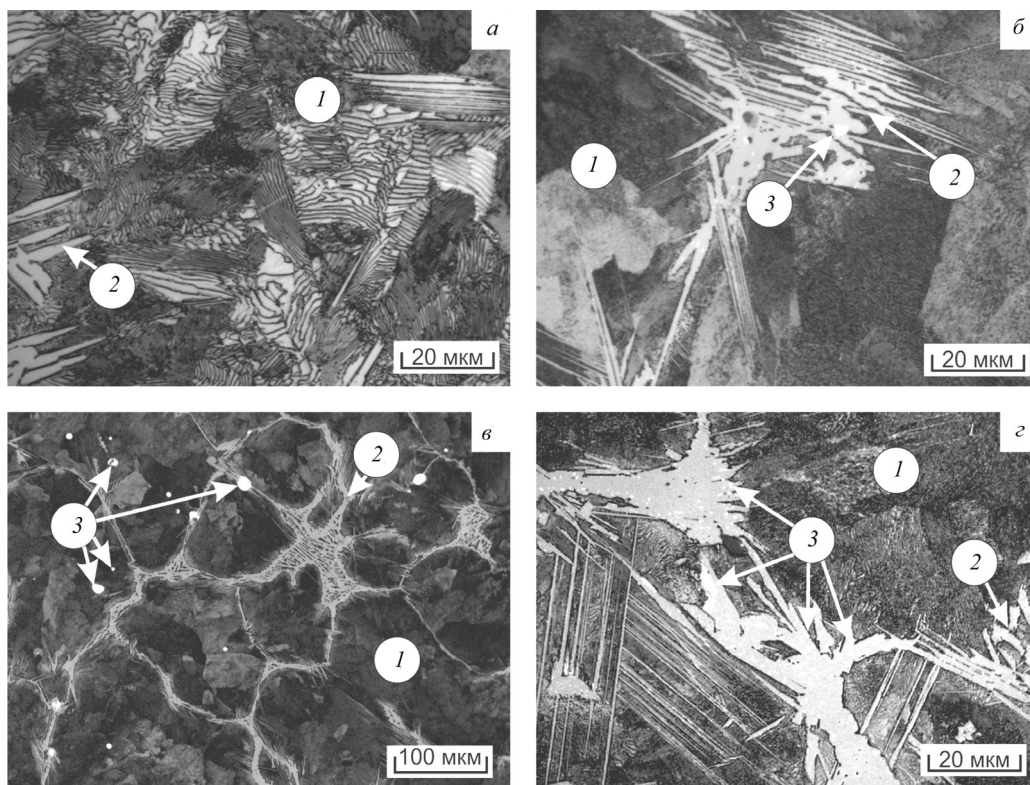


Рис. 2. Структура заэвтектоидной стали, легированной медью (а – 0,09 % Cu; б – 6,02 % Cu; в, г – 8,97 % Cu); 1 – перлит; 2 – цементит; 3 – медьсодержащие включения

фазы ϵ -Cu, выделяющихся из ферритной матрицы в результате изменения растворимости меди в α -железе Fe (рис. 1, а). В связи с относительно большим размером атомов меди по сравнению с железом, их диффузия в решетке железа крайне затруднена. По этой причине выделяющиеся из феррита частицы, содержащие медь, являются наноразмерными (частицы первого типа) [1].

В сплавах с 2,1...7 % Cu зафиксированы два типа медьсодержащих включений. Наноразмерные частицы (первого типа) располагаются в ферритных промежутках перлита, а более крупные (второго типа) – по границам бывшего зерна γ -Fe (рис. 1, б). Причина формирования крупных частиц заключается в уменьшении растворимости меди в γ -Fe при охлаждении сплава. Образуются они в интервале температур 1094...850 °С. Средний размер частиц ϵ -Cu второго типа составляет 1...2 мкм (3 на рис. 2, б, в). При определенных условиях такие включения выстраиваются в цепочки по границам бывшего аустенитного зерна (рис. 2, б).

Увеличение содержания меди способствует измельчению феррито-цементитной смеси. Это связано, вероятно, с тем, что медь оказывает влияние на скорость кристаллизации железоуглеродистых сплавов, которая, в свою очередь, связана с повышением теплопроводности расплава [16].

Диаграмма Fe-Cu-C [14, 15] предполагает появление в структуре сплавов, содержащих от 4,5 до 11 % меди, включений ϵ -Cu третьего типа, схематически представленных на рис. 1, в. Предполагается, что их образование происходит в диапазоне температур от 1320 до 1094 °С посредством диффузии атомов меди из γ -Fe. В данном температурном диапазоне частицы ϵ -Cu находятся в жидком состоянии. При охлаждении сплава до 1094 °С эти включения кристаллизуются. Кроме меди, в составе включений присутствуют также железо и алюминий. На рис. 3 показано распределение размеров включений ϵ -фазы, полученное при анализе результатов оптической металлографии стали, содержащей 8,97 % Cu. Средний размер включений третьего типа составляет ~25 мкм (3 на рис. 2, в).

Введение меди в заэвтектоидную сталь приводит к изменению микротвердости сплавов. В частности, с повышением содержания меди до 3 % микротвердость перлита возрастает

с 380 до 430 HV (рис. 4). При этом твердость заэвтектоидной стали по Бринеллю увеличивается с 340 до 390 НВ. Дальнейшее повышение концентрации меди существенного влияния на микротвердость перлита и твердость стали по Бринеллю не оказывает. Основной причиной увеличения значений микротвердости перлита является выделение наноразмерных медьсодержащих включений [1, 7–10].

На рис. 5 показана зависимость износостойкости заэвтектоидной стали в условиях трения скольжения от содержания в ней меди. Полученные данные сравнивали с результатами испытаний материалов, широко используемых в тяжело нагруженных узлах трения: бронзы БрА9ЖЗЛ, близкой по составу к медьсодержащим включениям, и антифрикционного чугуна АЧС-1. Уровень износостойкости стальных об-

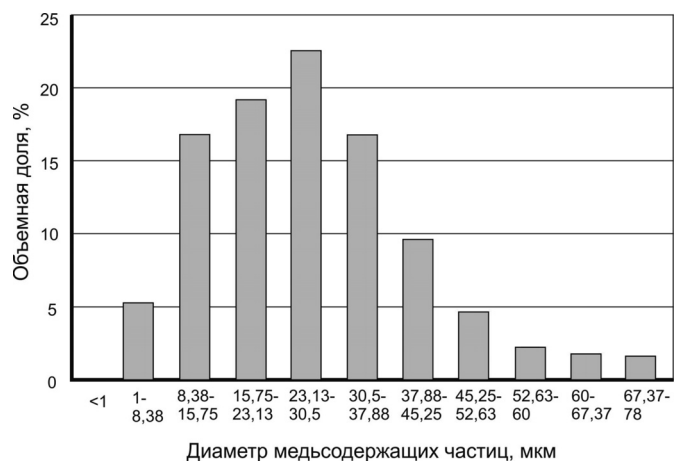


Рис. 3. Распределение размеров медьсодержащих частиц в заэвтектоидной стали, содержащей 8,97 мас. % Cu

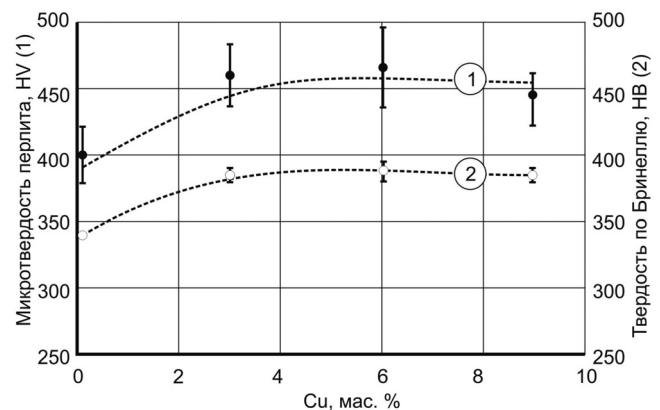


Рис. 4. Влияние содержания меди на микротвердость перлита и твердость по Бринеллю заэвтектоидной стали

разцов, легированных медью, выше, чем антифрикционного чугуна (рис. 5). Одна из причин такого поведения связана с наличием в структуре заэвтектоидной стали избыточного цемента, обеспечивающего более высокий уровень твердости, и, как следствие, высокую износостойкость материала. Дополнительный вклад в увеличение износостойкости оказывают медьсодержащие включения. Увеличение уровня износостойкости заэвтектоидной стали, содержащей до 3 % меди, обусловлено образованием наноразмерных включений ϵ -фазы. При повышении содержания меди уровень износостойкости стали продолжает увеличиваться. Это связано с появлением в структуре сплава медьсодержащих включений со средним размером ~ 25 мкм. Микротвердость таких включений составляет ~ 145 HV. Повышение износостойкости заэвтектоидной стали, содержащей ~ 9 % меди, обусловлено образованием крупных медьсодержащих включений, характеризующихся низким коэффициентом трения.

На рис. 6 представлены результаты испытаний исследуемых материалов в условиях трения о закрепленные частицы абразива. Анализ экспериментальных данных показал, что относительная износостойкость заэвтектоидной стали с 8,97 % меди примерно в 3,5 раза выше износостойкости бронзы БрА9Ж3Л и 2,5 раза выше износостойкости чугуна АЧС-1. Влияние содержания меди на уровень относительной износостойкости заэвтектоидной стали незначительно.

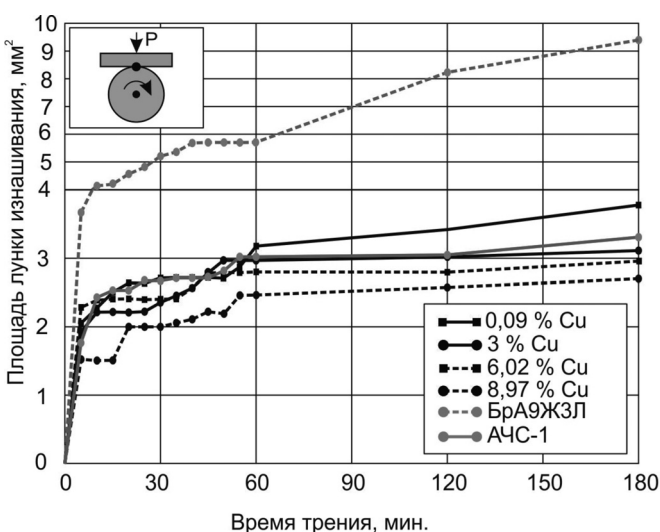


Рис. 5. Износостойкость заэвтектоидной стали с разным содержанием меди в сравнении с БрА9Ж3Л и АЧС-1

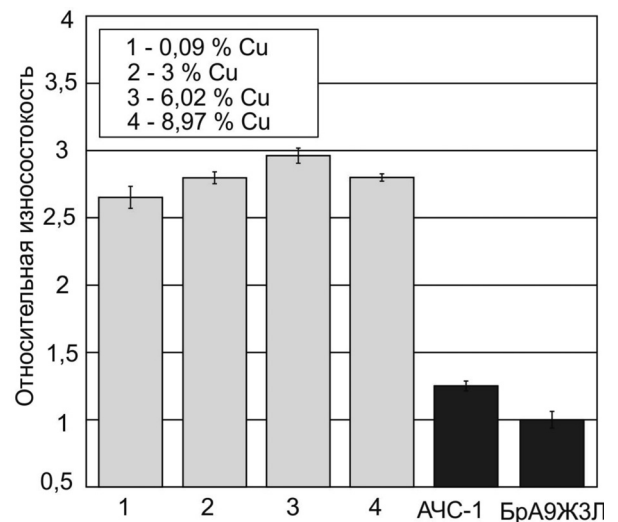


Рис. 6. Относительная износостойкость материалов при трении о закрепленные частицы абразива заэвтектоидной стали с разным содержанием меди в сравнении с БрА9Ж3Л и АЧС-1

Выводы

Легирование медью приводит к изменениям структуры и механических свойств заэвтектоидной стали. Введение в сталь 3 мас. % Cu сопровождается ростом микротвердости перлита с 380 до 430 HV. При этом твердость по Бринеллю увеличивается с 340 до 390 НВ. Для сплавов, содержащих медь, характерным является увеличение дисперсности ферритоцементитной смеси. Дополнительным фактором, способствующим росту твердости перлита, является выделение в ферритных промежутках наноразмерных частиц ϵ -фазы. В условиях трения скольжения со смазкой износостойкость заэвтектоидной стали, содержащей 8,97 % меди, в $\sim 3,5$ раза выше износостойкости бронзы БрА9Ж3Л и на ~ 23 % выше износостойкости антифрикционного чугуна АЧС-1. Относительная износостойкость высокоуглеродистой медистой стали в процессе трения о закрепленные частицы абразива почти в 3 раза выше по сравнению с бронзой БрА9Ж3Л.

Список литературы

1. *Stepanova N.V., Razumakov A.A.* The effect of doping with copper and aluminium on structure, mechanical and friction properties of steel // Proceedings of the 8th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2013), 28 June-1 July, Mongolian University of Science and Technology. – Ulaanbaator, Mongolia: IEEE organized, 2013. – Vol. 2. – P. 240-242.

2. Влияние меди на антифрикционные свойства серых чугунов / Е.Д. Головин, В.А. Кузнецов, В. Кумар, П.А. Попелюх, Н.В. Степанова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 1 (54). – С. 81–84.

3. *Stepanova N.V., Razumakov A.A., Lozhkina E.A.* Structure and mechanical properties of Cu–alloyed cast iron // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 682. – P. 178–182.

4. Influence of Surfactants on the Structure and wear resistance of copper alloyed hypereutectoid steel / N. Stepanova, A. Razumakov, E. Lozhkina, I. Zhil'tsov, V. Kuznetsov // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 1040. – P. 53–58. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.53.

5. *Sil'man G.I., Kamynin V.V., Tarasov A.A.* Effect of copper on structure formation in cast iron // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2003. – Vol. 45, iss. 7. – P. 254–258. – doi: 10.1023/A:1027320116132.

6. *Преварский А.П.* Исследование системы Fe–Cu–Al // *Известия Академии наук СССР. Металлы*. – 1971. – № 4. – С. 220–222.

7. *Chairuangstri T., Edmonds D.V.* The precipitation of copper in abnormal ferrite and pearlite in hyper-eutectoid steels // *Acta Materialia*. – 2000. – Vol. 48, iss. 15. – P. 3931–3949. – doi:10.1016/S1359-6454(00)00176-2.

8. *Cao L., Wu S., Liu B.* On the Cu precipitation behavior in thermo-mechanically embrittlement processed low copper reactor pressure vessel model steel // *Materials & Design*. – 2013. – Vol. 47. – P. 551–556. – doi: 10.1016/j.matdes.2012.12.055.

9. *Fourlaris G., Baker A.J., Papadimitriou G.D.* Microscopic characterisation of ϵ -Cu interphase precipitation in hypereutectoid Fe–C–Cu alloys // *Acta*

Metallurgica et Materialia. – 1995. – Vol. 43, iss. 7. – P. 2589–2604. – doi:10.1016/0956-7151(94)00474-V.

10. *Chairuangstri T., Edmonds D.V.* Abnormal ferrite in hyper-eutectoid steels // *Acta Materialia*. – 2000. – Vol. 48, iss. 7. – P. 1581–1591. – doi: 10.1016/S1359-6454(99)00442-5.

11. Amorphous, quasicrystalline and other metastable structures produced at the interface of explosively welded dissimilar materials / I. Malutina, I. Bataev, D. Lazurenko, K. Hokamoto, M. Esikov, V. Mali, A. Jorge Junior, A. Bataev // 22nd International Symposium of Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (ISMANAM 2015), Paris, France, 13–17 July 2015. – Paris, 2015. – P. 25.

12. Медь в черных металлах / под ред. И. Ле Мэя, Л.М.-Д. Шетки; пер. с англ. И.Д. Марчуковой, А.Н. Штейнберга; под ред. О.А. Банных. – М.: Металлургия, 1988. – 311 с. – ISBN 5-229-00073-2.

13. Диаграммы состояния металлических систем: справочник. В 3 т. Т. 2 / под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 1024 с. – ISBN 5-217-01569-1.

14. *Shubhank K., Kang Y.* Critical evaluation and the thermodynamic optimization of Fe–Cu, Cu–C, Fe–C binary systems and Fe–Cu–C ternary system // *Calphad*. – 2014. – Vol. 45. – P. 127–137. – doi: 10.1016/j.calphad.2013.12.002.

15. *Sil'man G.I.* About retrograde solidus and stratification of melt in the Fe–Cu and Fe–Cu–C systems // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2009. – Vol. 51, iss. 1. – P. 19–24. – doi: 10.1007/s11041-009-9120-1.

16. *Яковлев А.Ю., Волчок И.П.* Влияние меди на структуру и свойства графитизированной стали // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2008. – № 1. – С. 44–46.

ОБРАБОТКА METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(69), October – December 2015, Pages 72–79

Wear resistance of hypereutectoid steel, alloy with copper and aluminum

Stepanova N.V.¹, Junior researcher, e-mail: naty@ya.ru

Bataev A.A.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, Rector, e-mail: bataev@adm.nstu.ru

Sitnicov A.A.², D.Sc. (Engineering), Professor, Rector, e-mail: sitalan@rambler.ru

Oskolkova T.N.³, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: oskolkova@kuz.ru

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

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

³ Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Abstract

Structure, mechanical properties and wear resistance of hypereutectoid steels with 0.09... 8.97 wt. % Cu is investigated. Addition of 3 wt. % Cu to the steel is accompanied by an increase in microhardness of pearlite from 380 to 430 HV. At the same time Brinell hardness increases from 340 to 390 HB. A further increase in the concentration of copper has no significant effect on the microhardness of pearlite and the Brinell hardness of the steel. Increasing copper content is the reason for the growth of lamellar pearlite microhardness. Three types of copper-based particles are detected. The first type particles have a size of about 20 nm and are arranged at ferrite intervals of pearlite. The particles of the second type have a size of ~ 1 μm and are arranged at a former grain boundaries of $\gamma\text{-Fe}$. The particles of the third type have a circular shape and size of ~ 25 μm . Wear resistance of hypereutectoid steel, containing 8.97 wt. % copper, is 3.5 times higher compared to bronze and ~ 23 % in comparison with antifriction cast iron when tested according to the scheme of sliding friction. Mainly, this is due to nanoparticles precipitated in pearlite the copper-based ϵ -phase. Relative wear resistance of hypereutectoid steel with addition of copper is almost 3 times higher than the durability of bronze in the friction conditions of fixed abrasive particles. The increase in wear resistance in sliding friction conditions, associated with a high content of copper, is due to increases in the volume fraction of cupric nanoparticles.

Keywords:

hypereutectoid steel, structure, nanoparticles, microhardness, wear resistance.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-72-79

References

1. Stepanova N.V., Razumakov A.A. The effect of doping with copper and aluminium on structure, mechanical and friction properties of steel. *The 8 International Forum on Strategic Technologies (IFOST 2013): proceedings*, Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013, Ulaanbaatar, 2013, vol. 1, pp. 240–242.
2. Golovin E.D., Kuznetsov V.A., Kumar V., Popelyukh P.A., Stepanova N.V. Vliyanie medi na antifriktsionnyye svoystva serykh chugunov [Effect of copper addition on friction properties of gray cast iron]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2012, no. 1 (54), pp. 81–84.
3. Stepanova N.V., Razumakov A.A., Lozhkina E.A. Structure and mechanical properties of Cu–alloyed cast iron. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 178–182. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.178
4. Stepanova N., Razumakov A., Lozhkina E., Zhil'tsov I., Kuznetsov V. Influence of surfactants on the structure and wear resistance of copper alloyed hypereutectoid steel. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1040, pp. 53–58. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.53
5. Sil'man G.I., Kamynin V.V., Tarasov A.A. Effect of copper on structure formation in cast iron. *Metal Science and Heat Treatment*, 2003, vol. 45, iss. 7, pp. 254–258. doi: 10.1023/A:1027320116132
6. Prevarskii A. P. Issledovanie sistemy Fe–Cu–Al [Study of Fe–Cu–Al system]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Metallurgiya – Russian metallurgy (Metally)*, 1971, no. 4, pp. 220–222. (In Russian)
7. Chairuangri T., Edmonds D.V. The precipitation of copper in abnormal ferrite and pearlite in hyper-eutectoid steels. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, iss. 15, pp. 3931–3949. doi:10.1016/S1359-6454(00)00176-2
8. Cao L., Wu S., Liu B. On the Cu precipitation behavior in thermo-mechanically embrittlement processed low copper reactor pressure vessel model steel. *Materials & Design*, 2013, vol. 47, pp. 551–556. doi: 10.1016/j.matdes.2012.12.055
9. Fourlaris G., Baker A.J., Papadimitriou G.D. Microscopic characterisation of ϵ -Cu interphase precipitation in hypereutectoid Fe–C–Cu alloys. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1995, vol. 43, iss. 7, pp. 2589–2604. doi:10.1016/0956-7151(94)00474-V
10. Chairuangri T., Edmonds D.V. Abnormal ferrite in hyper-eutectoid steels. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, iss. 7, pp. 1581–1591. doi: 10.1016/S1359-6454(99)00442-5
11. Malutina I., Bataev I., Lazurenko D., Hokamoto K., Esikov M., Mali V., Jorge Junior A., Bataev A. Amorphous, quasicrystalline and other metastable structures produced at the interface of explosively welded dissimilar materials. *The 22nd International Symposium of Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (ISMANAM 2015)*. France, Paris, 13–17 July 2015, p. 25.
12. LeMay I., Schetky L. McD., eds. *Copper in Iron and Steel*. 1st ed. New York, Wiley, 1982. 448 p. ISBN-10: 0471059137. ISBN-13: 978-0471059134. (Russ. ed.: LeMei I., Shetki L. M.–D. *Med' v chernykh metallakh*. Moscow, Metallurgiya publ., 1988. 311 p. ISBN 5-229-00073-2)

13. Lyakishev N.P., ed. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem. Spravochnik. V 3 t. T. 2* [Phase diagrams of binary metallic systems. Reference book. In 3 vol. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1997. 1024 p. ISBN 5-217-01569-1

14. Shubhank K., Kang Y. Critical evaluation and the thermodynamic optimization of Fe–Cu, Cu–C, Fe–C binary systems and Fe–Cu–C ternary system. *Calphad*, 2014, vol. 45, pp. 127–137. doi: 10.1016/j.calphad.2013.12.002

15. Sil'man G. I. About retrograde solidus and stratification of melt in the Fe–Cu and Fe–Cu–C systems. *Metal Science and Heat Treatment*, 2009, vol. 51, iss. 1, pp. 19–24. doi: 10.1007/s11041-009-9120-1

16. Yakovlev A.Yu., Volchok I.P. Vliyanie medi na strukturu i svoistva grafitizirovannoi stali [The effect of copper on the structure and properties of graphitized steel]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 2008, no. 1, pp. 44–46. (In Russian)

Funding

This study was supported by Russian Science Foundation (project No. 15-19-00230).

Article history:

Received 17 July 2015

Revised 17 August 2015

Accepted 20 October 2015

ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ*

*А.В. МАКАРОВ^{1,2,3}, доктор техн. наук, ст. науч. сотрудник,
зав. отделом и лабораторией*

П.А. СКОРЫНИНА², аспирант

А.Л. ОСИНЦЕВА², канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник

А.С. ЮРОВСКИХ³, канд. техн. наук, доцент

Р.А. САВРАЙ², канд. техн. наук, зав. лабораторией

(¹ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург,

²ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург,

³УрФУ, г. Екатеринбург)

Поступила 30 сентября 2015

Рецензирование 30 октября 2015

Принята к печати 10 ноября 2015

Скорынина П.А. – 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34,
Институт машиноведения УрО РАН,
e-mail: skorynina@imach.uran.ru

Низкие прочностные свойства коррозионно-стойких аустенитных хромоникелевых сталей не могут быть улучшены термической обработкой. Поверхностные деформационные упрочняющие обработки (ультразвуковые ударные, дробеструйная и др.) часто не обеспечивают высокого качества обработанной поверхности. Поэтому первостепенная задача заключается в создании и совершенствовании методов финишной обработки, обеспечивающих наряду с эффективным деформационным упрочнением получение высококачественной поверхности аустенитных сталей. Это имеет особое значение для прецизионных деталей трибосопряжений.

Изучено влияние фрикционной обработки полусферическим индентором из синтетического алмаза на фазовый состав, структуру, микромеханические и трибологические характеристики поверхностных слоев метастабильной аустенитной стали 12Х18Н10Т (масс. %: 0,10 С; 17,72 Сг; 10,04 Ni; 0,63 Ti; 1,33 Mn; 0,57 Si; 0,227 Mo; 0,064 Co; 0,014 Nb; 0,057 Cu; 0,031 P; 0,014 S; остальное Fe). Установлено, что при фрикционной обработке аустенитной стали формируется качественная поверхность с низким значением параметра шероховатости ($Ra \approx 100$ нм). При этом в поверхностном слое возникают нанокристаллические и фрагментированные субмикрокристаллические мартенситно-аустенитные структуры, достигается высокий уровень упрочнения поверхности (710 HV_{0,025}), а также существенное снижение интенсивности изнашивания и коэффициента трения в условиях сухого трения скольжения. Обнаруженное резкое повышение наноструктурирующей фрикционной обработкой трибологических свойств аустенитной стали на начальном этапе трения связано с ограничением развития на наноструктурированной поверхности процессов схватывания и сменой механизма изнашивания – от схватывания к пластическому оттеснению. Обосновано использование метода кинетического микроиндентирования для анализа повышенного сопротивления наноструктурированного слоя с мартенситно-аустенитной структурой пластическому деформированию при адгезионном изнашивании.

Ключевые слова: аустенитная нержавеющая сталь, фрикционная обработка, нанокристаллическая структура, мартенсит деформации, микроиндентирование, трение скольжения, трибологические свойства.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-80-92

* Работа выполнена по теме «Структура» № 01201463331 (проект № 15-9-12-45) при поддержке РФФИ (проект № 15-08-07947). Трибологические и микромеханические испытания, электронная сканирующая микроскопия и профилометрия выполнены в ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН. Электронная просвечивающая микроскопия реализована на оборудовании Лаборатории структурных методов анализа материалов и наноматериалов ЦКП УрФУ.

Введение

Аустенитные хромоникелевые стали, обладающие высокой коррозионной стойкостью и технологичностью, находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Однако их низкие прочностные свойства не могут быть улучшены термической обработкой. Зернограничное и субструктурное упрочнение аустенитных сталей эффективно реализуется в современных технологиях поверхностного пластического деформирования, таких, например, как обработка SMAT (ультразвуковая обработка шариками в вакууме) [1], ультразвуковая ковка в вакууме и дробеструйная обработка [2], ультразвуковая ударная обработка бойками [3], фрикционные обработки (скользящим цилиндрическим индентором со смазкой [4], с перемешиванием [5]) и др.

При этом деформационные упрочняющие обработки часто не обеспечивают высокого качества обработанной поверхности. Так, ультразвуковая ударная обработка бойками стали AISI 321 (12X18H10Г2Т) формирует достаточно грубую поверхность с параметром шероховатости $Ra = 2...3$ мкм [3], а дробеструйная обработка поверхности аустенитной стали AISI 304SS приводит к сильному росту шероховатости (от $Ra = 0,18$ мкм у исходного образца до $Ra = 3,53$ мкм после обработки дробью диаметром 0,8 мм) [2].

Поэтому первостепенная задача заключается в создании и совершенствовании методов финишной обработки, обеспечивающих не только эффективное деформационное упрочнение аустенитных сталей, но и получение высококачественной поверхности, что имеет особое значение для прецизионных деталей трибосопряжений. Эффективными методами финишной обработки поверхностным пластическим деформированием являются наноструктурирующая фрикционная обработка скользящими инденторами [6–10] и технология наноструктурирующего выплаживания, позволяющая при серийном изготовлении деталей из конструкционных сталей на металлообрабатывающих центрах формировать наноструктурное состояние и субмикрорельеф поверхностного слоя [11, 12].

В литературе содержатся весьма неоднозначные сведения относительно влияния поверхностных деформационных обработок на трибо-

логические свойства аустенитных сталей. При некоторых видах изнашивания (в частности, при адгезионном изнашивании) аустенитные стали могут упрочняться в процессе трибологического испытания даже более эффективно [13, 14], чем при деформационных упрочняющих обработках. В этом случае влияние деформационной обработки на трибологические свойства может быть нивелировано. Так, если в условиях трения скольжения со смазкой износостойкость метастабильной аустенитной стали AISI 304 в результате наноструктурирующей обработки SMAT повышается в 3 раза, то при трении без смазки SMAT не улучшает износостойкость стали [1]. В отличие от этих данных наноструктурирование поверхностного слоя аустенитной стали AISI 304 пескоструйной обработкой и отжигом при 350 °С повышает износостойкость в условиях сухого трения скольжения и коррозионного изнашивания [15], а дробеструйная обработка аустенитной стали AISI 316L также обеспечивает рост износостойкости при сухом трении скольжения [16].

В случае метастабильных аустенитных сталей важную роль в упрочнении и обеспечении трибологических свойств играет деформационное мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращение [4, 14, 17], интенсивность протекания которого в сильной степени зависит от состава сталей, условий деформационных обработок и последующих трибологических испытаний [2, 11, 14, 18, 19]. Поэтому только прямые эксперименты позволят сделать обоснованное заключение об эффективности влияния фрикционной обработки на трибологические свойства аустенитной стали.

Целью настоящей работы стало исследование влияния фрикционной обработки на фазовый состав, структуру, микромеханические и трибологические характеристики в условиях сухого трения скольжения поверхностных слоев метастабильной аустенитной стали 12X18H10T.

Методика экспериментального исследования

Исследовали коррозионно-стойкую аустенитную сталь 12X18H10T состава (масс. %): 0,10 С, 17,72 Cr; 10,04 Ni; 0,63 Ti; 1,33 Mn; 0,57 Si; 0,227 Mo; 0,064 Co; 0,014 Nb; 0,057 Cu; 0,031 P; 0,014 S; остальное Fe. Перед проведением

фрикционной обработки образцы размерами $98 \times 38 \times 8,6$ мм подвергали закалке от 1050°C в воде, механическому шлифованию и электролитическому полированию.

Фрикционную обработку проводили индентором из синтетического алмаза с радиусом полусферы $R = 3$ мм в безокислительной среде аргона (рис. 1) при нагрузке на индентор $P = 392$ Н и количестве проходов индентора (сканирований) $n = 11$.

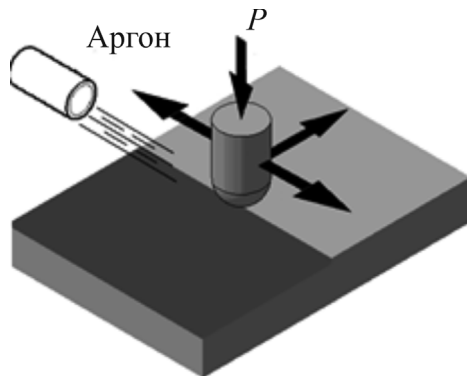


Рис. 1. Схема фрикционной обработки образца полусферическим индентором в среде аргона

Шероховатость поверхности образцов после фрикционной обработки изучали на оптическом профилометре Wyko NT-1100. Электронно-микроскопическое исследование структуры осуществляли с использованием микроскопа JEOL JEM-2100 методом тонких фольг на просвет с применением одностороннего и двустороннего механического и электролитического утонения заготовок. Микротвердость по методу остаточного отпечатка определяли на приборе LEICA VMHT при нагрузке $0,245$ Н. Микроиндентирование проводили на измерительной системе Fischerscope HM2000 XYm согласно стандарту ISO 14577 при максимальной нагрузке на индентор Виккерса $0,245$ Н. Фазовый состав образцов определяли на рентгеновском дифрактометре SHIMADZU XRD-7000 в CrK_α -излучении. Исследование поверхностей трения, поверхности стали после фрикционного нагружения осуществляли с использованием электронного сканирующего микроскопа с вольфрамовым катодом Tescan VEGA II XMU.

Трибологические испытания в условиях трения скольжения по схеме «палец–пластина»

выполняли при возвратно-поступательном движении образцов с рабочей поверхностью $5,5 \times 5,5$ мм из стали 12X18H10T по пластине из стали 45 (50 HRC) на воздухе при нагрузке $N = 137$ Н, средней скорости скольжения $V = 0,07$ м/с, длине рабочего хода $l = 40$ мм, пути трения $L = 1,6 \dots 320$ м. Определяли потери массы образца Δm и интенсивность изнашивания I_h , которую рассчитывали по формуле: $I_h = \Delta m / qSL$, где Δm – потери массы образца, г; q – плотность материала образца, г/см³; S – геометрическая площадь контакта, см²; L – путь трения, см. Силу трения измеряли с помощью упругого элемента – рессоры (кольца) с наклеенными на него тензометрическими датчиками сопротивления. Коэффициент трения f рассчитывали по формуле $f = F/N$, где F – сила трения, Н; N – нормальная нагрузка, Н.

Результаты и обсуждение

Исследования на оптическом профилометре показали, что фрикционная обработка стали 12X18H10T индентором из синтетического алмаза в среде аргона формирует качественную поверхность с низкими значениями параметра шероховатости (среднего арифметического отклонения профиля) $Ra = 80 \dots 100$ нм (рис. 2, а). Выбранный режим фрикционной обработки обеспечивает отсутствие схватывания, на поверхности аустенитной стали наблюдаются лишь полосы пластического оттеснения (рис. 2, б). Важно отметить, что особенностью аустенитных хромоникелевых сталей является их высокая склонность к схватыванию в условиях фрикционного воздействия. Именно поэтому в работе [4] при проведении обработки аустенитной хромоникелевой стали скользящим цилиндрическим индентором из твердого сплава применяли смазку.

В результате проведенной фрикционной обработки закаленной стали 12X18H10T с исходной микротвердостью $220 HV_{0,025}$ достигается интенсивное упрочнение ее поверхности вплоть до $710 HV_{0,025}$, а доля мартенсита деформации на поверхности стали согласно рентгеновского фазового анализа составляет ~ 70 объем. % (рис. 3). Указанный уровень деформационного упрочнения значительно превышает уровень микротвердости $500 HV$, который обеспечивает наноструктурирующая обработка SMAT подоб-

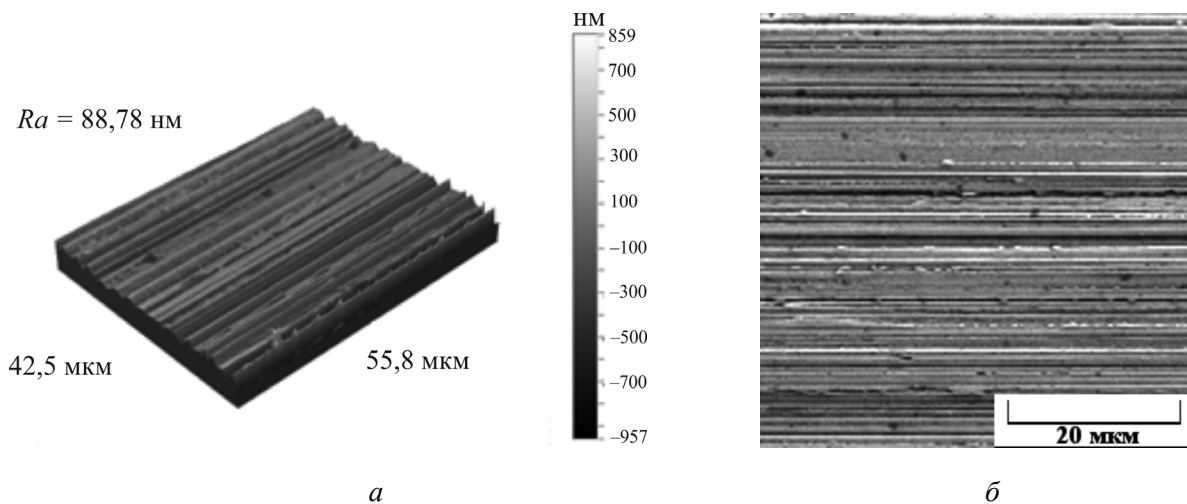


Рис. 2. Трехмерная профилограмма (а) и изображение на электронном сканирующем микроскопе (б) поверхности стали 12X18H10T после фрикционной обработки

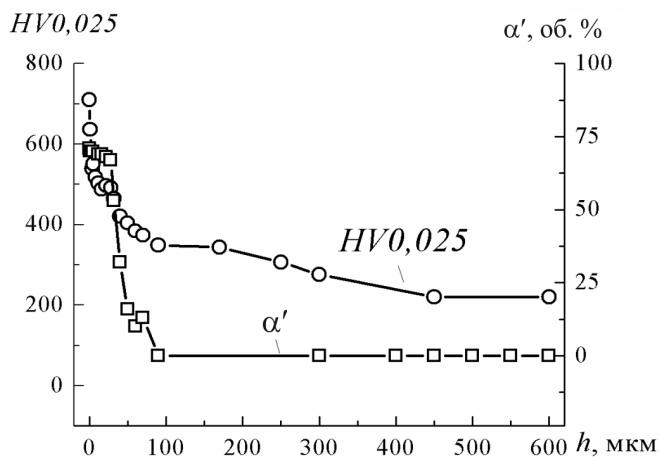


Рис. 3. Изменение микротвердости $HV_{0,025}$ и объемной доли мартенсита деформации α' по глубине h поверхностного слоя стали 12X18H10T после фрикционной обработки

ной стали AISI 304 независимо от количества, сформированного на поверхности мартенсита деформации (95 или 22 % об.) [18], и соответствует упрочнению стали 12X18H9 (~7 ГПа) в условиях адгезионного схватывания (трение в одноименной паре в среде азота) [13].

Столь эффективному деформационному упрочнению аустенитной стали при фрикционной обработке способствовал достаточно высокий коэффициент трения ($f = 0,2$) при использовании индентора из синтетического алмаза и среды аргона. Выглаживание на токарно-фрезерном центре поверхности детали из аустенитной стали AISI 304 индентором из природного алмаза с использованием смазочно-охлаждающей жидкости обеспечило достижение еще более низко-

го нанометрового диапазона параметра шероховатости $Ra = 50$ нм, однако вследствие низкого коэффициента трения ($f < 0,1$) в ходе проведения деформационной обработки микротвердость на упрочненной поверхности не превышала 450 $HV_{0,025}$ [11]. С увеличением коэффициента трения и соответственно сдвиговой деформации возрастает накопленная в поверхностном слое деформация, поскольку именно сдвиговая компонента деформации играет определяющую роль в накоплении пластической деформации при фрикционной обработке [7, 20].

Измерения, выполненные при последовательном электролитическом удалении поверхностного слоя, показали (см. рис. 3), что общая толщина упрочненного фрикционной обработкой слоя составила ~450 мкм, а деформационное $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращение развивается в существенно более тонком (до 90 мкм) приповерхностном слое. Исследование методом просвечивающей электронной микроскопии позволяет рассмотреть трансформацию под действием фрикционной обработки исходной структуры аустенитной матрицы, представляющей собой полиэдрические зерна аустенита с отдельными нерасщепленными дислокациями и дислокационными скоплениями на некоторых границах (рис. 4).

На рис. 5 показано, что в результате фрикционной обработки в тонком (несколько микрометров) поверхностном слое аустенитной стали формируются нанокристаллические и фрагментированные субмикрокристаллические мартенситно-аустенитные структуры.

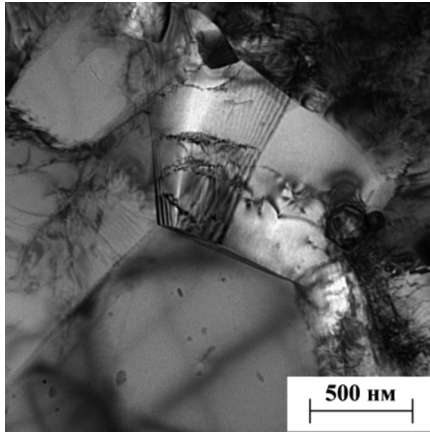


Рис. 4. Структура аустенитной стали 12X18H10T в исходном закаленном состоянии: светлопольное изображение

На представленной на рис. 5, б микродифракции присутствуют рефлексы аустенита $(111)_\gamma$, $(200)_\gamma$ и мартенсита деформации $(220)_\alpha$ в виде почти сплошных и однородных по толщине колец, образованных близко расположенными рефлексами от отдельных кристаллитов γ - и

α -фаз. Это свидетельствует о наличии высокоугловых разориентировок многих ГЦК- и ОЦК-кристаллитов, имеющих размеры менее 100 нм, что следует из анализа темнопольного изображения на рис. 5, в. По указанным признакам рассматриваемые однородные структуры (рис. 5, а) можно отнести к нанокристаллическим, а фрикционную обработку в данных технологических условиях – к наноструктурирующей обработке. Встречаются и менее однородные участки с наличием плотных скоплений дислокаций (рис. 5, г). На соответствующей дифракции видны отдельные точечные и размытые в азимутальном направлении рефлексы α -фазы (рис. 5, д) от фрагментированных кристаллитов мартенсита деформации, имеющих в основном субмикроструктурные (более 100 нм) размеры (рис. 5, е).

Возникновение нано- и субмикроструктур свидетельствует о том, что под действием фрикционной обработки в поверхностном слое аустенитной стали создаются условия для реализации рота-

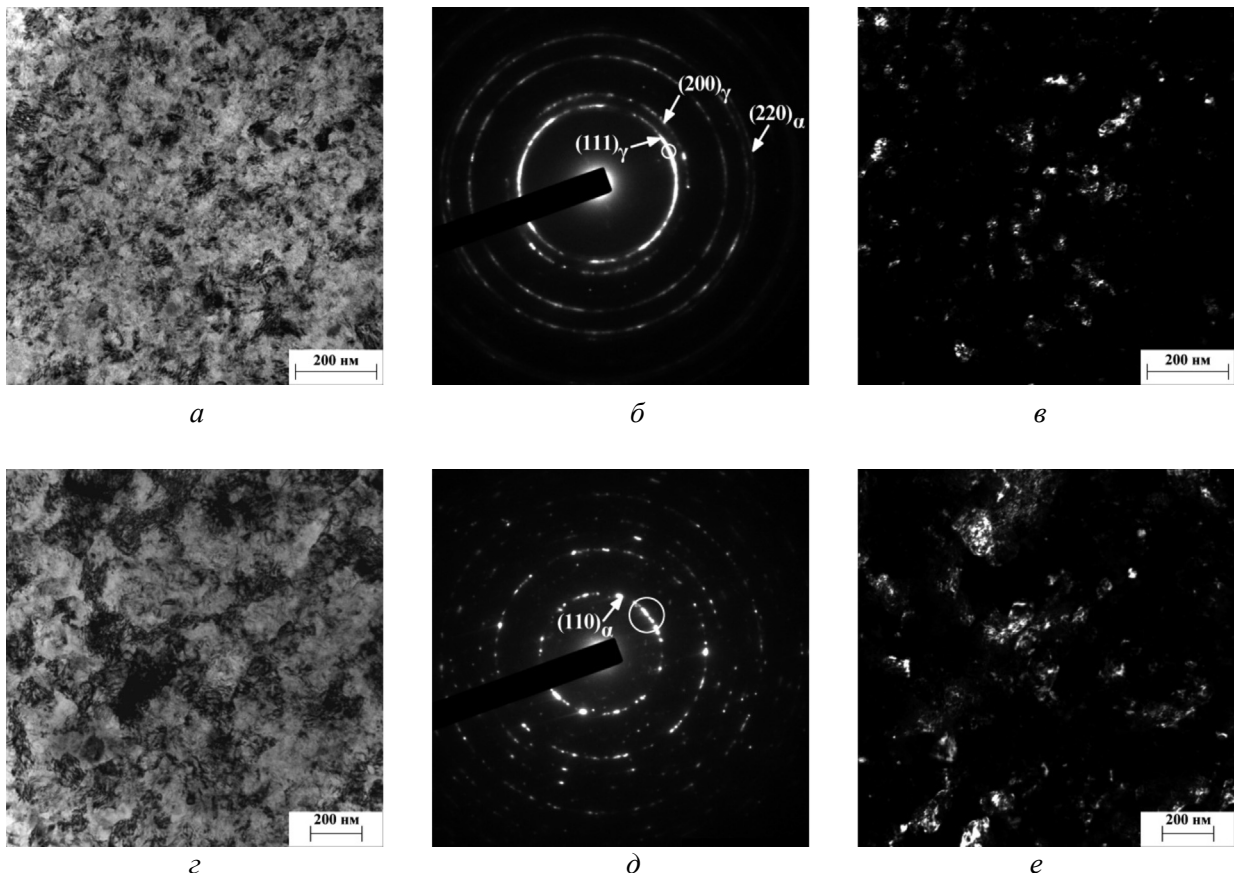


Рис. 5. Структура поверхностного слоя образца из стали 12X18H10T после фрикционной обработки (просвечивающая электронная микроскопия):

а, г – светлопольные изображения; б, д – дифракции; в – темнопольное изображение в рефлексе $(111)_\gamma$; е – темнопольное изображение в рефлексе $(110)_\alpha$

ционного механизма деформации посредством относительных разворотов фрагментов. Это приводит к формированию их большеугловых границ и уменьшению многих кристаллитов до наноразмеров (менее 100 нм).

В табл. 1 приведены данные кинетического микроиндентирования, из которых следует, что наноструктурирующая фрикционная обработка поверхности стали 12X18H10T снижает значения максимальной и остаточной глубины вдавливания индентора h_{\max} и h_p , повышает значения твердости по Мартенсу HM , учитывающей не только пластическую, но и упругую деформацию, и твердости вдавливания при максимальной нагрузке H_{IT} . Возрастает также работа обратной упругой деформации вдавливания W_e , что свидетельствует о повышенной способности наноструктурированного слоя деформироваться лишь в упругой области.

Напротив, общая механическая работа вдавливания W_p , состоящая из работы пластической деформации и работы упругого восстановления, после фрикционной обработки снижается, так как менее пластичный упрочненный поверхностный слой меньше деформируется под индентором. Также наблюдается приблизительное равенство величин контактного модуля упругости E^* у наноструктурированного слоя и крупнокристаллической стали. Модули упругости

металлических материалов одного химического состава являются структурно малочувствительными свойствами.

В табл. 2 приведены рассчитанные по данным микроиндентирования параметры, используемые для оценки способности поверхностных слоев сопротивляться механическому контактно-воздействию. Видно, что в результате наноструктурирующей фрикционной обработки в 2-3 раза возрастают отношение твердости вдавливания к контактному модулю упругости H_{IT}/E^* [21] и упругое восстановление $\%R = ((h_{\max} - h_p)/h_{\max})100\%$ [22, 23] (табл. 2), которые характеризуют упругую деформацию (долю упругой деформации в общей деформации) и соответственно способность стали сопротивляться воздействию без пластического деформирования. Еще более существенно (на порядок) возрастает после фрикционной обработки отношение H^3/E^{*2} (см. табл. 2), которое принято считать характеристикой сопротивления пластической деформации, поскольку указанному отношению пропорционально напряжение течения P_y материала [24]. Следовательно, наноструктурирующая фрикционная обработка существенно повышает способность поверхности стали 12X18H10T выдерживать контактные нагрузки без пластического деформирования и последующего разрушения.

Таблица 1

Результаты микроиндентирования при максимальной нагрузке на индентор 0,245 Н образцов из стали 12X18H10T после различных обработок

Обработка	h_{\max} , мкм	h_p , мкм	HM , ГПа	H_{IT} , ГПа	E^* , ГПа	$W_e \cdot 10^{-3}$, мкДж	$W_p \cdot 10^{-3}$, мкДж
Закалка (электрополировка)	1,97±0,09	1,74±0,08	2,5±0,2	2,9±0,3	199,2±7,1	18,9±1,4	161,4±5,2
Фрикционная обработка	1,21±0,06	0,91±0,13	5,8±0,6	8,0±0,9	196,2±8,2	32,3±1,7	106,1±5,6

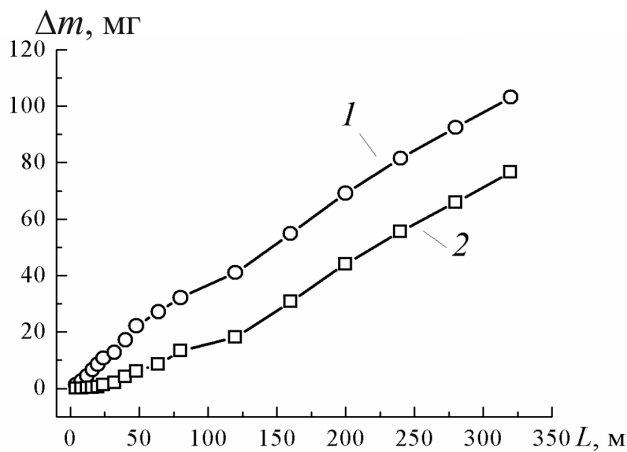
Таблица 2

Зависимости упругого восстановления R_e , отношений H_{IT}/E^* , H_{IT}^3/E^{*2} от вида обработки образцов из стали 12X18H10T

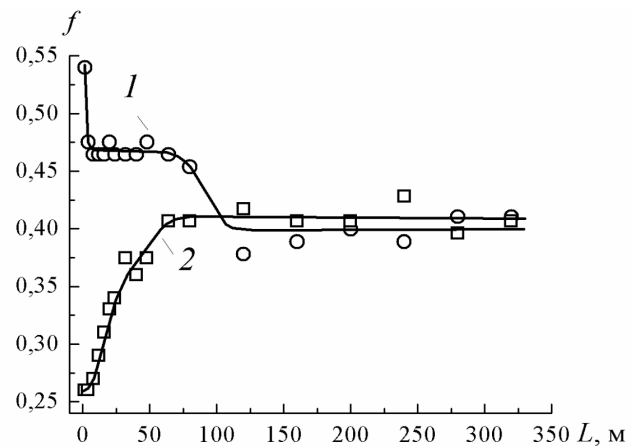
Обработка	R_e , %	H_{IT}/E^*	H_{IT}^3/E^{*2} , ГПа
Закалка (электрополировка)	11,4	0,014	0,001
Фрикционная обработка	24,8	0,041	0,013

При трибологических испытаниях в условиях сухого трения скольжения у закаленной стали с крупнокристаллической структурой аустенита (см. рис. 4) отмечается обычный характер зависимости износа (потерь массы Δm) от продолжительности испытания (пути трения L) (рис. 6, а, кривая 1): на начальном этапе испытания наблюдается период приработки (до $L \sim 120$ м), характеризующийся повышенной скоростью изнашивания и максимальными коэффициентами трения $f = 0,54 \dots 0,45$ (рис. 6, б, кривая 1). На

протяжении периода приработки у образца закаленной стали отмечается тенденция к снижению интенсивности изнашивания, при этом за период приработки изнашивается поверхностный слой толщиной до 320 мкм (рис. 7, кривая 1). На пути трения $L = 120 \dots 320$ м для закаленной стали характерен период установившегося изнашивания с постоянными пониженными по сравнению с начальным периодом приработки уровнями скорости и интенсивности изнашивания, а также коэффициента трения (см. рис. 6 и 7, кривые 1).



а



б

Рис. 6. Изменение потерь массы Δm (а) и коэффициента трения f (б) в зависимости от пути трения L при испытаниях на сухое трение скольжения по пластине из стали 45 образцов из стали 12Х18Н10Т в исходном электрополированном состоянии (1) и после фрикционной обработки (2)

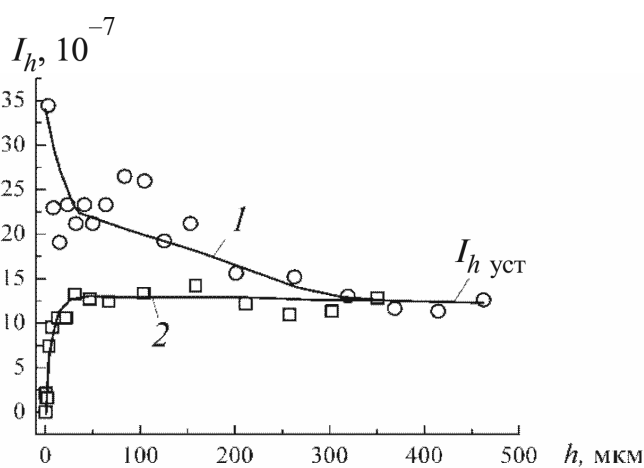


Рис. 7. Изменение интенсивности изнашивания I_h по глубине h поверхностного слоя стали 12Х18Н10Т в исходном электрополированном состоянии (1) и после фрикционной обработки (2); $I_{h \text{ уст}}$ – интенсивность изнашивания в период установившегося изнашивания

В отличие от закаленной недеформированной стали у стали, подвергнутой наноструктурирующей фрикционной обработке, наблюдается аномальный характер зависимости износа и коэффициента трения от пути трения (рис. 6, кривые 2). Во-первых, полностью отсутствует период приработки. Во-вторых, у тонкого (несколько микрон) поверхностного слоя с нано- и субмикроструктурами (см. рис. 5) отмечаются минимальные значения интенсивности изнашивания и коэффициента трения (рис. 6, б и 7, кривые 2). При увеличении пути трения до $L = 60$ м и соответственно при последовательном изнашивании упрочненного поверхностного слоя происходит рост коэффициента трения от минимального значения $f = 0,26$ до значения $f \sim 0,41$, характерного для периода установившегося изнашивания (см. рис. 6, б, кривая 2). Установленное на начальном

этапе трения снижение коэффициента трения после фрикционной обработки обусловлено в первую очередь уменьшением механической (деформационной) составляющей коэффициента трения, связанной с пластическим деформированием поверхностного слоя при контактировании шероховатых поверхностей [25]. Интенсивность изнашивания поверхностно наноструктурированного образца возрастает до уровня $I_{h\text{ уст}}$ при изнашивании градиентного слоя толщиной ~ 35 мкм (см. рис. 7, кривая 2), в котором на рис. 3 отмечалось наиболее резкое снижение микротвердости.

Таким образом, наноструктурирующая фрикционная обработка позволяет эффективно повышать трибологические свойства аустенитной стали на начальном этапе трения, когда у закаленной стали протекает период приработки, характеризующийся наибольшими скоростями износа и коэффициентами трения. Фрикционная обработка обеспечивает также ускоренный (по сравнению с закалкой) переход к установившемуся изнашиванию (см. рис. 6, 7). В период установившегося изнашивания на пути трения $L = 120 \dots 320$ м подвергнутая фрикционной обработке сталь и исходная закаленная сталь характеризуются практически одинаковым темпом прироста весового износа Δm , о чем свидетельствует одинаковый наклон кривых 1 и 2 на рис. 6, а, а также близкими уровнями коэффи-

циента трения ($f = 0,37 \dots 0,43$, см. рис. 6, б). Согласно рис. 7, в указанный период изнашивания сталь после закалки (кривая 1) и дополнительной фрикционной обработки (кривая 2) характеризуется одинаковым постоянным уровнем интенсивности изнашивания $I_{h\text{ уст}}$.

Исследование поверхностей изнашивания показало, что на поверхности закаленной стали после испытаний на сухое трение скольжения интенсивно развиваются процессы схватывания (рис. 8, а), которые характеризуются высокой скоростью разрушения, главным образом вследствие образования и разрыва узлов металлических связей [25]. Упрочняющая фрикционная обработка эффективно ограничивает процессы схватывания, обеспечивая переход к пластическому отеснению (рис. 8, б) и соответствующее резкое снижение величин износа (см. рис. 6, а) и интенсивности изнашивания (см. рис. 7, кривая 2) стали.

Важно отметить, что обусловленному фрикционной обработкой ограничению процессов схватывания при сухом трении скольжения способствует установленное с использованием метода микроиндентирования повышенное сопротивление упрочненного наноструктурированного слоя аустенитной стали пластическому деформированию под действием контактного механического воздействия (см. табл. 1, 2). Повышенная способность наноструктурированных

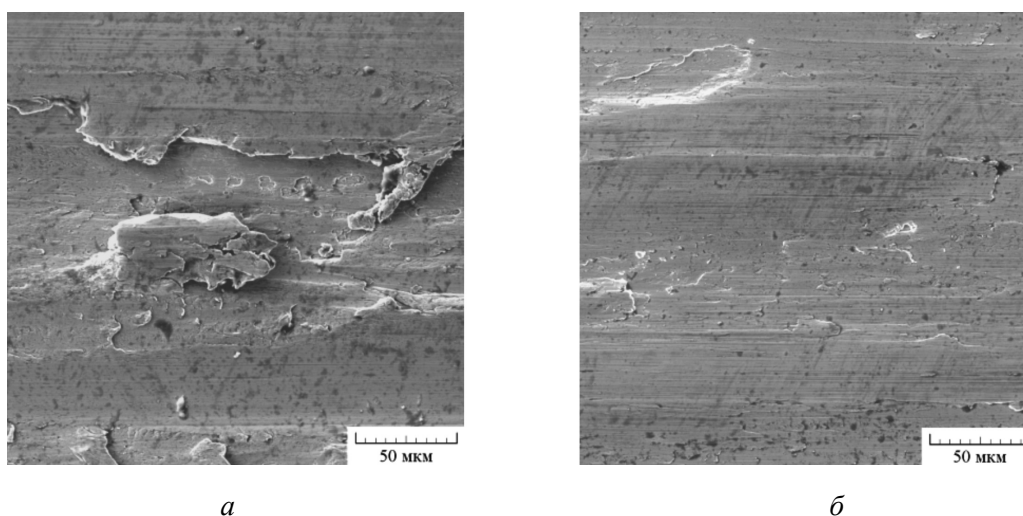


Рис. 8. Поверхности изнашивания образцов из стали 12X18H10T в исходном состоянии (а) и после фрикционной обработки (б), испытанных на трение скольжения без смазки по пластине из стали 45 на пути трения $L = 40$ м (после изнашивания слоя толщиной ~ 90 мкм, т. е. в период приработки, см. рис. 7, кривая 1) (а) и $L = 20$ м (после изнашивания поверхностного слоя толщиной ~ 5 мкм) (б)

фрикционной обработкой поверхностных слоев деформироваться преимущественно в упругой области (без остаточного формоизменения) обуславливает смену основного механизма изнашивания от адгезионного схватывания к пластическому оттеснению (см. рис. 8). Тем самым обеспечивается соответствующее снижение интенсивности изнашивания стали 12X18H10T на начальном этапе трения.

Вывод

Фрикционная обработка полусферическим индентором из синтетического алмаза в безокислительной среде аргона метастабильной аустенитной стали 12X18H10T обеспечивает интенсивное деформационное упрочнение (710 HV0,025) при общей глубине упрочненного слоя ~450 мкм и высокое качество обрабатываемой поверхности ($Ra \approx 100$ нм) при отсутствии схватывания. Установлено формирование в поверхностном слое аустенитной стали при фрикционной обработке нанокристаллических и фрагментированных субмикроструктурных мартенситно-аустенитных структур, содержащих ~70 об. % α' -мартенсита деформации.

В условиях сухого трения скольжения у аустенитной стали, наноструктурированной фрикционной обработкой, обнаружен аномальный характер зависимости износа и коэффициента трения от пути трения: отсутствие характерного для закаленной стали периода приработки с наибольшими уровнями износа и коэффициента трения; наличие у наноструктурированного слоя минимальных величин интенсивности изнашивания и коэффициента трения с последующим ростом значений указанных трибологических характеристик по мере изнашивания деформационно упрочненного слоя. Резкое повышение фрикционной обработкой сопротивления адгезионному изнашиванию на начальном этапе трения обусловлено ограничением развития на наноструктурированной поверхности стали процессов схватывания и переходом к изнашиванию по механизму пластического оттеснения.

По данным микроиндентирования установлено повышенная способность наноструктурированного слоя стали 12X18H10T деформироваться под действием контактного механического воздействия преимущественно в упругой об-

ласти без пластического деформирования, что приводит к ограничению процесса схватывания и смене основного механизма изнашивания метастабильной аустенитной стали в условиях сухого трения скольжения.

Список литературы

1. Sun Y. Sliding wear behavior of surface mechanical attrition treated AISI 304 stainless steel // *Tribology International*. – 2013. – Vol. 57. – P. 67–75. – doi:10.1016/j.triboint.2012.07.015.
2. Influence of peening on corrosion properties of AISI 304 stainless steel / H. Lee, D. Kim, J. Jung, Y. Pyoun, K. Shin // *Corrosion science*. – 2009. – Vol. 51, iss. 12. – P. 2826–2830.
3. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I. Ultrasonic impact peening for the surface properties' management // *Journal of Sound and Vibration*. – 2007. – Vol. 308, iss. 3–5. – P. 855–866. – doi: 10.1016/j.jsv.2007.03.054.
4. Бараз В.Р., Картак Б.Р., Минеева О.Н. Особенности фрикционного упрочнения аустенитной стали с нестабильной γ -фазой // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2010. – № 10. – С. 20–22.
5. Improvement in cavitation erosion resistance of AISI 316L stainless steel by friction stir processing / M. Hajian, A. Abdollah-zadeh, S.S. Rezaei-Nejad, H. Assadi, S.M.M. Hadavi, K. Chung, M. Shokouhimehr // *Applied Surface Science*. – 2014. – Vol. 308. – P. 184–192. – doi: 10.1016/j.apsusc.2014.04.132.
6. Влияние упрочняющей фрикционной обработки на химический состав, структуру и трибологические свойства высокоуглеродистой стали / А.В. Макаров, Л.Г. Коршунов, В.Б. Выходец, Т.Е. Куренных, Р.А. Саврай // *Физика металлов и металловедение*. – 2010. – Т. 110, № 5. – С. 530–544.
7. Effect of hardening friction treatment with hard-alloy indenter on microstructure, mechanical properties, and deformation and fracture features of constructional steel under static and cyclic tension / A.V. Makarov, R.A. Savrai, N.A. Pozdejeva, S.V. Smirnov, D.I. Vichuzhanin, L.G. Korshunov, I.Yu. Malygina // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205, iss. 3. – P. 841–852. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.025.
8. Повышение износостойкости закаленной конструкционной стали наноструктурирующей фрикционной обработкой / А.В. Макаров, Н.А. Поздеева, Р.А. Саврай, А.С. Юровских, И.Ю. Малыгина // *Трение и износ*. – 2012. – Т. 33, № 6. – С. 444–455.
9. Соболева Н.Н., Макаров А.В., Малыгина И.Ю. Упрочняющая фрикционная обработка NiCrBSi лазерного покрытия // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2013. – № 4 (61). – С. 79–85.

10. Структура, механические характеристики, особенности деформирования и разрушения при статическом и циклическом нагружении закаленной конструкционной стали, подвергнутой комбинированной деформационно-термической наноструктурирующей обработке / А.В. Макаров, Р.А. Саврай, Э.С. Горкунов, А.С. Юровских, И.Ю. Малыгина, Н.А. Давыдова // Физическая мезомеханика. – 2014. – Т. 17, № 1. – С. 5–20.

11. Упрочнение и повышение качества поверхности деталей из аустенитной нержавеющей стали алмазным выглаживанием на токарно-фрезерном центре / В.П. Кузнецов, А.В. Макаров, А.Л. Осинцева, А.С. Юровских, Р.А. Саврай, С.А. Роговая, А.Е. Киряков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 11. – С. 16–26.

12. Трибологические аспекты наноструктурирующего выглаживания конструкционных сталей / В.П. Кузнецов, А.В. Макаров, С.Г. Псахье, Р.А. Саврай, И.Ю. Малыгина, Н.А. Давыдова // Физическая мезомеханика. – 2014. – Т. 17, № 3. – С. 14–30.

13. Структурные превращения, упрочнение и износостойкость никелида титана при адгезионном и абразивном изнашивании / Л.Г. Коршунов, В.Г. Пущин, Н.Л. Черненко, В.В. Макаров // Физика металлов и материаловедение. – 2010. – Т. 110, № 1. – С. 94–105.

14. Evolution of friction-induced microstructure of SUS 304 metastable austenitic stainless steel and its influence on wear behavior / X. Wei, M. Hua, Z. Xue, Z. Gao, J. Li // Wear. – 2009. – Vol. 267, iss. 9/10. – P. 1386–1392. – doi:10.1016/j.wear.2008.12.068.

15. Wang X.Y., Li D.Y. Mechanical, electrochemical and tribological properties of nanocrystalline surface of 304 stainless steel // Wear. – 2003. – Vol. 255, iss. 7–12. – P. 836–845. – doi: 10.1016/S0043-1648(03)00055-3.

16. Hashemi B., Rezaee Yazdi M., Azar V. The wear and corrosion resistance of shot peened–nitrided 316L austenitic stainless steel // Materials and Design. – 2011. – Vol. 32, iss. 6. – P. 3287–3292. – doi: 10.1016/j.matdes.2011.02.037

17. Коршунов Л.Г. Структурные превращения при трении и износостойкость аустенитных сталей //

Физика металлов и материаловедение. – 1992. – № 8. – С. 3–21.

18. The influence of strain rate on the microstructure transition of 304 stainless steel / A.Y. Chen, H.H. Ruan, J. Wang, H.L. Chan, Q. Wang, Q. Li, J. Lu // Acta Materialia. – 2011. – Vol. 59, iss. 9. – P. 3697–3709. – doi: 10.1016/j.actamat.2011.03.005.

19. Wang W., Hua M., Wei X. Friction behavior of SUS 304 metastable austenitic stainless steel sheet against DC 53 die under the condition of friction coupling plastic deformation // Wear. – 2011. – Vol. 271, iss. 7/8. – P. 1166–1173. – doi: 10.1016/j.wear.2011.05.023.

20. Напряженно-деформированное состояние и поврежденность при фрикционной упрочняющей обработке плоской стальной поверхности скользящим цилиндрическим индентором / Д.И. Вичужанин, А.В. Макаров, С.В. Смирнов, Н.А. Поздеева, И.Ю. Малыгина // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2011. – № 6. – С. 61–69.

21. Cheng Y.T., Cheng C.M. Relationships between hardness, elastic modulus and the work of indentation // Applied Physics Letters. – 1998. – Vol. 73, N 5. – P. 614–618. – doi: http://dx.doi.org/10.1063/1.121873.

22. Page T.F., Hainsworth S.V. Using nanoindentation techniques for the characterization of coated systems: a critique // Surface and Coatings Technology. – 1993. – Vol. 61, iss. 1–3. – P. 201–208. – doi: 10.1016/0257-8972(93)90226-E.

23. Petrzhik M.I., Levashov E.A. Modern methods for investigating functional surfaces of advanced materials by mechanical contact testing // Crystallography Reports. – 2007. – Vol. 52, iss. 6. – P. 966–974. – doi: 10.1134/S1063774507060065.

24. Mayrhofer P.H., Mitterer C., Musil J. Structure-property relationships in single- and dual-phase nanocrystalline hard coatings // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 174/175. – P. 725–731. – doi: 10.1016/S0257-8972(03)00576-0.

25. Tribology – lubrication, friction, and wear / ed. by I.V. Kragelsky, V.V. Alisin. – London: London, Wiley & Sons, 2001. – 948 p. – ISBN 978-1-86058-288-2.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(69), October – December 2015, Pages 80–92

Improving the tribological properties of austenitic 12Kh18N10T steel by nanostructuring frictional treatment

Makarov A.V.^{1,2,3}, D.Sc. (Engineering), Senior Researcher, Head of materials science department, Head of mechanical properties laboratory, e-mail: avm@imp.uran.ru, av-mak@yandex.ru
Skorynina P.A.², Ph.D. student, e-mail: skorynina@imach.uran.ru
Osintseva A.L.², Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, e-mail: osintseva@imach.uran.ru
Yurovskikh A.S.³, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: a.s.yurovskikh@urfu.ru
Savrai R.A.², Ph.D. (Engineering), Head of laboratory, e-mail: ras@imach.uran.ru

¹ M.N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 18 S. Kovalevskoy st., Yekaterinburg, 620990, Russian Federation

² Institute of Engineering Science Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya str., Yekaterinburg, 630049, Russian Federation

³ Ural Federal University, 19 Mira st., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation

Abstract

Stainless austenitic chrome-nickel steels possess low strength properties, which are not improved by heat treatment. Surface hardening treatments through deformation (ultrasonic impact, shot peening etc.) often cannot provide high quality of the worked surface. Therefore, the primary task is to form and improve the methods of finishing treatments providing both effective deformation hardening and high quality surface of austenitic steels. It has great importance for precision parts of tribological components.

The influence of frictional treatment by hemispheric synthetic diamond indenter on phase composition, structure, micromechanical and tribological characteristics of metastable austenitic 12Kh18N10T steel (in wt.%: 0,10 C; 17,72 Cr; 10,04 Ni; 0,63 Ti; 1,33 Mn; 0,57 Si; 0,227 Mo; 0,064 Co; 0,014 Nb; 0,057 Cu; 0,031 P; 0,014 S and Fe for balance) surface layers is studied. Roughness of the worked surface is studied through an optical profilometer. Methods of transmission electron microscopy and X-ray analysis are applied for investigation of steel structure and phase composition. Micromechanical properties are determined by measuring of microhardness by the recovered indentation method and using microindentation technique. Tribological properties (wear intensity and coefficient of friction) are determined upon sliding friction in the air conditions in the «steel 12Kh18N10T – steel 45 (0,45 wt. % of C; hardness is 50 HRC)» friction couple.

It is established that frictional treatment of austenitic steel forms qualitative surface with low value of roughness parameter ($R_a \approx 100$ nm). At that, nanocrystalline and fragmented submicrocrystalline martensitic-austenitic structures in surface layer are arisen, high level of surface hardening (710 HV0.025) as well as essential decrease of wear rate and friction coefficient under conditions of dry sliding friction is achieved. The revealed leap of tribological properties of the austenitic steel at the initial stage of friction is connected with a limitation of seizure processes development on the nanostructured surface and a change of wear mode – from seizure to plastic edging. The use of kinetic microindentation method for analysis of increased resistance of nanostructured layer with martensitic-austenitic structure to plastic deformation under adhesive wear is justified.

Keywords:

austenitic stainless steel, frictional treatment, nanocrystalline structure, strain-induced martensite, microindentation, sliding friction, tribological properties.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-80-92

References

1. Sun Y. Sliding wear behavior of surface mechanical attrition treated AISI 304 stainless steel. *Tribology International*, 2013, vol. 57, pp. 67–75. doi:10.1016/j.triboint.2012.07.015

2. Lee H., Kim D., Jung J., Pyoun Y., Shin K. Influence of peening on the corrosion properties of AISI 304 stainless steel. *Corrosion science*, 2009, vol. 51, iss. 12, pp. 2826–2830.
3. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I. Ultrasonic impact peening for the surface properties' management. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, vol. 308, iss. 3–5, pp. 855–866. doi: 10.1016/j.jsv.2007.03.054
4. Baraz V.R., Kartak B.P., Mineeva O.N. Osobennosti friktsionnogo uprochneniya austenitnoi stali s nestabil'noi γ -fazoi [Special features of friction hardening of austenitic steel with unstable γ -phase]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 2010, no. 10, pp. 20–22. (In Russian)
5. Hajian M., Abdollah-zadeh A., Rezaei-Nejad S.S., Assadi H., Hadavi S.M.M., Chung K., Shokouhimehr M. Improvement in cavitation erosion resistance of AISI 316L stainless steel by friction stir processing. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 308, pp. 184–192. doi: 10.1016/j.apsusc.2014.04.132
6. Makarov A.V., Korshunov L.G., Vykhodets V.B., Kurennykh T.E., Savrai R.A. Vliyanie uprochnyayushchei friktsionnoi obrabotki na khimicheskii sostav, strukturu i tribologicheskie svoistva vysokouglerodistoi stali [Effect of strengthening friction treatment on the chemical composition, structure, and tribological properties of a high-carbon steel]. *Fizika metallov i metallovedenie – The Physics of Metals and Metallography*, 2010, vol. 110, no. 5, pp. 530–544. (In Russian)
7. Makarov A.V., Savrai R.A., Pozdejeva N.A., Smirnov S.V., Vichuzhanin D.I., Korshunov L.G., Malygina I.Yu. Effect of hardening friction treatment with hard-alloy indenter on microstructure, mechanical properties, and deformation and fracture features of constructional steel under static and cyclic tension. *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 205, iss. 3, pp. 841–852. doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.025
8. Makarov A.V., Pozdeeva N.A., Savrai R.A., Yurovskikh A.S., Malygina I.Yu. Povyschenie iznosostoikosti zakalenoj konstruktsionnoi stali nanostrukturiruyushchei friktsionnoi obrabotkoi [Improvement of wear resistance of quenched structural steel by nanostructuring frictional treatment]. *Trenie i iznos – Journal of Friction and Wear*, 2012, vol. 33, no. 6, pp. 444–455. (In Russian)
9. Soboleva N.N., Makarov A.V., Malygina I.Yu. Uprochnyayushchaya friktsionnaya obrabotka NiCrBSi lazer-nogo pokrytiya [Hardening frictional treatment of NiCrBSi laser clad coating]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 4 (61), pp. 79–85.
10. Makarov A.V., Savrai R.A., Gorkunov E.S., Yurovskikh A.S., Malygina I.Yu., Davydova N.A. Struktura, mekhanicheskie kharakteristiki, osobennosti deformirovaniya i razrusheniya pri staticheskom i tsiklicheskom nagruzhении zakalenoj konstruktsionnoi stali, podvergnutoi kombinirovannoi deformatsionno-termicheskoi nanostrukturiruyushchei obrabotke [Structure, mechanical characteristics, and deformation and fracture features of quenched structural steel under static and cyclic loading after combined strain-heat nanostructuring treatment]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 5–20. (In Russian)
11. Kuznetsov V.P., Makarov A.V., Osintseva A.L., Yurovskikh A.S., Savrai R.A., Rogovaya S.A., Kiryakov A.E. Uprochnenie i povyschenie kachestva poverkhnosti detalei iz austenitnoi nerzhavayushchei stali almaznym vyglazhivaniem na tokarno-frezernom tsentre [The increase of strength and surface quality of austenitic stainless steel parts by diamond burnishing on the turning-milling center]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya – Strengthening technologies and coatings*, 2011, no. 11, pp. 16–26.
12. Kuznetsov V.P., Makarov A.V., Psakh'e S.G., Savrai R.A., Malygina I.Yu., Davydova N.A. Tribologicheskie aspekty nanostrukturiruyushchego vyglazhivaniya konstruktsionnykh staley [Tribological aspects in nanostructuring burnishing of structural steels]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2014, vol. 17, no. 3, pp. 14–30. (In Russian)
13. Korshunov L.G., Pushin V.G., Chernenko N.L., Makarov V.V. Strukturnye prevrashcheniya, uprochnenie i iznosostoikost' nikelida titana pri adgezionnom i abrazivnom iznashivanii [Structural transformations, strengthening, and wear resistance of titanium nickelide upon abrasive and adhesive wear]. *Fizika metallov i metallovedenie – The Physics of Metals and Metallography*, 2010, vol. 110, no. 1, pp. 94–105. (In Russian)
14. Wei X., Hua M., Xue Z., Gao Z., Li J. Evolution of friction-induced microstructure of SUS 304 metastable austenitic stainless steel and its influence on wear behavior. *Wear*, 2009, vol. 267, iss. 9–10, pp. 1386–1392. doi:10.1016/j.wear.2008.12.068
15. Wang X.Y., Li D.Y. Mechanical, electrochemical and tribological properties of nanocrystalline surface of 304 stainless steel. *Wear*, 2003, vol. 255, iss. 7–12, pp. 836–845. doi: 10.1016/S0043-1648(03)00055-3
16. Hashemi B., Rezaee Yazdi M., Azar V. The wear and corrosion resistance of shot peened–nitrided 316L austenitic stainless steel. *Materials & Design*, 2011, vol. 32, iss. 6, pp. 3287–3292. doi: 10.1016/j.matdes.2011.02.037
17. Korshunov L.G. Strukturnye prevrashcheniya pri trenii i iznosostoikost' austenitnykh staley [Structural transformations in friction and wear resistance of austenitic steels]. *Fizika metallov i metallovedenie – The Physics of Metals and Metallography*, 1992, no. 8, pp. 3–21. (In Russian)

18. Chen A.Y., Ruan H.H., Wang J., Chan H.L., Wang Q., Li Q., Lu J. The influence of strain rate on the microstructure transition of 304 stainless steel. *Acta Materialia*, 2011, vol. 59, iss. 9, pp. 3697–3709. doi: 10.1016/j.actamat.2011.03.005
19. Wang W., Hua M., Wei X. Friction behavior of SUS 304 metastable austenitic stainless steel sheet against DC 53 die under the condition of friction coupling plastic deformation. *Wear*, 2011, vol. 271, iss. 7–8, pp. 1166–1173. doi: 10.1016/j.wear.2011.05.023
20. Vichuzhanin D.I., Makarov A.V., Smirnov S.V., Pozdeeva N.A., Malygina I.Yu. Napryazhenno-deformirovanoe sostoyanie i povrezhdennost' pri friktsionnoi uprochnyayushchei obrabotke ploskoi stal'noi poverkhnosti skol'zyashchim tsilindricheskim indentorom [Stress and strain and damage during frictional strengthening treatment of flat steel surface with a sliding cylindrical indenter]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin – Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2011, no. 6, pp. 61–69. (In Russian)
21. Cheng Y.T., Cheng C.M. Relationships between hardness, elastic modulus and the work of indentation. *Applied Physics Letters*, 1998, vol.73, no. 5, pp. 614–618. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.121873>
22. Page T.F., Hainsworth S.V. Using nanoindentation techniques for the characterization of coated systems: a critique. *Surface and Coatings Technology*, 1993, vol. 61, iss. 1–3, pp. 201–208. doi: 10.1016/0257-8972(93)90226-E
23. Petrzhik M.I., Levashov E.A. Modern methods for investigating functional surfaces of advanced materials by mechanical contact testing. *Crystallography Reports*, 2007, vol. 52, iss. 6, pp. 966–974. doi: 10.1134/S1063774507060065
24. Mayrhofer P.H., Mitterer C., Musil J. Structure–property relationships in single- and dual-phase nanocrystalline hard coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2003, vol. 174–175, pp. 725–731. doi: 10.1016/S0257-8972(03)00576-0
25. Kragelsky I.V., Alisin V.V., eds. *Tribology – Lubrication, Friction, and Wear*. London, Wiley & Sons, 2001. 948 p. ISBN 978-1-86058-288-2

Funding

This work on “Structure” N 01201463331 (Project N 15-9-12-45) is supported by RFBR (project N 15-08-07947). Micromechanical and tribological tests, scanning electron microscopy and profilometry are made in CCU “Plastometry” IMASH UB RAS. Transmission electron microscopy is implemented using the equipment of the Laboratory of structural analysis techniques of materials and nanomaterials CCU UrFU.

Article history:

Received 30 September 2015

Revised 30 October 2015

Accepted 10 November 2015

УДК 539.122.04

ВЛИЯНИЕ γ -ОБЛУЧЕНИЯ В МАЛЫХ ДОЗАХ НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОЙ СМЕСИ ПОРОШКА СОСТАВА Ti+Al

*М.В. ЛОГИНОВА¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотруд.
В.И. ЯКОВЛЕВ¹, канд. техн. наук, доцент
А.А. СИТНИКОВ¹, доктор техн. наук, профессор
С.Г. ИВАНОВ¹, канд. техн. наук, зав. лаб.,
А.В. СОБАЧКИН¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотруд.
А.З. НЕГОДЯЕВ¹, аспирант
А.В. ГРАДОБОЕВ², доктор техн. наук, профессор
(¹АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул,
²ТПУ, г. Томск)*

Поступила 8 июля 2015

Рецензирование 17 августа 2015

Принята к печати 20 октября 2015

Логинова М.В. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: anicpt@rambler.ru

Проведено экспериментальное исследование структурного состояния компонентов при воздействии γ -облучения на порошковую смесь состава Ti+Al и смесь того же состава после предварительной механоактивационной обработки. Воздействие γ -облучения осуществлялось в малых дозах. Для исследования параметров тонкой структуры использовался метод рентгеновской дифрактометрии. Установлена зависимость структурных параметров и тонкой структуры (размеры областей когерентного рассеяния, микродеформации) после воздействия γ -облучения от предварительной механообработки порошковой смеси. Экспериментально выявлено, что влияние γ -облучения на структурное состояние компонентов механоактивированной смеси различно. Установлено, что предварительная механоактивационная обработка порошковой смеси Ti+Al является стимулятором для радиационно-индуцированного состояния компонентов даже при малых дозах γ -облучения.

Ключевые слова: порошковая смесь, алюминий, титан, механоактивация, γ -облучение, рентгеновская дифрактометрия, структурные параметры, кристаллическая решетка, зерно, микронапряжения.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-93-101

Введение

Одним из способов изменения физико-механических и химических свойств в материалах является формирование в них наноструктурных состояний. Добиться этого можно путем механического измельчения порошковых материалов – методом механоактивационной обработки в планетарной шаровой мельнице, при воздействии которой достигается предельная степень

измельчения размеров зерна, увеличивается напряженное состояние кристаллической решетки, возникает неравновесное состояние [1–5]. В последнее время для изменения структурных характеристик и свойств материалов все чаще используют новые методы внешнего воздействия, одним из которых является γ -облучение материалов. Интенсивные потоки радиации применяются как при решении задач, связанных с разработкой новых поколений качественных материалов,

так и при исследовании фундаментальных проблем физики твердого тела [6, 7]. Выявлено, что после радиационного воздействия на материалы формируется особое состояние вещества, происходят существенные изменения структуры и свойств, вещество насыщается дефектами, уменьшаются размеры кристаллитов, меняются параметры решетки, также могут происходить радиационно-инициированные фазовые превращения [8–10]. Кроме того, как следствие γ -облучения происходит изменение физико-механических свойств облученных материалов. Экспериментально установлено, что в зависимости от условий облучения в структуре вещества могут происходить процессы, приводящие ее в неравновесное разупорядоченное состояние, либо под действием термодинамических сил и радиационно-стимулированной диффузии структура может принять упорядоченное состояние.

Из проведенного обзора публикаций выявлено, что большая часть научных исследований в этой области касается влияния радиационного излучения на полупроводниковые приборы и микросхемы, так как во многих ситуациях эти излучения воздействуют на системы управления и радиоэлектронную аппаратуру, основой которых служат изделия полупроводниковой электроники. Однако в последнее время все большее внимание начали уделять исследованию влияния радиационного излучения на фазовое состояние и структурные параметры при воздействии на металлические материалы (в частности, на системы Fe-Cr-Ni, Ni-Cr, Cu-Ni, Fe-Cr, V-Cr-Ti и др.) [11–14].

В настоящей работе в качестве объекта исследования выбрана порошковая смесь Ti+Al [15–16], поскольку в последнее время алюминиды титана и сплавы на их основе находят широкое применение для конструкций и деталей, работающих в экстремальных условиях, в том числе в атомной, авиационной, энергетической областях [17–18]. Это стимулирует исследование явлений, возникающих при взаимодействии материалов данной системы с радиационным излучением. Особый интерес представляет применение перед γ -облучением предварительной механоактивационной обработки порошковой смеси, за счет которой система уже переходит в неравновесное состояние с избыточной энергией. Это направ-

ление исследований является еще малоизученным. Таким образом, для понимания процессов и причин формирования радиационно-индуцированных структурных состояний в механоактивированной порошковой смеси Ti+Al нужны такие исследования, которые могут послужить основой для новой технологии модифицирования перспективных материалов.

Исходя из изложенного целью настоящей работы является исследование влияния воздействия малых доз γ -излучения на изменение структурных параметров порошковой смеси Ti+Al при предварительном воздействии на нее механоактивационной обработки.

Методика экспериментального исследования

В качестве объектов исследований использовались порошки титана ПТХ со средним размером частиц 50 ± 10 мкм и порошки алюминия АСД-1 со средним размером 12 мкм. Для экспериментального образца первой серии применялась механическая смесь порошков в соотношении: Al 50 мас. % + Ti 50 мас. %.

Для получения образца второй серии исходная порошковая смесь подвергалась механической активации в планетарной шаровой мельнице АГО-2 в течение 7 мин. Центробежное ускорение цилиндров 40 g.

Готовились цилиндрические образцы путем прессования порошковых смесей на стандартном оборудовании для проведения исследований порошковых материалов. Нагрузка на лабораторном прессе составляла 40 кН.

На следующем этапе проводилось облучение экспериментальных образцов γ -лучами от источника излучения на установке γ -излучения. Доза облучения составляла 2×10^5 рад., время облучения 30 мин.

Структурно-фазовый анализ образцов до и после γ -облучения осуществлялся на дифрактометре рентгеновском общего назначения ДРОН-6, на медном излучении $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5418$ А). Дифрактограммы всех образцов регистрировались в идентичных условиях, что позволило более корректно сравнивать полученные величины. Шаг сканирования $h = 0,05^\circ$, время экспозиции $t = 3$ с. Обработку и анализ экспериментальных данных осуществляли

с помощью пакета программ PDWin. Для расчета структурных параметров использовалась программа Size&Strain пакета PDWin с поправками на приборное уширение. Исследование микроструктуры образцов осуществлялось на исследовательском оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer Z1m. Измерения микротвердости проводили с использованием цифрового микротвердомера МН-6, осуществляющего измерение микротвердости по Виккерсу.

Результаты эксперимента и обсуждение

На рис. 1 представлены дифрактограммы порошковой смеси состава Ti 50 мас. % + Al 50 мас. % и смеси того же состава после γ -облучения.

Из сравнительного анализа дифрактограмм для простой смеси порошков следует, что ха-

рактер расположения дифракционных максимумов Ti (ГПУ-решетка) и Al (ОЦК-решетка) и их форма (ширина линий) до и после γ -облучения не меняются. Следовательно, размеры блоков когерентного рассеивания в пределах ошибки определения остаются неизменными (табл. 1). Увеличение максимальной интенсивности облученного образца ($I_{\max \text{ обл.}} = 226,7$ усл. ед.) относительно необлученного ($I_{\max \text{ исх.}} = 163$ усл. ед.) свидетельствует о высокой кристалличности полученной структуры.

В табл. 1 представлены структурные параметры обоих компонентов в порошковой смеси до и после γ -облучения.

На рис. 2 представлены дифрактограммы механоактивированной в течение 7 мин порошковой смеси состава Ti 50 мас. % + Al 50 мас. % и механоактивированной смеси того же состава после γ -облучения образцов.

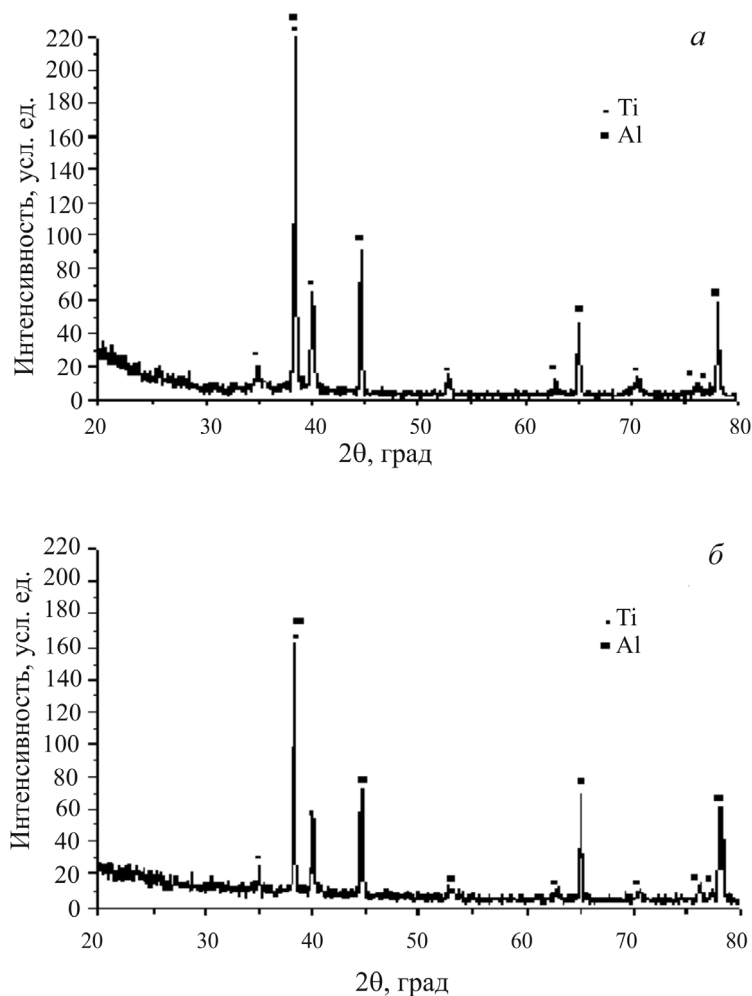


Рис. 1. Дифрактограммы порошковой смеси состава Ti 50 мас. % + Al 50 мас. %:

a – до γ -облучения; *б* – после γ -облучения

Структурные параметры и объем кристаллических решеток Ti и Al в порошковой смеси до и после γ -облучения

Параметры ячейки	Ti		Al		Эталон Ti*	Эталон Al*
	до γ -облучения	после γ -облучения	до γ -облучения	после γ -облучения	Sys: Hexagonal	Sys: Cubic
a , (Å)	2,954738	2,954447	4,054839	4,054643	2,92	4,0406
b , (Å)	2,954738	2,954447	4,054839	4,054643	2,92	4,0406
c , (Å)	4,693880	4,694138	4,054839	4,054643	4,67	4,0406
V , (Å ³)	35,490	35,485	66,669	66,659	34,48	66,49

*Anal. Chem., Hanawaltetal., 10, 475, 1938 (База данных порошковой дифрактометрии PDWin 3).

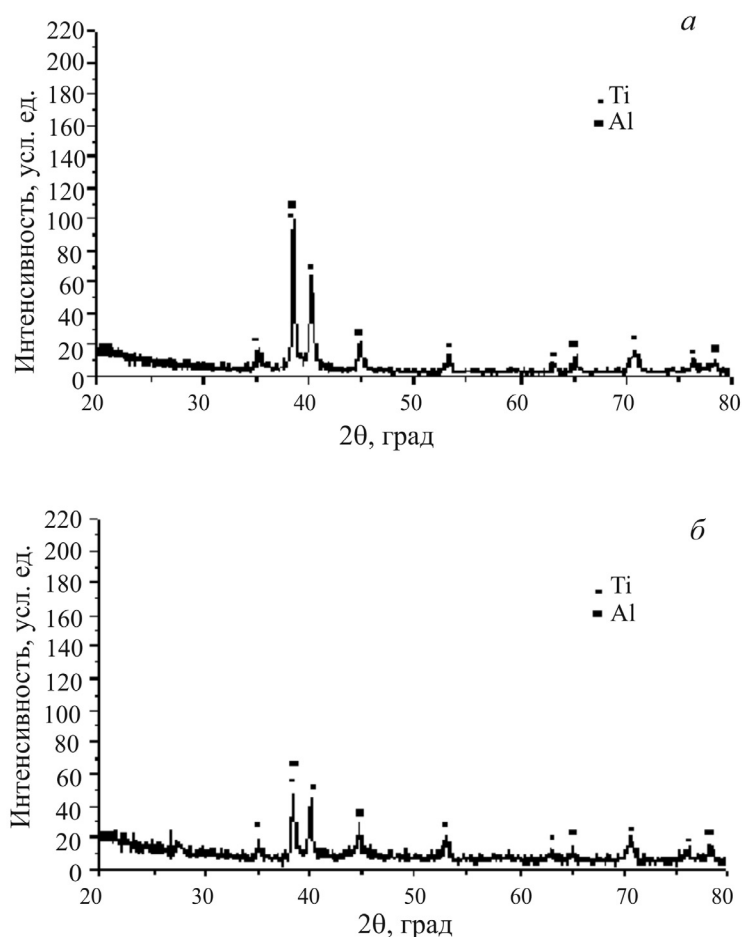


Рис. 2. Дифрактограммы механоактивированной 7 мин порошковой смеси состава Ti 50 мас. % + Al 50 мас. %:

a – до γ -облучения; *б* – после γ -облучения

На дифрактограмме механоактивированной смеси (рис. 2, *a*) идентифицируются уширенные дифракционные отражения Ti и Al с малой интенсивностью ($I_{\max} = 48,4$ усл. ед) и повышенный диффузный фон, что свидетельствует

о наличии неравновесных дефектов в продукте размола и малых размерах кристаллитов. Дополнительные соединения не образуются. После механоактивации в образце формируются крупные композитные частицы, так называемые механо-

композиты, со средними размерами 10...60 мкм (рис. 3).

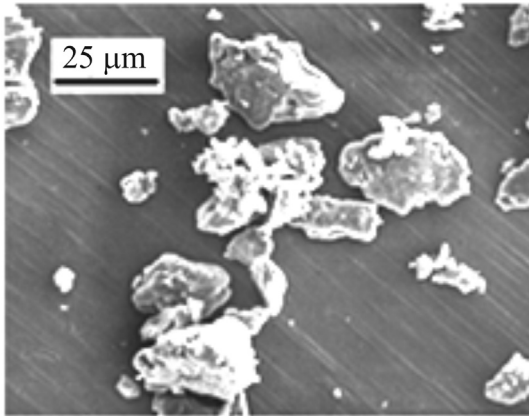


Рис. 3. Микроструктура порошковой смеси состава Ti 50 мас. % + Al 50 мас. % после 7 мин МА

Из анализа полученной дифрактограммы следует, что воздействие γ -облучения по-разному сказывается на структурные изменения компонентов механоактивированной порошковой смеси. Наблюдается рост интенсивностей дифракционных максимумов Ti, в то время как интенсивности отражений Al немного снижаются одновременно с увеличением ширины линий. Из расчета тонкой структуры обоих компонентов в механоактивированной смеси следует, что применяемая доза γ -облучения по-разному воздействует на параметры тонкой структуры компонентов. Для Ti после γ -облучения величины ОКР уменьшаются незначительно и незначительно увеличивается наличие микронапряжений в кристаллической решетке. До облучения

$D(Ti) = 683,64 \text{ \AA}$, $\langle \varepsilon^2 \rangle = 4,586 \times 10^{-6}$, после γ -облучения $D(Ti) = 561,75 \text{ \AA}$, $\langle \varepsilon^2 \rangle = 5,025 \times 10^{-6}$. Для Al после γ -облучения происходит значительное уменьшение размеров кристаллитов и значительное увеличение микронапряжений. До облучения $D(Al) = 315,09 \text{ \AA}$, $\langle \varepsilon^2 \rangle = 2,773 \times 10^{-6}$, после γ -облучения $D(Al) = 79,22 \text{ \AA}$, $\langle \varepsilon^2 \rangle = 9,480 \times 10^{-6}$.

В табл. 2 представлены структурные параметры обоих компонентов в механоактивированной смеси до и после γ -облучения.

На рис. 4 представлены микроструктуры образцов простой механической смеси состава Ti 50 мас. % + Al 50 мас. % после γ -облучения (а) и γ -облученной механоактивированной в течение 7 мин смеси того же состава (б). Приведенные изображения показывают видимые отличия в структурах простой облученной порошковой смеси и механоактивированной смеси после облучения.

Микроструктура образца облученной немеханоактивированной смеси (рис. 4, а) характеризуется четкими границами раздела фаз компонентов титана и алюминия, а также наличием пор. После облучения образца механоактивированной смеси размер пор уменьшается (рис. 4, б), формируется волокнистая структура, на которой можно различить две фазы без четко выраженных границ между ними.

Из проведенных расчетов по микротвердости следует, что среднее значение микротвердости у облученного немеханоактивированного образца 95,9HV, у облученного образца из механоактивированной смеси среднее значение твердости увеличивается до 115 HV.

Таблица 2

Структурные параметры и объем кристаллических решеток Ti и Al в механоактивированной смеси до и после γ -облучения

Параметры ячейки	Ti МА 7 мин		Al МА 7 мин		Эталон Ti* Sys: Hexagonal	Эталон Al* Sys: Cubic
	до γ -облучения	после γ -облучения	до γ -облучения	после γ -облучения		
$a, (\text{Å})$	2,929598	2,946963	4,051394	4,045660	2,92	4,0406
$b, (\text{Å})$	2,929598	2,946963	4,051394	4,045660	2,92	4,0406
$c, (\text{Å})$	4,723319	4,670264	4,051394	4,045660	4,67	4,0406
$V, (\text{Å}^3)$	35,107	35,125	66,499	66,217	34,48	66,49

*Anal. Chem., Hanawaltetal., 10, 475, 1938 (База данных порошковой дифрактометрии PDWin 3).

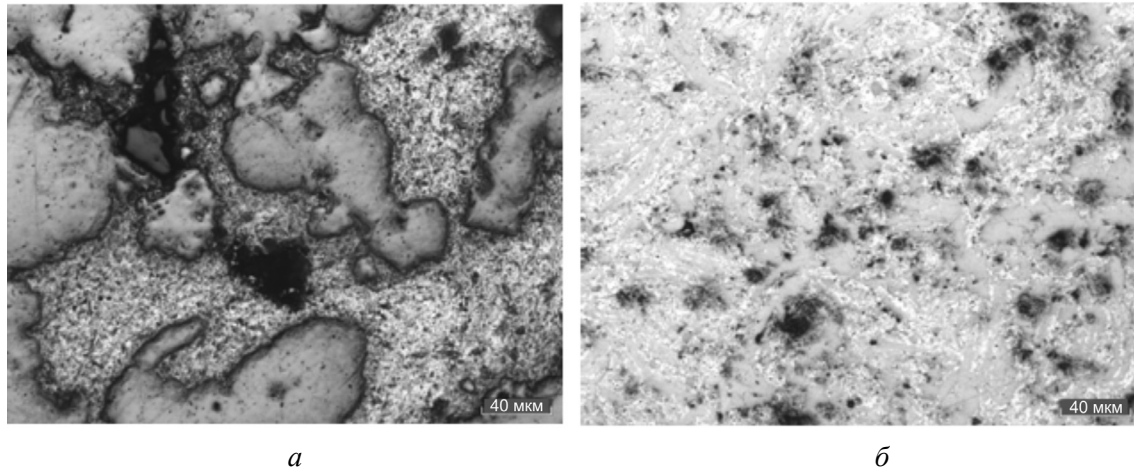


Рис. 4. Микроструктура облученной простой порошковой смеси (а) и механоактивированной смеси после облучения (б) состава Ti 50 мас. % + Al 50 мас. %

Таким образом, по полученным экспериментальным данным можно судить о том, что малые дозы γ -облучения не оказывают существенного влияния на механическую смесь титана и алюминия, когда структуры исходных компонентов находятся в равновесном состоянии. При предварительном же воздействии на них механоактивационной обработки, когда в структурах наблюдается неравновесное состояние, выраженное в деформировании кристаллической решетки, наличии микродеформаций и уменьшении размеров областей когерентного рассеяния, облучение γ -квантами дополнительно влияет на изменение структурных параметров компонентов. Причем воздействие на алюминий γ -облучения оказывается сильнее и выражается в значительном уменьшении ОКР, увеличении микродеформаций кристаллической решетки и уменьшении ее объема.

Выводы

Приведенные выше исследования показывают, что путем применения малых доз γ -облучения в совокупности с предварительной механоактивационной обработкой порошковой смеси Ti+Al можно воздействовать на изменения структурных параметров и, как следствие, изменять механические свойства материалов. В облученном образце с предварительной механоактивацией происходит формирование радиационно-стимулированных состояний компонентов, что не наблюдается в немеханоактивированном образце. Происходит увеличение значения ми-

кротвердости по сравнению с облученным немеханоактивированным образцом, причем механические свойства коррелируют со структурными изменениями.

Список литературы

1. Механокомпозиты – прекурсоры для создания материалов с новыми свойствами / отв. ред. О.И. Ломовский. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2010. – 424 с. – ISBN: 978-5-7692-1108-9.
2. Григорьева Т.Ф., Баринаева А.П., Ляхов Н.З. Механохимический синтез в металлических системах. – Новосибирск: Параллель, 2008. – 312 с.
3. Microwave-assisted combustion synthesis in mechanically activated 3Ti + Al powder mixtures: structure formation issues / V.Yu. Filimonov, A.A. Sitnikov, A.V. Afanas'ev, M.V. Loginova, V.I. Yakovlev, A.Z. Negodyaev, D.V. Schreifer, V.A. Solov'ev // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2014. – Vol. 23, iss. 1. – P. 18–25. – doi: 10.3103/S1061386214010038.
4. Mechanical activation and gasless explosion: nanostructural aspects / A.S. Mukasyan, B.B. Khina, R.V. Reeves, S.F. Son // Chemical Engineering Journal. – 2011. – Vol. 174, iss. 2/3. – P. 677–686. – doi: 10.1016/j.cej.2011.09.028.
5. The features of structure formation in mechanically activated powder mixture 3Ti + Al in the thermal explosion mode / V.Yu. Filimonov, A.A. Sytnikov, V.I. Yakovlev, M.V. Loginova, A.V. Afanasyev, A.Z. Negodyaev // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 621. – P. 71–76. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.621.71.
6. Кооперативные моды радиационного охрупчивания / В.Н. Воеводин, Л.С. Ожигов, И.Н. Лаптев, И.М. Неклюдов, В.В. Брык, А.А. Пархоменко // Во-



просы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2012. – № 5 (81). – С. 51–61.

7. *Parkhomov V.A., Dmitriev A.V., Bazarzhapov A.D.* Spatial features of current systems of SFE-flares accompanied by gamma radiation // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2010. – Vol. 50, iss. 8. – P. 1003–1014. – doi: 10.1134/S0016793210080116.

8. Diffuse X-ray scattering measurements of point defects and clusters in iron / R.E. Stoller, F.J. Walker, E.D. Specht, D.M. Nicholson, R.I. Barabash, P. Zschack, G.E. Ice // *Journal of Nuclear Materials.* – 2007. – Vol. 367–370, pt. A. – P. 269–275. – doi:10.1016/j.jnucmat.2007.03.019.

9. Positron generation through laser Compton scattering gamma ray / D. Li, K. Imasaki, S. Miyamoto, K. Horikawa, S. Amano, T. Mochizuki // *Applied Physics Letters.* – 2009. – Vol. 94, iss. 9. – P. 091112-1–091112-3.

10. Modification of surface functionality and interlayer spacing of multi-walled carbon nanotubes using γ -rays / Z. Xu, C. Min, L. Chen, L. Liu, G. Chen, N. Wu // *Journal of Applied Physics.* – 2011. – Vol. 109, iss. 5. – P. 054303-1–054303-7. – doi: 10.1063/1.3552598.

11. *Tataroğlu A., Altındal S.* Gamma-ray irradiation effects on the interface states of MIS structures // *Sensors and Actuators A: Physical.* – 2009. – Vol. 151, iss. 2. – P. 168–172. – doi:10.1016/j.sna.2009.02.035.

12. *Moussa H.R.* Low dose of gamma irradiation enhanced drought tolerance in soybean // *Bulgarian Journal of Agricultural Science.* – 2011. – Vol. 17, N 1. – P. 63–72.

13. *Хмелевская В.С., Кордо М.Н.* Радиационно-индуцированные фазово-структурные превращения в сплавах систем V-Ti-Cr и V-Fe // *Вопросы атомной*

науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2008. – Т. 72, № 3. – С. 151–156.

14. Effects of 6 MeV electron irradiation on ZnO nanoparticles synthesized by microwave method / Sapnar K.B. Bhoraskar V.N., Dhole S.D., L.A. Ghule, K.M. Garadkar // *Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference, New York, USA.* – New York, 2011. – P. 2166–2168.

15. Analysis of the influence of high temperature synthesis parameters on the structure formation in the mechanically activated 3Ti + Al powder mixture / M.V. Loginova, V.Yu. Filimonov, V.I. Yakovlev, A.A. Sytnikov, A.Z. Negodyaev, D.V. Shreifer // *Applied Mechanics and Materials.* – 2015. – Vol. 788. – P. 117–122. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.117.

16. Dynamic diffractometry of phase transformations during high-temperature synthesis in mechanically activated powder systems in the thermal explosion mode A.A. Popova, A.V. Sobachkin, I.V. Nazarov, V.I. Yakovlev, M.V. Loginova, A.A. Sitnikov, M.R. Sharafutdinov, N.Z. Lyakhov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics.* – 2013. – Vol. 77, iss. 2. – P. 120–122. – doi: 10.3103/S1062873813020275.

17. *Павлинич С.П., Зайцев М.В.* Применение интерметаллидных титановых сплавов при литье узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений // *Вестник УГАТУ.* – 2011. – Т. 15, № 4 (44). – С. 200–202.

18. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications / ed. by C. Leyens, M. Peters. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2003. – 532 p. – ISBN: 978-3-527-30534-6.

OBRAHOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(69), October – December 2015, Pages 93–101

Influence of low dose γ -irradiation on the structural state of mechanically activated powder mixtures of Ti + Al

Loginova M.V.¹, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, e-mail: anicpt@rambler.ru

Yakovlev V.I.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: anicpt@rambler.ru

Sitnikov A.A.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, Rector, e-mail: sitalan@rambler.ru

Ivanov S.G.¹, Ph.D. (Engineering), Head of Laboratory, e-mail: serg225582@mail.ru

Sobachkin A.V.¹, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, e-mail: pr_mech@mail.ru

Negodyaev A.Z.¹, Ph.D. student, e-mail: allneg@mail.ru

Gradoboev A.V.², D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: gradoboev1@mail.ru

¹ I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Abstract

The experimental research of the structural state of the powder components under the influence of γ -irradiation on the powder mixture Ti + Al, and the mixture of the same composition after preliminary mechanical activation treatment is carried out. Samples of selected powder mixtures were irradiated by γ -rays in small dose.

To investigate the parameters of fine structure the method X-ray diffraction is used. The dependence between preliminary mechanical activation treatment of the powder mixture and its structural parameters also as the fine structure (size of coherent scattering regions, microstrain) after influence γ -irradiation is established.

The influence γ -irradiation on the structural condition of mechanically activated mixture is different. From calculation of the fine structure of the two components in mechanically activated mixture follows that the applicable dose of γ -irradiation parameters affect the fine structure of components in different ways. For example, for Ti after γ -irradiation the value of crystal lattice significantly reduced ROC, and slightly increases the microstrains in the crystal lattice.

It was found that preliminary mechanical activation treatment of the powder mixture Ti + Al is a stimulator for the radiation-induced state of the components even at low doses of γ -irradiation. In the sample of preliminary mechanical activation powder mixture, which was irradiated by γ -rays, are formed radiation-induced states of components, which is not observed in the sample of non-mechanical activation powder mixture. Increasing the value of microhardness of irradiated sample in comparison non-mechanical activation powder mixture, wherein the mechanical properties are correlated with the structural changes.

Keywords:

powder mixture, aluminum, titanium, mechanical activation, γ -irradiation, X-ray diffraction, structural parameters, crystalline lattice, grain, microstrains.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-93-101

References

1. Lomovskii O.I., ed. *Mekhanokompozity – prekursory dlya sozdaniya materialov s novymi svoystvami* [Mechanocomposites – precursors for the creation of materials with new properties]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2010. 424 p. ISBN 978-5-7692-1108-9
2. Grigor'eva T.F., Barinova A.P., Lyakhov N.Z. *Mekhanokhimicheskii sintez v metallicheskih sistemakh* [Mechanochemical synthesis in metallic systems]. Novosibirsk, Parallel' Publ., 2008. 312 p.
3. Filimonov V.Yu., Sitnikov A.A., Afanas'ev A.V., Loginova M.V., Yakovlev V.I., Negodyaev A.Z., Schreifer D.V., Solov'ev V.A. Microwave-assisted combustion synthesis in mechanically activated 3Ti + Al powder mixtures: structure formation issues. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2014, vol. 23, iss. 1, pp. 18–25. doi: 10.3103/S1061386214010038
4. Mukasyan A.S., Khina B.B., Reeves R.V., Son S.F. Mechanical activation and gasless explosion: nanostructural aspects. *Chemical Engineering Journal*, 2011, vol. 174, iss. 2–3, pp. 677–686. doi: 10.1016/j.cej.2011.09.028
5. Filimonov V.Yu., Sytnikov A.A., Yakovlev V.I., Loginova M.V., Afanasyev A.V., Negodyaev A.Z. The features of structure formation in mechanically activated powder mixture 3Ti + Al in the thermal explosion mode. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 621, pp. 71–76. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.621.71
6. Voevodin V.N., Ozhigov L.S., Laptev I.N., Bryk V.V., Neklyudov I.M., Parkhomenko A.A. Kooperativnyye mody radiatsionnogo okhrupchivaniya [Cooperation modes of the radiation embrittlement]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnykh povrezhdenii i radiatsionnoe materialovedenie – Problems of atomic science and technology. Series: Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*, 2012, no. 5 (81), pp. 51–61.
7. Parkhomov V.A., Dmitriev A.V., Bazarzhapov A.D. Spatial features of current systems of SFE-flares accompanied by gamma radiation. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2010, vol. 50, iss. 8, pp. 1003–1014. doi: 10.1134/S0016793210080116
8. Stoller R.E., Walker F.J., Specht E.D., Nicholson D.M., Barabash R.I., Zschack P., Ice G.E. Diffuse X-ray scattering measurements of point defects and clusters in iron. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, vol. 367–370, pt. A, pp. 269–275. doi:10.1016/j.jnucmat.2007.03.019
9. Li D., Imasaki K., Miyamoto S., Horikawa K., Amano S., Mochizuki T. Positron generation through laser Compton scattering gamma ray. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, iss. 9, pp. 091112-1–091112-3. doi: 10.1063/1.3094882

10. Xu Z., Min C., Chen L., Liu L., Chen G., Wu N. Modification of surface functionality and interlayer spacing of multi-walled carbon nanotubes using γ -rays. *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 109, iss. 5, pp. 054303-1–054303-7. doi: 10.1063/1.3552598
11. Tataroğlu A., Altındal S. Gamma-ray irradiation effects on the interface states of MIS structures. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, vol. 151, iss. 2, pp. 168–172. doi:10.1016/j.sna.2009.02.035
12. Moussa H.R. Low dose of gamma irradiation enhanced drought tolerance in soybean. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2011, vol. 17, no. 1, pp. 63–72.
13. Khmelevskaya V.S., Kordo M.N. Radiatsionno-indutsirovannyye fazovo-strukturnyye prevrashcheniya v splavakh sistem V-Ti-Cr i V-Fe [Radiation-induced structural phase transformations in alloys of the V-Ti-Cr and V-Fe]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Materialovedenie i novyye materialy – Problems of atomic science and technology. Series: Material science and new materials*, 2008, vol. 72, no. 3, pp. 151–156.
14. Sapnar K.B., Bhoraskar V.N., Dhole S.D., Garadkar K.M., Ghule L.A. Effects of 6 MeV electron irradiation on ZnO nanoparticles synthesized by microwave method. *Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference*. New York, 2011, pp. 2166–2168.
15. Loginova M.V., Filimonov V.Yu., Yakovlev V.I., Sytnikov A.A., Negodyaev A.Z., Shreifer D.V. Analysis of the influence of high temperature synthesis parameters on the structure formation in the mechanically activated 3Ti + Al powder mixture. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 117–122. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.117
16. Popova A.A., Sobachkin A.V., Nazarov I.V., Yakovlev V.I., Loginova M.V., Sitnikov A.A., Sharafutdinov M.R., Lyakhov N.Z. Dynamic diffractometry of phase transformations during high-temperature synthesis in mechanically activated powder systems in the thermal explosion mode. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2013, vol. 77, iss. 2, pp. 120–122. doi: 10.3103/S1062873813020275
17. Pavlinich S.P., Zaitsev M.V. Primeneniye intermetallidnykh titanovykh splavov pri lit'e uzlov i lopatok GTD s oblegchennymi vysokoprochnymi konstruktsiyami dlya aviatsionnykh dvigatelei novykh pokolenii [Application of intermetallic titanitic alloys in parts and gas-turbine engine blade castings with lightweight high-strength constructions of new aircraft engine generations]. *Vestnik UGATU – Bulletin of USATU*, 2011, vol. 15, no. 4 (44), pp. 200–202.
18. Leyens C., Peters M., eds. Titanium and Titanium Alloys: fundamentals and applications. Weinheim, Wiley-VCH Verlag, 2003. 532 p. ISBN 978-3-527-30534-6

Article history:

Received 8 July 2015

Revised 17 August 2015

Accepted 20 October 2015

ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ СПЛАВА ВТ6 ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ С КАРБИДОМ БОРА И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ*

Т.Ю. КОБЗАРЕВА¹, аспирант

В.Е. ГРОМОВ¹, доктор физ.-мат. наук, профессор

Ю.Ф. ИВАНОВ², доктор физ.-мат. наук, профессор

С.В. КОНОВАЛОВ¹, доктор техн. наук, профессор

Е.А. БУДОВСКИХ¹, доктор техн. наук, профессор

В.А. БАТАЕВ³, доктор техн. наук, профессор

(¹СибГИУ, г. Новокузнецк,

²ТПУ, г. Томск,

³НГТУ, г. Новосибирск)

Поступила 25 сентября 2015

Рецензирование 23 октября 2015

Принята к печати 15 ноября 2015

Кобзарева Т.Ю. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, д. 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: kobzarevatanya@mail.ru

Проведены исследования, направленные на выявление изменений в поверхностном слое титанового сплава ВТ6 после комбинированной обработки. Комбинированная обработка поверхности титанового сплава ВТ6 заключалась в легировании плазмой, формирующейся при электрическом взрыве фольги титана с навеской порошка карбида бора и последующем облучении высокоинтенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия. В качестве взрывающего проводника при электровзрывном легировании использовали фольгу титана. В область взрыва на титановую фольгу помещали навеску порошка карбида бора B_4C . Для ЭВЛ использовали лабораторную электровзрывную установку типа ЭВУ 60/10. Основные параметры для осуществления импульсного жидкофазного легирования задавали величиной зарядного напряжения накопителя энергии ускорителя, диаметром канала сопла и расстоянием от его среза до образца. Последующую термическую обработку поверхностного слоя титанового сплава ВТ6 осуществляли высокоинтенсивным импульсным электронным пучком на установке СОЛО (ИСЭ СО РАН).

В результате исследования выявлено, что электровзрывное легирование поверхностного слоя образцов титанового сплава ВТ6 приводит к формированию высокоразвитого рельефа. Методами сканирующей электронной микроскопии выявлено, что в поверхностном слое обработки наблюдается неоднородное распределение легирующих элементов. Существенное различие их концентрации в выявленных слоях приводит к отличию их прочностных и трибологических свойств. Последующая электронно-пучковая обработка поверхности легирования приводит к выглаживанию поверхности легирования. Происходит формирование многослойной структуры, а распределение легирующих элементов в поверхностном слое становится более равномерным. Анализ поверхности обработки, облученной электронным пучком, выявил наличие двух характерных элементов структуры, сформировавшихся в результате последующей обработки высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. Первый – это области с игольчатой структурой, размеры игл которой составляют 1...10 мкм. Исследования поперечных шлифов титанового сплава после комбинированной обработки позволили определить толщину модифицированного слоя, которая составляет не более 30 мкм. И так,

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-03411а) и государственного задания Минобрнауки (№ 2708 и № 3.1496.2014/К).

можно сделать вывод о том, что электровзрывное легирование и сверхскоростное охлаждение при импульсной обработке приводят к формированию структуры субмикро- наномасштабного уровня, что позволяет повысить прочностные и трибологические свойства поверхности обработки.

Ключевые слова: титан, карбид бора, электровзрывное легирование, электронно-пучковая обработка, структурно-фазовые состояния.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-102-112

Введение

Титановые сплавы применяются для изготовления крупногабаритных сварных и сборных конструкций летательных аппаратов, для изготовления баллонов, работающих под внутренним давлением в широком интервале температур от 196 до 450 °С, и целого ряда других конструктивных элементов [1, 2]. По типу структуры сплав ВТ6 относится к классу двухфазных сплавов, содержащих α -Ti и β -Ti [3]. Титан и его сплавы характеризуются отсутствием хладноломкости, высокой пластичностью и прочностью, а также коррозионной стойкостью, особенно в окислительных и хлорированных средах, кроме того, они обладают низкими антифрикционными свойствами [4, с. 681–685]. Помимо перечисленных данные материалы обладают низкой износостойкостью, высокой склонностью к налипанию, большим коэффициентом трения в паре с большинством материалов [5]. Перечисленные недостатки титановых сплавов ограничивают их использование при изготовлении деталей, подверженных трению.

Одним из перспективных способов модификации поверхности металлов и сплавов является метод электровзрывного легирования (ЭВЛ), в котором инструментом воздействия на поверхность служат импульсные плазменные струи, формируемые при разряде емкостных накопителей энергии через токопроводящий материал. Рабочее вещество ускорителя плазмы применяется как для нагрева поверхностного слоя модифицируемого материала, так и для его легирования [6]. Основное преимущество ЭВЛ перед другими аналогичными способами обработки поверхности, использующими плазму взрывчатых веществ и магнитоплазменных компрессоров, состоит в том, что в качестве плазмообразующего вещества, которое собственно и вносится в поверхностный слой мишени, могут быть использованы любые электропроводящие материалы – тонкие фольги металлов и спла-

вов, углеграфитовые и другие волокна. Кроме того, в область взрыва могут быть помещены порошковые навески того или иного вещества. Они увлекаются формируемой струей и переносятся на облучаемую поверхность, частично переходя в плазменное состояние. Плазменные струи электровзрывных источников могут быть использованы также для обработки внутренних цилиндрических поверхностей деталей [7, с. 94–96]. Таким образом, ЭВЛ позволяет в едином технологическом цикле провести оплавление поверхностного слоя детали, выполнить ее жидкофазное легирование продуктами взрыва проводников с последующей скоростной самозакалкой. Для реализации технологии ЭВЛ могут быть использованы промышленные разрядно-импульсные установки, обладающие конструктивной простотой, высокой надежностью и сравнительно низкой стоимостью.

Сдерживающим фактором для широкого практического использования ЭВЛ является высокий уровень шероховатости поверхности модифицирования и существенная неоднородность распределения легирующих элементов в объеме легированного слоя. Оба недостатка – это следствие сложного строения плазменного потока, формирующегося при электрическом взрыве токопроводящего материала, а именно присутствие в плазменном потоке частиц взрывающейся фольги и навески порошка. Первым модифицируемую поверхность достигает поток плазмы и плавит некоторый поверхностный слой; несколько позже поверхность образца достигают осколки взрывающегося проводника и не испарившиеся частицы порошковой навески, которые могут проникать в объем расплавленного слоя, а также формировать на поверхности образца покрытие.

В ряде работ показано, что в качестве инструмента, позволяющего успешно бороться с указанными недостатками, могут быть использованы источники импульсных высокоинтенсивных низкоэнергетических электронных пуч-

ков (энергия электронов до 30 кэВ, плотность энергии до 100 Дж/см², длительность импульса 50...200 мкс) [8–11]. Импульсные электронные пучки с указанными параметрами обеспечивают высокоскоростную кристаллизацию и самозакалку поверхностных слоев металлических, металлокерамических и керамических материалов со скоростями охлаждения до 10⁶ К/с [12, с. 155–156]. Данные условия облучения создают возможность формирования наноразмерных нанофазных поверхностных слоев с низким уровнем шероховатости, обладающих повышенными физико-механическими свойствами [13–15].

Целью исследования, направленного на разработку комбинированного метода модификации поверхности титанового сплава ВТ6 порошком карбида бора, является анализ структурного состояния слоя обработки, сформированного в результате электровзрывного легирования и последующей электронно-пучковой обработки (ЭПО).

Материал и методика исследований

При исследовании использован сплав на основе титана ВТ6 [1]. Химический состав сплава соответствовал ГОСТ 19807-91 (см. таблицу).

Обработку поверхностного слоя осуществляли методами электровзрывного легирования [6, 9]. В качестве взрывающего проводника использовали фольгу титана толщиной 0,1 мкм. В область взрыва на титановую фольгу помещали навеску порошка карбида бора В₄С массой 496 мг. Для ЭВЛ использовали лабораторную электровзрывную установку типа ЭВУ 60/10 (энергоемкость 60 кДж; собственная частота разряда 10 кГц; максимальное значение заряда 5 кВ; максимальная производительность 10 цикл/ч; средняя потребляемая мощность 0,55 кВт) с характерными значениями поглощаемой плотности мощности при обработке поверхности материала ~10⁹ Вт/м², давления в ударно-сжатом слое плазмы вблизи облучаемой поверхности 10⁶...10⁷ Па, времени обработки ~100 мкс, тол-

щины зоны легирования в ее центральной области 20...40 мкм. Условия для осуществления импульсного жидкофазного легирования задавали величиной зарядного напряжения накопителя энергии ускорителя, диаметром канала сопла и расстоянием от его среза до образца. Формирование плазменного потока выполняли при напряжении $U = 2,4$ кВ [15].

Последующую термическую обработку поверхностного слоя осуществляли высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (установка СОЛО, ИСЭ СО РАН) [9]. Облучение электронным пучком проводили при следующих параметрах работы источника электронов: энергия ускоренных электронов 18 кэВ; плотность энергии пучка электронов $E_S = 50$ Дж/см² и $E_S = 60$ Дж/см²; длительность импульса воздействия пучка электронов $\tau = 100$ мкс; частота следования импульсов 0,3 с⁻¹; количество импульсов облучения $N = 10$.

Исследование структуры модифицированного материала осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии. Элементный состав поверхностного слоя изучали методами микрорентгеноспектрального анализа.

Результаты и обсуждение

Характерной особенностью электровзрывного легирования является формирующийся высоко развитый рельеф поверхности титанового сплава ВТ6 после облучения, представленный на рис. 1, а. На рис. 1, б изображена структура поверхности титанового сплава после карбоборирования и дальнейшей электронно-пучковой обработки при следующих параметрах: $E_S = 50$ Дж/см², $\tau = 100$ мкс, $N = 10$ имп. На рис. 1, в показано изображение структуры поверхности титанового сплава после карбоборирования и последующей электронно-пучковой обработки при $E_S = 60$ Дж/см², $\tau = 100$ мкс, $N = 10$ имп.

Методами сканирующей электронной микроскопии выявляется контраст, который свидетельствует о неоднородном распределении легирую-

Химический состав сплава ВТ6 (вес. %)

Fe	C	Si	V	N	Ti	Al	Zr	O	H	Примесей
До 0,6	До 0,1	До 0,1	3,5...5,3	До 0,05	86,45...90,9	5,3...6,8	До 0,3	До 0,2	До 0,015	Прочих 0,3

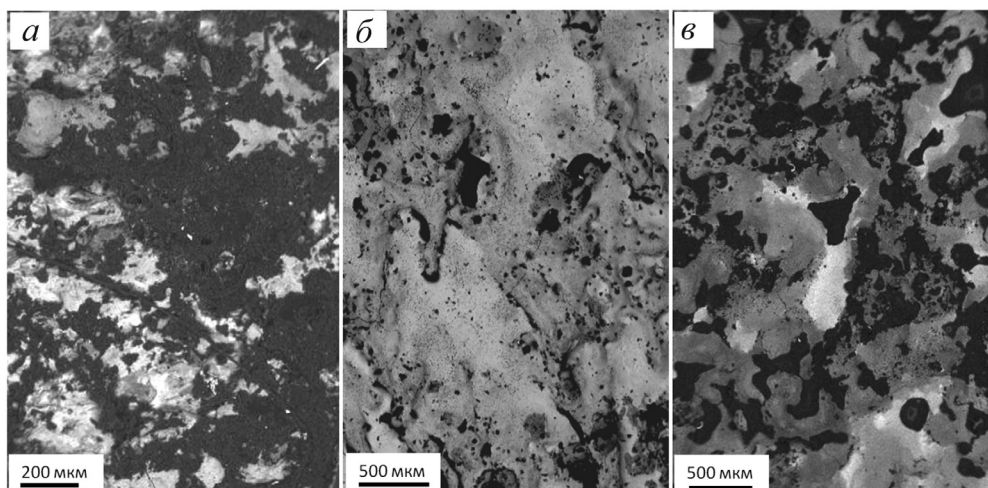


Рис. 1. Структура поверхности титанового сплава ВТ6 после комбинированной обработки

щих элементов в поверхностном слое образца [5]. Объемы материала, обогащенные легкими элементами (углерод и бор), выглядят более темными по сравнению с объемами материала, обогащенными металлическими атомами, имеющимися в составе исследуемого сплава (рис. 1).

Последующая электронно-пучковая обработка приводит к существенному преобразованию рельефа и распределению легирующих элементов в поверхностном слое. Рельеф поверхности выглаживается; черно-белый контраст на изображении поверхности модифицирования замещается преимущественно серым (рис. 1, б, в). Последнее указывает на более равномерное распределение в плоскости шлифа легирующих

элементов, инициированное облучением электронным пучком.

Высокоскоростное плавление и последующая скоростная самозакалка поверхностного слоя вследствие отвода тепла в интегрально холодный объем образца приводят к выглаживанию рельефа и существенному преобразованию структуры материала. Изображения структуры слоя, формирующегося при дополнительной обработке модифицированного титана электронным пучком с параметрами 18 кэВ; $E_S = 50 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$, $N = 10 \text{ имп.}$; $0,3 \text{ с}^{-1}$, представлены на рис. 2.

Анализ поверхности обработки, облученной электронным пучком, выявил два характерных

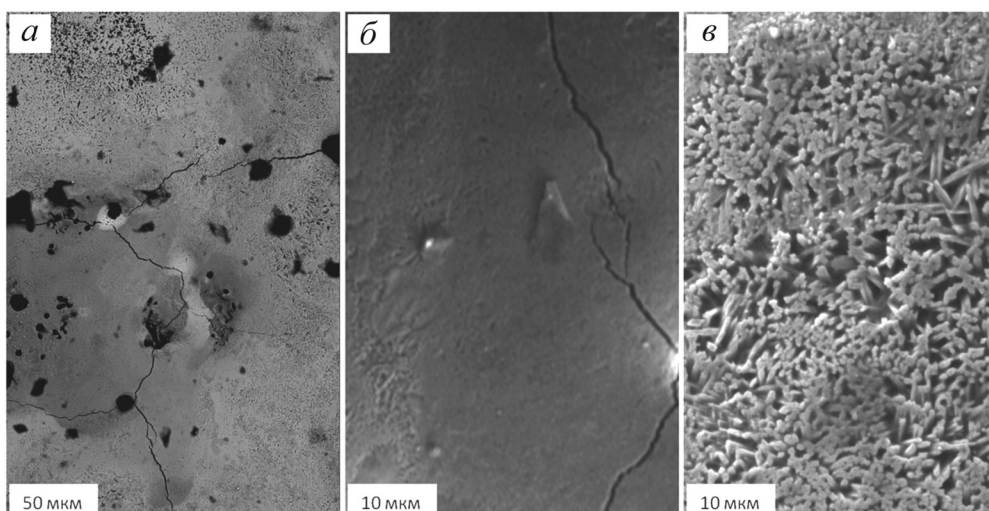


Рис. 2. Поверхность титанового сплава ВТ6, подвергнутого электровзрывному легированию и последующей электронно-пучковой обработке ($E_S = 50 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$, $N = 10 \text{ имп.}$)

элемента структуры, сформировавшихся исключительно в результате последующей обработки высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. Первый – это области с игольчатой структурой (рис. 3, а).

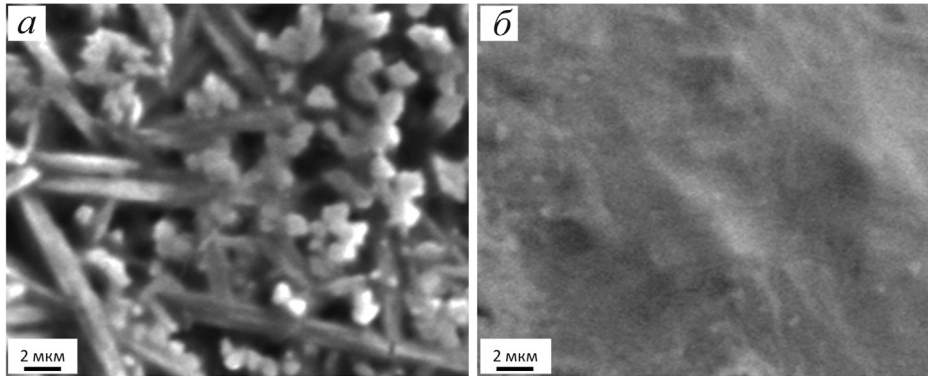


Рис. 3. Элементы структуры поверхности титанового сплава ВТ6 после ЭВЛ и ЭПО ($E_s = 50 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$, $N = 10 \text{ имп.}$)

Продольные размеры игл изменяются в пределах до 10 мкм, поперечные – в пределах 1 мкм. Иглы располагаются преимущественно перпендикулярно поверхности облучения, т. е. по направлению теплоотвода. Вторым характерным элементом структуры поверхности облучения являются сравнительно гладкие области, размеры элементов которых изменяются в пределах 100 нм (рис. 3, б).

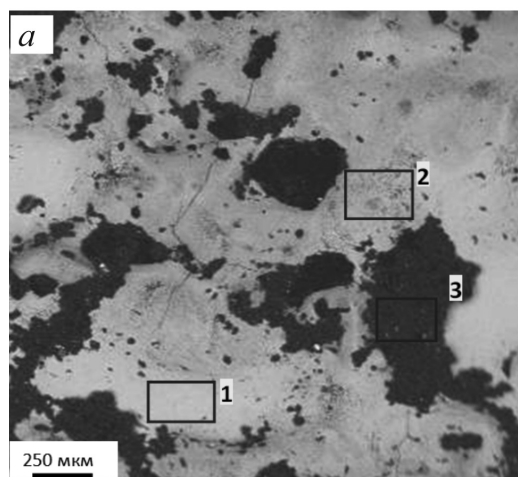
Области, представленные на рис. 2 и 3, различаются элементным составом. Результаты микрорентгеноспектрального анализа, приведенные на рис. 4, свидетельствуют о том, что области, имеющие ярко выраженный темный контраст, сформированы исключительно легирующими элементами и кислородом (рис. 4, спектр 3). Они сформированы частицами исходного порошка, не растворившимися при электровзрывном легировании и последующей электронно-пучковой обработке.

Области с наноразмерной субструктурой сформированы исключительно атомами исходного материала с небольшой

добавкой углерода (рис. 4, спектр 1). Данные области предположительно содержат частица карбидной фазы.

Области с игольчатой структурой (рис. 4, спектр 2) содержат элементы легирующего порошка и сплава титана ВТ6. Они сформировались в результате жидкофазного легирования титана бором, углеродом и кислородом и должны иметь относительно сложный фазовый состав. Увеличение плотности энергии пучка электронов до $E_s = 60 \text{ Дж/см}^2$ приводит к формированию преимущественно структуры игольчатого типа (рис. 5).

Микрорентгеноспектральный анализ областей с игольчатой структурой выявил присутствие легирующих элементов и элементов исходного сплава (рис. 6, спектр 1). Данный факт свидетельствует об увеличении степени растворения порошка карбида бора в титане с ростом плотности энергии пучка элект-



Элемент	Спектр 1	Спектр 2	Спектр 3
	Вес. %	Вес. %	Вес. %
В К	0,0	51,50	38,45
С К	4,77	21,43	49,50
О К	0,0	4,77	10,18
Al К	5,06	0,37	0,06
Ti К	86,44	20,24	2,03
V К	3,74	0,81	0,0

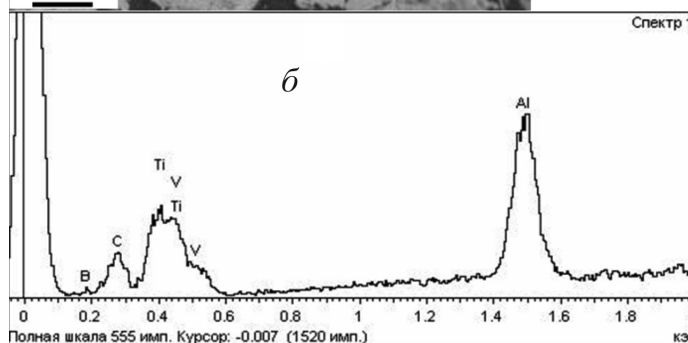


Рис. 4. Структура поверхности модификации сплава на основе титана ВТ6 после ЭВЛ и последующей ЭПО

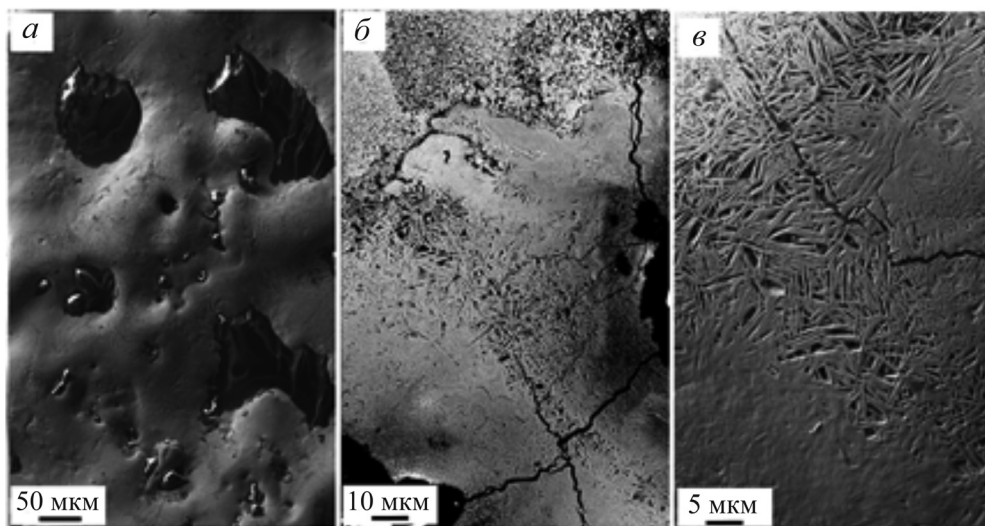


Рис. 5. Структура поверхности модификации сплава на основе титана ВТ6 после ЭВЛ и последующей ЭПО ($E_S = 60 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$, $N = 10 \text{ имп.}$)

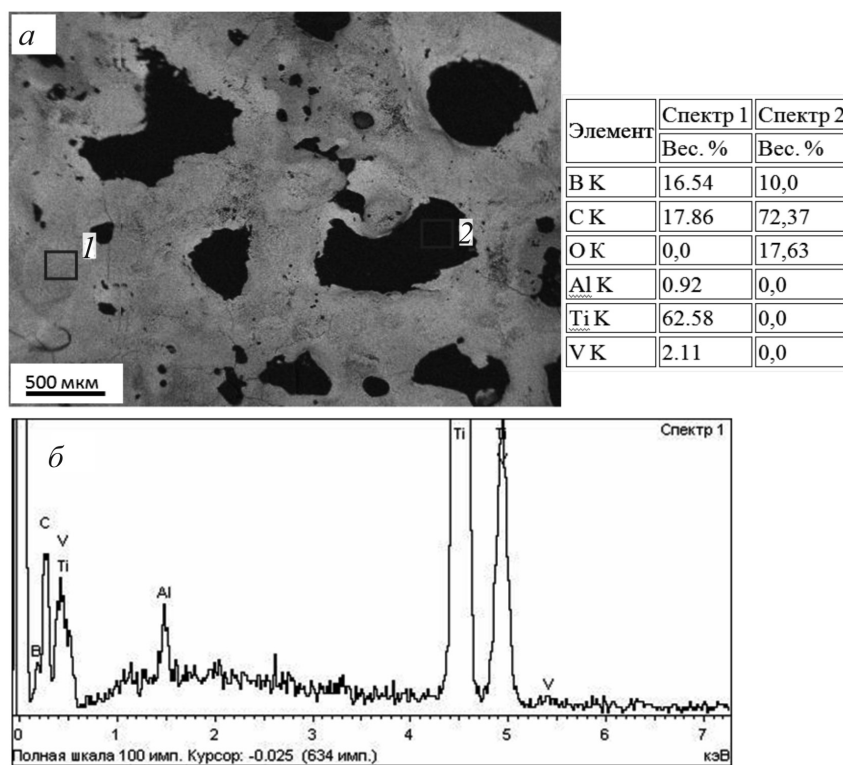


Рис. 6. Поверхность сплава на основе титана ВТ6, подвергнутого ЭВЛ и ЭПО ($E_S = 60 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$, $N = 10 \text{ имп.}$)

тронов. Уровень гомогенности модифицируемого поверхностного слоя увеличивается.

Преобразование структуры объема поверхностного слоя анализировали, исследуя поперечные шлифы. Изображение структуры поперечного шлифа легированного слоя, обработанного электронным пучком при плотности энергии пуч-

ка электронов $E_S = 50 \text{ Дж/см}^2$, представлено на рис. 7. Дополнительная обработка электронным пучком при данной плотности энергии не приводит к формированию однородной структуры. Поверхностный слой толщиной до 30 мкм имеет игольчатое строение (рис. 7, б, в); субструктура нижележащего слоя подобна субструктуре, формирующейся в материале при электровзрывном легировании [1]. Следовательно, электронно-пучковая обработка при указанных параметрах позволяет модифицировать слой толщиной не более 30 мкм.

Структура обработанного слоя имеет слоистое строение. Это выявляется при исследовании шлифов в обратно отраженных электронах (рис. 7, а) и при микрорентгено-

спектральном анализе элементного состава материала. Обнаруживаются слои, обогащенные и обедненные легирующими элементами (рис. 8). Концентрация легирующих элементов слабо зависит от расстояния легированного слоя до поверхности облучения. В материале многослойной структуры формируются слои с повышенным уровнем легирования (упрочненные слои), которые чередуются со слоями с пониженным легированием (менее прочные слои).

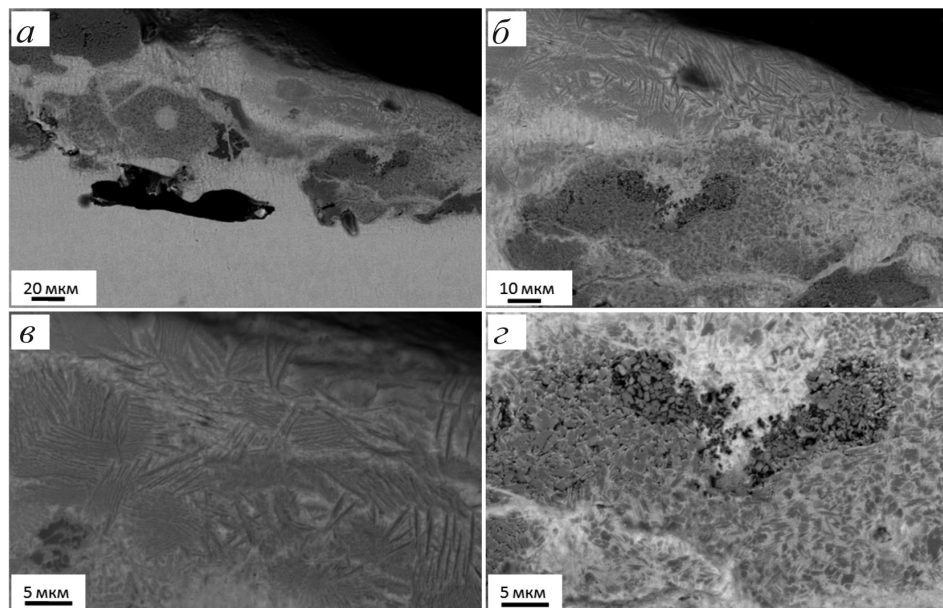


Рис. 7. Изображение структура поперечного шлифа, подвергнутого ЭВЛ и ЭПО ($E_S = 50 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$; $0,3 \text{ с}^{-1}$; $N = 10 \text{ имп.}$)

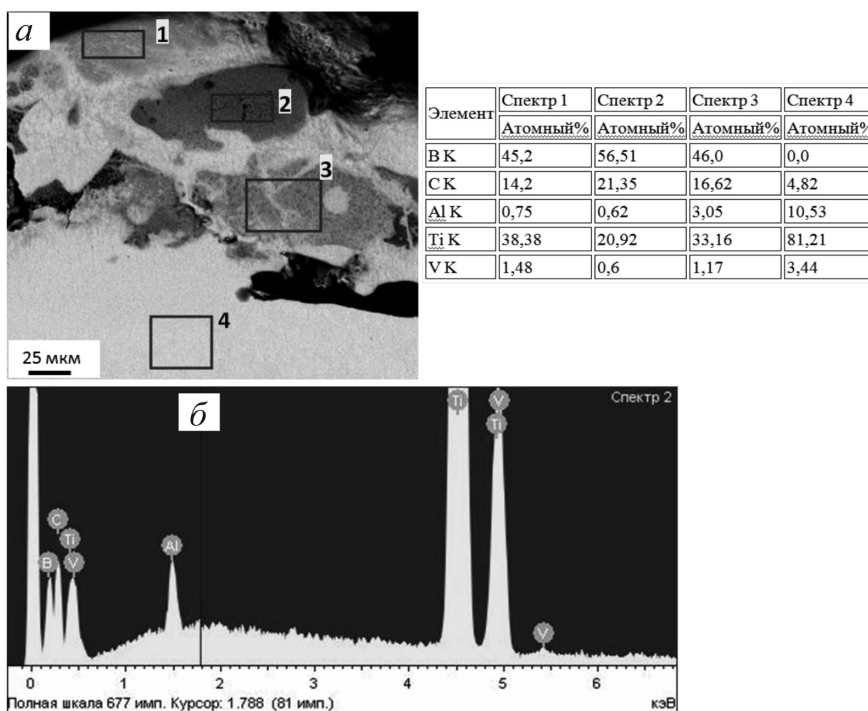


Рис. 8. Структура поперечного шлифа титанового сплава ВТ6 после ЭВЛ и ЭПО ($E_S = 50 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$; $0,3 \text{ с}^{-1}$; $N = 10 \text{ имп.}$)

Подобная слоистая структура формируется в модифицированном слое при облучении материала высокоинтенсивным импульсным пучком электронов с параметрами $E_S = 60 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$; $N = 10 \text{ имп.}$; $0,3 \text{ с}^{-1}$ (рис. 9).

В результате анализа изображений структуры поперечного шлифа, представленных на рис. 9,

выделили слои, различающиеся контрастом и субструктурой. Слои имеют меньшую толщину и большее количество по сравнению со слоями, формирующимися в модифицированном слое после облучения электронным пучком с плотностью энергии $E_S = 50 \text{ Дж/см}^2$ (рис. 7 и 8).

Распределение элементов, выявленное методами микро-рентгеноспектрального анализа, также однозначно свидетельствует в пользу слоистого строения поверхностного слоя, формирующегося при комбинированной обработке титана, сочетающей электровзрывное легирование порошком карбида бора и последующее облучение высокоинтенсивным импульсным электронным пучком.

Результаты микро-рентгено-спектрального анализа участков поверхности титанового сплава после комбинированной обработки приведены на рис. 10. Анализируя результаты, представленные в таблице к рис. 10, можно отметить, что слои, различающиеся контрастом, существенно отличаются концентрацией

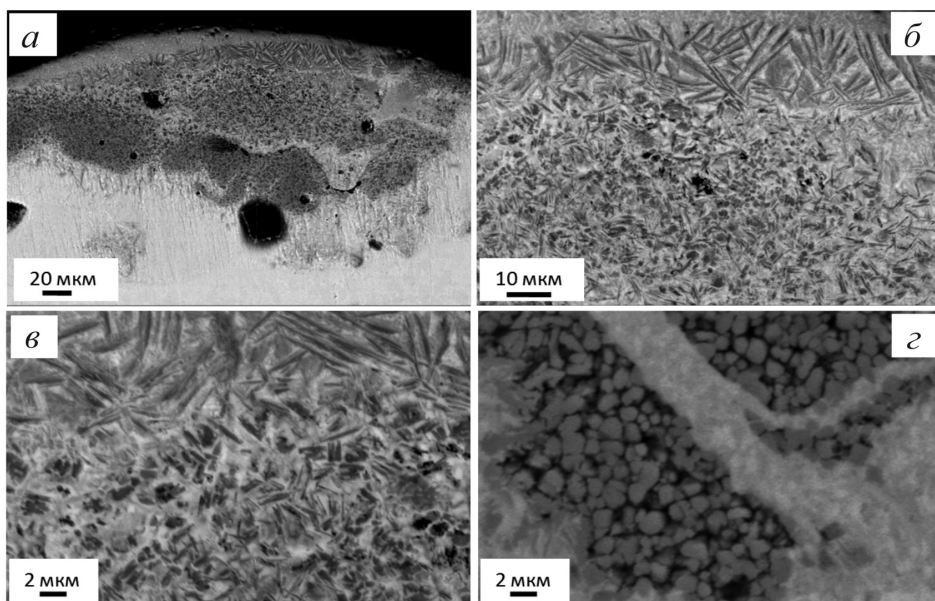


Рис. 9. Структура поперечного шлифа сплава титана ВТ6, подвергнутого ЭВЛ и ЭПО ($E_s = 60 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$; $0,3 \text{ с}^{-1}$; $N = 10 \text{ имп.}$)

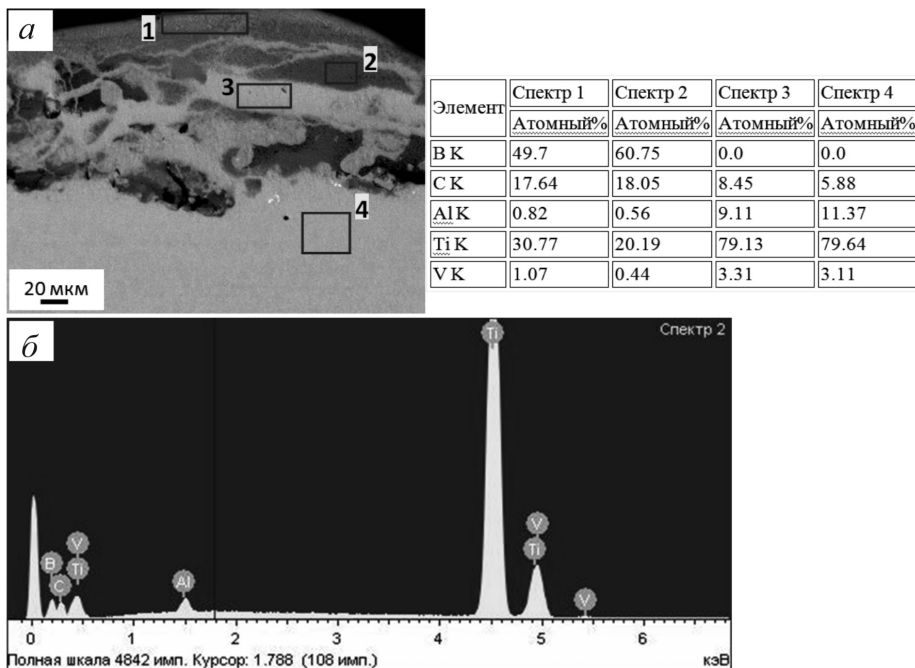


Рис. 10. Анализ структуры поперечного шлифа титанового сплава ВТ6 после ЭВЛ и ЭПО ($E_s = 60 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$; $0,3 \text{ с}^{-1}$; $N = 10 \text{ имп.}$)

легирующих элементов. Последующая обработка легированного слоя высокоинтенсивным импульсным электронным пучком не приводит к гомогенизации этого слоя; формируется слоистая структура. Существенное различие в концентрации легирующих элементов в выявленных слоях приводит к различию их прочностных и трибологических свойств.

слоистой структуры, характеризующейся чередованием слоев, обогащенных и обедненных легирующими элементами. Установлено, что сверхвысокие скорости охлаждения, инициированные импульсной обработкой электронным пучком, приводят к формированию структуры субмикронаномасштабного уровня, что позво-

Выводы

Осуществлена комбинированная обработка поверхности титанового сплава ВТ6, заключающаяся в легировании плазмой, формирующейся при электрическом взрыве фольги титана с навеской порошка карбида бора, и последующем облучении высокоинтенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия. Выявлено, что электровзрывное легирование поверхностного слоя образцов титанового сплава ВТ6 и его последующая электроннопучковая обработка приводят к выглаживанию поверхности легирования и сопровождаются формированием много-

ляет прогнозировать высокие прочностные и трибологические свойства обработанного материала.

Список литературы

1. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов. – 3-е изд. – М.: МИСИС, 1999. – 416 с. – ISBN 5-87623-027-8.
2. Research progress on laser surface modification of titanium alloys / Y.S. Tian, C.Z. Chen, S.T. Li, Q.H. Huo // *Applied Surface Science*. – 2005. – Vol. 242, iss. 1/2. – P. 177–184. – doi: 10.1016/j.apsusc.2004.08.011.
3. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы: состав, структура, свойства: справочник. – М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.
4. Boyer R.R., Briggs R.D. The use of β titanium alloys in the aerospace industry // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2005. – Vol. 14, iss. 6. – P. 681–685. – doi: 10.1361/105994905X75448.
5. Полмеар Я., Джон Д. Легкие сплавы: от традиционных до нанокристаллов. – М.: Техносфера, 2008. – 468 с.
6. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2007. – 301 с. – ISBN 978-5-8441-0263-9.
7. Полетика И.М. Крылова Т.А., Макаров С.А. Использование электронно-лучевой обработки для создания упрочняющих покрытий // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 319, № 2. – С. 94–98.
8. Surface hardening alloy VT6 of electric explosion and by electron beam / Yu.F. Ivanov, T.Yu. Kobzareva,

S.V. Raikov, V.E. Gromov, N.A. Soskova, E.A. Budovskikh // *AIP Conference Proceedings*. – 2014. – Vol. 1623. – P. 217–220. – doi: 10.1063/1.4901482.

9. Формирование структурно-фазовых состояний и свойств поверхности титановых сплавов при электровзрывном легировании и последующей электронно-пучковой обработке / С.В. Райков [и др.]. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2014. – 267 с. – ISBN 978-5-905647-09-3.

10. Модифицирование структуры и свойств легких сплавов упрочняющими технологиями / под ред. В.Е. Громова, Ю.Ф. Иванова. – Новокузнецк: Полиграфист, 2015. – 226 с. – ISBN 978-5-91797-202-2.

11. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // *Известия вузов. Физика*. – 2008. – Т. 51, № 5. – С. 60–70.

12. Ion J.C. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. – 1st ed. – Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann, 2005. – 576 p. – ISBN 978-0-7506-6079-2.

13. Microstructure transformations of laser surface melted near alpha titanium alloy / G. Luo, G. Wu, Z. Huang, Z. Ruan // *Materials Characterization*. – 2009. – Vol. 60, iss. 6. – P. 525–529. – doi: 10.1016/j.matchar.2008.12.009.

14. Астанчик С.А., Голубев В.С., Маслаков А.Г. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке. – Минск: Беларуская навука, 2008. – 251 с. – ISBN 978-985-08-0920-9.

15. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2006. – 384 с. – ISBN 5-94836-018-0.

OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(69), October – December 2015, Pages 102–112

Surface hardening alloy VT6 of electroexplosion alloying with boron carbide and by electron beam treatment

Kobzareva T.Yu.¹, Ph.D. student, e-mail: kobzarevatanya@mail.ru

Gromov V.E.¹, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Ivanov Yu.F.², D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: yufi55@mail.ru

Konovalov S.V.¹, D.Sc (Engineering), Professor, e-mail: konovalov@physics.sibsiu.ru

Budovskikh E.A.¹, D.Sc (Engineering), Professor, e-mail: oskolkova@kuz.ru

Bataev V.A.³, D.Sc (Engineering), Professor, e-mail: vabataev@yandex.ru

¹ Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

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

Abstract

Investigations aimed at identifying the changes in the surface layer of titanium alloy VT6 after combined treatment are carried out. Combined surface treatment of titanium alloy VT6 includes alloying with plasma formed during electrical explosion of titanium foil with a powder weight quantity of boron carbide and subsequent irradiation by high-intensity pulse electronic beam of sub millisecond exposure time. The titanium foil is used as exploded conductor during electroexplosive alloying. A weight quantity of boron carbide powder is placed into explosion area over the titanium foil. The laboratory electroexplosive device EVU 60/10 is used for EEA (electroexplosive alloying). The main parameters for a pulse liquid-phase alloying are set by the value of the charging voltage of the energy storage device of the accelerator, the diameter of the nozzle channel and the distance from its section to the sample. Subsequent thermal treatment of the titanium alloy VT6 surface layer is performed with high-intensity pulse electronic beam at the SOLO device (Institute of High Current Electronics SB RAS).

The study found that electroexplosive alloying of the surface layer of titanium alloy VT6 samples leads to the formation of the highly developed relief. In the surface layer a heterogeneous distribution of alloying elements is observed through the methods of electron scanning microscopy. A significant difference in its concentration in the revealed layers leads to the difference in its strength and tribological properties. The subsequent electron beam treatment of the alloyed surface leads to its smoothing. The formation of the multilayer structure occurs and the distribution of alloying elements in the surface layer becomes more uniform. Analysis of the treated surface irradiated by the electron beam revealed the presence of two characteristic elements of the structure, formed in the result of the subsequent treatment with high-intensity pulse electron beam. The first structure element is acicular structure areas with the needle size of 1-10 microns. Studies of the transverse sections of the titanium alloy after combined treatment allowed to determine the thickness of the modified layer, which is not more than 30 μm . So, we can conclude that electroexplosive alloying and fast cooling at pulse treatment lead to the formation of a structure of submicroscale level that can improve the strength and tribological properties of the treated surface.

Keywords:

titanium, boron carbide, electric explosion alloying electron-beam treatment, structural-phase states.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-102-112

References

1. Kolachev B.A., Elagin V.I., Livanov V.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i splyavov* [Metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys]. 3rd ed. Moscow, MISIS Publ., 1999. 416 p. ISBN 5-87623-027-8
2. Tian Y.S., Chen C.Z., Li S.T., Huo Q.H. Research progress on laser surface modification of titanium alloys. *Applied Surface Science*, 2005, vol. 242, iss. 1–2, pp. 177–184. doi: 10.1016/j.apsusc.2004.08.011
3. Il'in A.A., Kolachev B.A., Pol'kin I.S. *Titanovye splyavy: sostav, struktura, svoystva. Spravochnik* [Titanium alloys: composition, structure, properties. Reference book]. Moscow, VILS-MATI Publ., 2009. 520 p.
4. Boyer R.R., Briggs R.D. The use of β titanium alloys in the aerospace industry. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2005, vol. 14, iss. 6, pp. 681–685. doi: 10.1361/105994905X75448
5. Polmear I., John D. *Light alloys. From traditional alloys to nanocrystals*. 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2005. 416 p. ISBN 978-0-7506-6371-7 (Russ. ed.: Polmear Ya., Dzhon D. *Legkie splyavy: ot traditsionnykh do nanokristallov*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2008. 463 p. ISBN 978-5-94836-174-1).
6. Bagautdinov A.Ya., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. *Fizicheskie osnovy elektrovzryvnogo legirovaniya metallov i splyavov* [Physical bases electroexplosive alloying metals and alloys]. Novokuznetsk, SibGIU Publ., 2007. 301 p. ISBN 978-5-8441-0263-9
7. Poletika I.M., Krylova T.A., Makarov S.A. Ispol'zovanie elektronno-luchevoi obrabotki dlya sozdaniya uprochnyayushchikh pokrytii [Use electron-beam processing to create a hardening coatings]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 2, pp. 94–98. (In Russian)
8. Ivanov Yu.F., Kobzareva T.Yu., Raikov S.V., Gromov V.E., Soskova N.A., Budovskikh E.A. Surface hardening alloy VT6 of electric explosion and by electron beam. *AIP Conference Proceedings*, 2014, vol. 1623, pp. 217–220. doi: 10.1063/1.4901482
9. Raikov S.V., et al. *Formirovanie strukturno-fazovykh sostoyanii i svoystv poverkhnosti titanovykh splyavov pri elektrovzryvnom legirovanii i posleduyushchei elektronno-puchkovoi obrabotke* [Formation of structurally-

phase states and the surface properties of titanium alloys at electroexplosive doping and subsequent electron-beam processing]. Novokuznetsk, Inter-Kuzbass Publ., 2014. 267 p. ISBN 978-5-905647-09-3

10. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., eds. *Modifitsirovanie struktury i svoistv legkikh splavov uprochnyayushchimi tekhnologiyami* [Modification of structure and properties of light alloys with hardening technologies]. Novokuznetsk, Poligrafist Publ., 2015. 226 p. ISBN 978-5-91797-202-2

11. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Nanostrukturirovanie poverkhnosti metallokeramicheskikh i keramicheskikh materialov pri impul'snoi elektronno-puchkovoii obrabotke [Nanostructuring of surfaces of metalloceramic and ceramic materials by electron-beams]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*, 2008, vol. 51, no. 5, pp. 60–70. (In Russian)

12. Ion J.C. *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application*. 1st ed. Oxford, Elsevier Butterworth Heinemann, 2005. 576 p. ISBN 978-0-7506-6079-2

13. Luo G.X., Wu G.Q., Huang Z., Ruan Z.J. Microstructure transformations of laser surface melted near alpha titanium alloy. *Materials Characterization*, 2009, vol. 60, iss. 6, pp. 525–529. doi: 10.1016/j.matchar.2008.12.009

14. Astapchik S.A., Golubev V.S., Maslakov A.G. *Lazernye tekhnologii v mashinostroenii i metalloobrabotke* [Laser technologies in mechanical engineering and metal working]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2008. 251 p. ISBN 978-985-08-0920-9

15. Brandon D.G., Kaplan W.D. *Microstructural characterization of materials*. 1st ed. New York, John Wiley, 1999. 409 p. ISBN 0-471-98502-3 (Russ. ed.: Brandon D., Kaplan U. *Mikrostruktura materialov. Metody issledovaniya i kontrolya*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 384 p. ISBN 5-94836-018-0).

Funding

The study was supported by the grant of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR projects 15-08 -03411a), and Ministry of Education and Science of Russia (projects № 2708 and № 3.1496.2014/K).

Article history:

Received 25 September 2015

Revised 23 October 2015

Accepted 15 November 2015

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

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

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

1. Общие комментарии

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

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

Избегайте:

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

Научная статья должна иметь определенную структуру, которая описана ниже.

2. Заглавие и сведения об авторах

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

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

3. Аннотация (реферат)

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

4. Ключевые слова

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

5. Введение

Раздел «Введение» должен быть использован для того, чтобы определить место вашей работы (подхода, данных или анализа). Подразумевается, что существует нерешенная или новая научная проблема, которая рассматривается в вашей работе. В связи с этим в данном разделе следует представить краткий, но достаточно информированный литературный обзор (до 2 стр.) по состоянию данной отрасли науки. Не следует пренебрегать книгами и статьями, которые были написаны, например, раньше, чем пять лет назад. В конце раздела «Введение» формулируются цели работы и описывается стратегия для их достижения.

6. Описание экспериментальной части и теоретической/вычислительной работы

6.1. Материал, испытываемые образцы и порядок проведения испытаний

Приводится обоснование выбора данного материала (или материалов) и методов описания материала (материалов) в данной работе.

При необходимости приводятся рисунки образцов с единицами измерения (единицы измерения только в системе СИ). При испытании стандартных образцов достаточно ссылки на стандарт. Для большой программы испытаний целесообразно использовать таблицу матричного типа. Если образцы взяты из слитков, заготовок или компонентов, то описывается их ориентация и нахождение в исходном материале, используются стандартные обозначения по ГОСТу.

При проведении испытаний приводится следующая информация.

1. Тип и условия испытаний, например, температура испытаний, скорость нагружения, внешняя среда.
2. Описываются переменные параметры, измеряемые величины и методы их измерения с точностью, степенью погрешности, разрешением и т.д.; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

6.2. Результаты экспериментов

Результаты предпочтительно представлять в форме графиков и описывать их словесно. Не следует писать о том, что ясно видно по графику.

6.3. По теоретической/вычислительной работе

Вышеперечисленные рекомендации актуальны также и для теоретической и вычислительной работы. В статьях, основанных на вычислительной работе, необходимо указать тип конечного элемента, граничные условия и входные параметры. Численный результат представляется с учетом ограничений (точности) в применяемых вычислительных методах.

В статьях, основанных на аналитической работе, при изложении длинного ряда формул необходимо давать поясняющий текст, чтобы была понятна суть содержания работы. Правильность вычислений необходимо подтверждать промежуточными вычислениями. Так же как и в случае с экспериментальной работой, простого описания числовых или аналитических преобразований без рассмотрения теоретической (физической) первопричины обычно недостаточно, для того чтобы сделать публикацию такой статьи оправданной. Простой отчет о числовых результатах в форме таблиц или в виде текста, как и бесконечные данные по экспериментальной работе, без попытки определить или выдвинуть гипотезу о том, почему были получены такие результаты, без попытки выявить причинно-следственные связи, не украшают работу.

Сравнение ваших числовых результатов с числовыми результатами, полученными кем-то другим, может быть информативным. Но оно ничего не ДОКАЗЫВАЕТ. Контроль при помощи сравнения с общеизвестными решениями и проверка при помощи сравнения с экспериментальными данными являются обязательными.

7. Обсуждение

Необходимо использовать этот раздел для того, чтобы в полном объеме объяснить значимость вашего подхода, данных или анализа и результатов. Настоящий раздел упорядочивает и интерпретирует результаты. Цель раздела – показать, какие знания были получены в результате вашей работы, а также перспективу полученных результатов, сравнив их с существующим положением в данной области, описанным в разделе «Введение». Большое количество графиков и цветных иллюстраций не дает научного результата, это не презентация в PowerPoint. Обязанностью автора является упорядочивание данных и систематическое представление результатов. Так, простой отчет о результатах испытаний без попытки исследовать внутренние механизмы не имеет большой ценности.

8. Выводы

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

9. Список литературы

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

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

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

ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

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

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

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

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

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

Пример авторского резюме на русском языке

Значительная часть инновационных планов по внедрению изменений, содержащих в своей основе нововведения, либо не доходит до практической реализации, либо в действительности приносит гораздо меньше пользы, чем планировалось. Одна из причин этих тенденций кроется в отсутствии у руководителя реальных инструментов по планированию, оценке и контролю над инновациями. В статье предлагается механизм стратегического планирования компании, основанный на анализе как внутренних возможностей организации, так и внешних конкурентных сил, поиске путей использования внешних возможностей с учетом специфики компании. Стратегическое планирование опирается на свод правил и процедур, содержащих серию методов, использование которых позволяет руководителям компаний обеспечить быстрое реагирование на изменение внешней конъюнктуры. К таким методам относятся: стратегическое сегментирование; решение проблем в режиме реального времени; диагностика стратегической готовности к работе в условиях будущего; разработка общего плана управления; планирование предпринимательской позиции фирмы; стратегическое преобразование организации. Процесс стратегического планирования представлен в виде замкнутого

цикла, состоящего из 9 последовательных этапов, каждый из которых представляет собой логическую последовательность мероприятий, обеспечивающих динамику развития системы. Результатом разработанной автором методики стратегического планирования является предложение перехода к «интерактивному стратегическому менеджменту», который в своей концептуальной основе ориентируется на творческий потенциал всего коллектива и изыскание путей его построения на основе оперативного преодоления ускоряющихся изменений, возрастающей организационной сложности и непредсказуемой изменчивости внешнего окружения.

Это же авторское резюме на английском языке

A considerable part of innovative plans concerning implementation of developments with underlying novelties either do not reach the implementing stage, or in fact yield less benefit than anticipated. One of the reasons of such failures is the fact that the manager lacks real tools for planning, evaluating and controlling innovations. The article brings forward the mechanism for a strategic planning of a company, based on the analysis of both inner company's resources, and outer competitive strength, as well as on searching ways of using external opportunities with account taken of the company's specific character. Strategic planning is based on a code of regulations and procedures containing a series of methods, the use of which makes it possible for company's manager to ensure prompt measures of reaction to outer business environment changes. Such methods include: strategic segmentation; solving problems in real-time mode; diagnostics of strategic readiness to operate in the context of the future; working out a general plan of management; planning of the business position of the firm; strategic transformation of the company. Strategic planning process is presented as a closed cycle consisting of 9 successive stages, each of them represents a logical sequence of measures ensuring the dynamics of system development. The developed by the author strategic planning methods result in the recommendation to proceed to "interactive strategic management" which is conceptually based on the constructive potential of the collective body, on searching ways of its building on the basis of effective overcoming accelerating changes, increasing organizational complexity, and unpredictable changeability of the environment.

Пример структурированного авторского резюме из иностранного журнала в Scopus

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

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

Results: As an approach of noninvasive functional imaging, quantitative magnetic resonance spectroscopic imaging (MRSI) measured abnormalities of mitochondrial and energetic dysfunction (via ^1H or ^{31}P spectroscopy) are related to several pathophysiologic indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative ^{13}C -glucose turnover studies show a profound decrease in neurotransmitter (glutamate-glutamine) cycling relative to oxidation in the sclerotic hippocampus. Increased extracellular glutamate (which has long been associated with increased seizure likelihood) is significantly linked with declining energetics as measured by ^{31}P MR, as well as with increased EEG measures of Teager energy, further arguing for a direct role of glutamate with hyperexcitability.

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

Фрагменты из рекомендаций авторам журналов издательства Emerald

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

Авторское резюме включает следующее.

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

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

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

Примеры, как не надо писать реферат, приведены на сайте издательства (<http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/abstracts.htm?part=3&>).

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

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

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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

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

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

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

При принятии рукописи к печати дополнительно на почтовый адрес редакции (630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 274, зам. гл. редактора Атапин В.Г., Скиба В.Ю.) высылаются оригиналы авторского лицензионного договора и экспертного заключения о возможности открытого опубликования статьи.

Все рукописи рецензируются.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РУКОПИСЕЙ

Текст набирается в русифицированном редакторе *Microsoft Word*. Формат оригиналов – **A4**. Шрифт – *Times New Roman*, размер шрифта основного текста – **14 пт**, параметры страницы – все поля **2 см**. Выравнивание по ширине. Межстрочный интервал **полуторный**. Абзацный отступ – **1,25 см**. Переносы включены. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть четкими и понятными, могут быть включены в текст статьи.

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

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

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

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

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

Научная публикация должна иметь следующую структуру

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

2. Аннотация:

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

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

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

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

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

6. Результаты и обсуждение.

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

8. Список литературы: 15–25 наименований источников (оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.05–2008 «Библиографическая ссылка»), не более 30 % собственных статей, не менее 50 % – литература за последние 10 лет, обязательно включайте иностранные источники (желательно не менее 50 %). Если работа была издана и на русском, и на английском (или других) языках, то в **Списке литературы** и в **References** лучше давать ссылку на переводную работу.

9. Англоязычный блок статьи подготавливается на следующей странице, сразу же после русскоязычного списка литературы. Правила оформления данного раздела работы представлены ниже.

10. Сведения для РИНЦ.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ АНГЛОЯЗЫЧНОГО БЛОКА СТАТЬИ

Обращаем особое внимание наших авторов, что в связи с планируемой подготовкой журнала к включению в международные базы данных библиографического описания и научного цитирования *Web of Science* и *Scopus* с 2014 г. существенно изменены правила оформления представляемых рукописей. Главная цель изменений состоит в том, чтобы сделать основные положения и выводы публикуемых в журнале статей доступными для широкой зарубежной аудитории, не владеющей русским языком. Особое значение теперь приобретают англоязычная аннотация к статье (*Abstract*) и список использованной автором литературы (*References*), поскольку именно они, а не текст самой статьи находят отражение в системах *Scopus* и *Web of Science*. По своему содержанию и информативности *Abstract* и *References* должны привлечь внимание зарубежных читателей к теме статьи. Соответственно в интересах автора со всей ответственностью подойти к подготовке этих блоков статьи и обеспечить их максимально высокое качество.

Англоязычная часть статьи должна включать в себя:

заголовок (Title), переведенный с русского языка. В переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непередаваемых названий собственных имен и других объектов, имеющих собственные названия; также не используется непередаваемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это также касается авторских аннотаций и ключевых слов;

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

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

ключевые слова (Keywords);

список литературы (References). Ссылки на источники в англоязычном списке должны совпадать со ссылками, представленными в русскоязычном списке использованной литературы.

Список **всей** использованной в статье литературы дается на **латинице** (источники на англ., фр., нем. и других языках – в оригинале, русскоязычные источники необходимо транслитерировать и переводить (правила оформления см. ниже)). Для автоматической транслитерации в латиницу рекомендуется обращаться на сайт <http://translit.ru> (стандарт транслитерации – **BSI**; настройка перед транслитерацией).

Информация об источниках финансирования исследования (Funding) (гранты, если необходимо).

Внимание! Авторам запрещается предоставлять переводы заголовков статей, аннотаций, ключевых слов и информации об источниках финансирования, подготовленные с помощью электронных переводных систем (работы с ошибками и некорректным переводом будут отклонены).

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ В АНГЛОЯЗЫЧНОМ БЛОКЕ СТАТЬИ*

Списки литературы в российских журналах включают в себя большое разнообразие русскоязычных источников: журналы, материалы конференций, сборники, монографии, патенты, диссертации, отчеты, законы, постановления и пр. Поэтому постоянно возникают вопросы, как готовить для *References* описания этих публикаций.

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

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

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

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

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

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

4) представление в *References* только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо, так как делает такое описание совершенно не читаемым (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;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ПРИМЕРЫ ССЫЛОК

Описание статьи из журналов:

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

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

Описание статьи из электронного журнала:

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

Если статья имеет DOI – обязательно указать его!

Описание статьи с DOI:

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

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

Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

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

Описание материалов конференций:

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

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

Sen'kin A.V. [Issues of vibration diagnostics of elastic spacecraft]. *Problemy teorii i praktiki v 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.

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

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

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

Описание переводной книги:

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

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

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

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

Описание неопубликованного документа:

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

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

Описание Интернет-ресурса:

Kondrat'ev V.B. *Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost'* [The global pharmaceutical industry]. Available at: http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmatsevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html. (accessed 23.06.2013)

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

Описание диссертации или автореферата диссертации:

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

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

Описание ГОСТа:

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

или

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

Описание патента:

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

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

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

Описание анонимных документов:

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

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

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

RF Federal Law "On Protection of Consumers' Rights" of February 07, 1992 N 2300-1 (as amended by Federal Law of January 09, 1996 N 2 FZ, December 17, 1999 N 212 FZ). (In Russian)

Пример оформления статьи

УДК 621.9.06:518.4

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

*В.Г. ИВАНОВ, доктор техн. наук, профессор,
канд. техн. наук, доцент*

*В.С. ПЕТРОВ, аспирант, магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск)*

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

Аннотация (не менее 10 строк, 850 знаков)

Ключевые слова

<Текст статьи с четко выраженной структурой>

1. Введение

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

3. Результаты и обсуждение

4. Выводы

5. Список литературы (15–25 наименований, не более 30 % ссылок на свои публикации)

<Англоязычный блок статьи (с новой страницы)>

Choice of design parameters of base details at the design stage

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

Petrov V.S.², Ph.D. student, e-mail: petrov_v@mail.ru

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

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

Abstract (не менее 250 слов)

Keywords

References

Funding

На отдельном листе приводится информация для РИНЦ (исполнение обязательно).

Пример оформления сведений для РИНЦ

УДК 621.9.06:518.4

Выбор конструктивных параметров базовых деталей на этапе проектирования

¹Иванов Владимир Григорьевич, ²Петров Виктор Сергеевич, ... (**Ф.И.О. указывается полностью и для всех соавторов!**)

¹Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

²Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, г. Барнаул, 656038, Россия

Иванов В.Г. e-mail: metal_working@mail.ru

Петров В.С. e-mail: petrov_v@mail.ru

Аннотация

Рассматривается расчет упругих деформаций фундамента тяжелого многоцелевого станка на абсолютно жестком основании и на упругом винклеровом основании. Показано, что от толщины фундамента существенно зависит деформирование его поверхности... (**не менее 10 строк, 850 знаков**)

Ключевые слова:

фундамент, многоцелевой станок, упругие деформации, метод конечных элементов...

Список литературы

1. Каминская В.В., Решетов Д.Н. Фундаменты и установка металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1975. – 208 с.

2. Атапин В.Г. Проектирование рациональных несущих конструкций многоцелевых станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2008. – №4(41). – С. 18–25.

3. Атапин В.Г. Оценка параметров несущих конструкций тяжелого многоцелевого станка на этапе проектирования // Вестник машиностроения. – 2007. – № 2. – С. 61–64.

(15–25 наименований)

Choice of design parameters of base details at the design stage

¹Ivanov V.G., ²Petrov V.S., ...

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

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

Abstract

The calculation of the elastic deformations of the heavy multi-purpose machine for absolutely rigid basis and on an elastic basis is considered. It is shown that the thickness of substantially depends on the deformation of its surface. ... (**не менее 250 слов**)

Keywords

foundation, machining center, elastic deformations, finite element method.



**III Международная научно-практическая конференция
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ»**

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

30 Марта/March 2016 г.

30 марта 2016 г., с 10-30 до 17-00 ч. – общее заседание в конференц-зале «ITE Сибирь» в рамках Международной выставки машиностроения и металлообработки MASHEX SIBERIA по адресу: г. Новосибирск, ул. Станционная, 104, МВК «Новосибирск Экспоцентр».

Тематика конференции

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

Публикация материалов

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

Организаторы конференции

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

Соорганизаторы

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

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

Почетный комитет

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

Программный комитет

- *Батаев А.А.*, главный редактор научно-технического и производственного журнала «Обработка металлов», профессор, д.т.н., ректор НГТУ (г. Новосибирск), **председатель;**
- *Коротков А.Н.*, академик РАЕ, профессор, д.т.н., КузГТУ (г. Кемерово), **сопредседатель;**
- *Атапин В.Г.*, зам. главного редактора журнала «Обработка металлов», профессор, д.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), **сопредседатель.**

Члены программного комитета: *Иванцовский В.В.*, профессор, д.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), *Ленивцева О.Г.*, к.т.н. (г. Новосибирск), *Лобанов Д.В.*, д.т.н., профессор, БГУ (г. Братск), *Трегубчик П.В.*, гл. технолог ОАО «Новосибирский стрелочный завод» (г. Новосибирск), *Янпольский В.В.*, к.т.н., доцент, декан МТФ НГТУ (г. Новосибирск)

Организационный комитет

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

Секретариат конференции

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

Регистрация

Для участия в конференции необходимо в срок до **20 февраля 2015 г.** зарегистрировать свою рукопись на сайте журнала «Актуальные проблемы в машиностроении» <http://journals.nstu.ru/machine-building>.

Для того чтобы подать статью, автор и все соавторы должны быть зарегистрированы на сайте журнала (при регистрации профиля автора должны быть заполнены все поля). Автор (один из соавторов) в своем кабинете выбирает в меню пункт «*Подать статью*» и вводит все необходимые данные. Своих соавторов при этом он выбирает из списка зарегистрированных пользователей.

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

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

Подготовка рукописи

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

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

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

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

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

Одновременно со статьей высылаются оригиналы всех перечисленных документов на почтовый адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 274, зам. гл. редактора Атапину В.Г., Скибе В.Ю.

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

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

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

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

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

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

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

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

Научная публикация должна иметь следующую структуру:

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

2. **Аннотация:**

• **на русском языке** на основе ГОСТ 7.9-95 – сжатый обзор содержания работы указывает на ключевые проблемы, на подход к этим проблемам и на достижения работы; следует применять значимые слова из текста статьи;

• **на английском языке** – состоит из 100–150 слов, рекомендуется следовать хронологии статьи, использовать англоязычную специальную терминологию, не включать несущественные детали и использовать активный, а не пассивный залог, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке).

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

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

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

6. **Результаты и обсуждение.**

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

8. **Список литературы:** оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка». Составляется по ходу упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Ссылки в тексте на литературу даются в квадратных скобках, например, [1], [2, 3], [4–7], [4, стр. 23–28]. Внимание, авторы: в работе не должно быть более 30 % собственных статей, не менее 50 % литературы за последние 10 лет, обязательно должны быть иностранные источники (желательно не менее 50 %).

9. **Англоязычный блок статьи** подготавливается на следующей странице сразу же после русскоязычного списка литературы. Правила оформления данного раздела работы представлены ниже.

10. **Сведения для РИНЦ** (пример оформления представлен ниже).

Правила оформления англоязычного блока статьи

Англоязычная часть статьи должна включать в себя следующее

Заголовок (Title), переведенный с русского языка. В переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме неперебиваемых названий собственных имен и других объектов, имеющих собственные названия; также не используется неперебиваемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это также касается авторских аннотаций и ключевых слов.

Аффилиация (Affiliation).

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

Аннотация (Abstract) – состоит из **100–150 слов**, рекомендуется следовать хронологии статьи, использовать англоязычную специальную терминологию, не включать несущественные детали и использовать активный, а не пассивный залог, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке).

Ключевые слова (Keywords).

Информация об источниках финансирования исследования (Funding) (гранты, если необходимо).

Внимание! Авторам запрещается предоставлять переводы заголовков статей, аннотаций, ключевых слов и информации об источниках финансирования, подготовленные с помощью электронных переводных систем (работы с ошибками и некорректным переводом будут отклонены).

Материалы, присланные после 20 февраля 2016года к опубликованию не принимаются.

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

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

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

При посещении выставки и конференции регистрация обязательна!

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

Адрес для направления материалов конференции: e-mail: metal_working@mail.ru

Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корп. 5, к. 274

Новосибирский государственный технический университет,
заместители главного редактора журнала «Обработка металлов»:

Атапин Владимир Григорьевич, тел. (383) 346-17-77 • *Скиба Вадим Юрьевич*, тел. (383) 346-17-79

Пример оформления статьи

УДК 621.9.06:518.4

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

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

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

Аннотация

Ключевые слова

<желательная структура текста представляемого материала >

1. Введение

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

3. Результаты и обсуждение

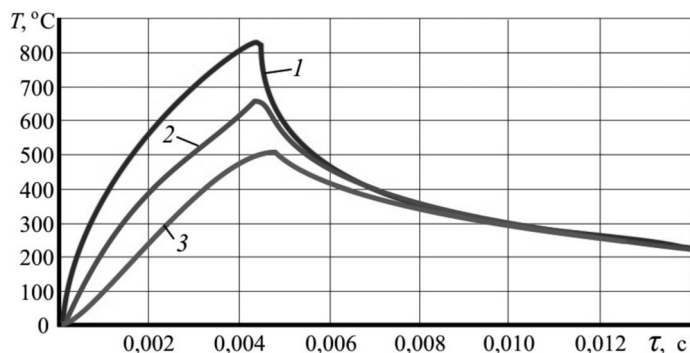


Рис. 1. Пример оформления рисунка

Таблица 1

Пример оформления таблицы

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

4. Выводы

5. Список литературы

Choice of design parameters of base details at the design stage

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

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

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

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

Abstract (100–150 слов)

Keywords

Пример оформления сведений для РИНЦ

УДК 621.9.06:518.4

Выбор конструктивных параметров базовых деталей на этапе проектирования

¹Иванов Владимир Григорьевич, ²Петров Виктор Сергеевич,(Ф.И.О. указывается полностью и для всех соавторов!)

¹Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

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

Иванов В.Г. e-mail: metal_working@mail.ru

Петров В.С. e-mail: petrov_v@mail.ru

Аннотация

Рассматривается расчет упругих деформаций фундамента тяжелого многоцелевого станка на абсолютно жестком основании и на упругом винклеровом основании. Показано, что от толщины фундамента существенно зависит деформирование его поверхности...

Ключевые слова

фундамент, многоцелевой станок, упругие деформации, метод конечных элементов...

Список литературы

1. Каминская В.В., Решетов Д.Н. Фундаменты и установка металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1975. – 208 с.
2. Атапин В.Г. Проектирование рациональных несущих конструкций многоцелевых станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2008. – №4(41). – С. 18–25.
3. Атапин В.Г. Оценка параметров несущих конструкций тяжелого многоцелевого станка на этапе проектирования // Вестник машиностроения. – 2007. – № 2. – С. 61–64.

Choice of design parameters of base details at the design stage

¹Ivanov V.G., ²Petrov V.S., ...

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

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

Abstract

The calculation of the elastic deformations of the heavy multi-purpose machine for absolutely rigid basis and on an elastic basis is considered. It is shown that the thickness of substantially depends on the deformation of its surface. ...

Keywords

foundation, machining center, elastic deformations, finite element method.

Пример оформления лицензионного договора

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

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

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

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

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

3. Автор гарантирует, что:

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

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

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

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

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

4. Автор обязуется:

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

4.2. Читать корректуру статьи в сроки, предусмотренные графиком выхода Сборника;

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

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

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

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

5. Издатель обязуется:

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

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

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

6. Издатель гарантирует, что без согласия Автора:

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

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



7. Издатель имеет право:

7.1. Допечатывать тираж Сборника со Статьей Автора при поступлении дополнительных заявок;

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

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

Авторы:

 / В.Г. Иванов /  / В.С. Петров /

Дата: 1 февраля 2016 года

На 28 Международной московской книжной выставке-ярмарке научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» стал победителем в номинации «Лучшее периодическое издание».



Поздравляем!



На юбилейном 30-м Американском форуме изобретений и новых продуктов «INPEX-2015» (г. Питтсбург, шт. Пенсильвания) д.т.н., профессор СибГИУ

Афанасьев Владимир Константинович

получил Гран-при

за «Водородную платформу периодической системы элементов», которая была представлена Ассоциацией «Российский дом международного научно-технического сотрудничества», действующей под эгидой Минобрнауки РФ.

Награда выдана Всемирной организацией интеллектуальной собственности WIPO.

Это вторая награда проф. В.К. Афанасьева. На 64-й Международной выставке IENA-2012 «Идеи – Изобретения – Новые продукты» (г. Нюрнберг, Германия) его «Водородная платформа...» была удостоена золотой медали за выдающиеся достижения.

Статьи В.К. Афанасьева «Водородная платформа периодической системы элементов» были впервые опубликованы в журнале «Металлургия машиностроения» №2-2011, №3-2012 и в сборнике докладов VII Международного Конгресса «Цветные металлы и минералы» (Красноярск, 2015).

Практическое отражение предлагаемой Платформы представлено в журналах «Инструмент Сибири», «Обработка металлов», «Металлургия машиностроения», «Литейное производство» и многих других.



Структура распространения:

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

Регионы распространения:

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

Структура читательской аудитории

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

Журнал представлен:

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

- электронная версия журнала доступна на платформе eLIBRARY.RU.

График выхода журнала в течение текущего года

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

Адрес редакции журнала:

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

Тел.: Атапин В.Г. (383) 346-17-77,
Скиба В.Ю. (383) 346-17-79
E-mail: metal_working@mail.ru



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

Тематика работы конференции:

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

Официальный сайт конференции:

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



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

Цветная реклама на обложке (формат А4):

- 2 страница – 18 000 руб.
- 3 страница – 15 000 руб.
- 4 страница – 20 000 руб.

