

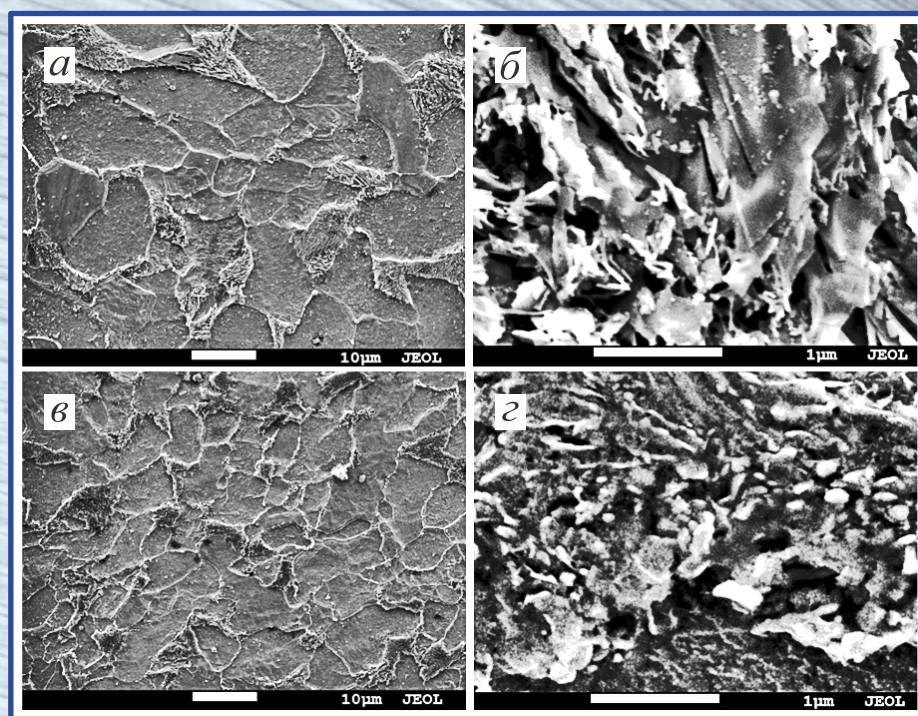
ОБРАБОТКА

ISSN 1994-6309

МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

№ 1 (70) ЯНВАРЬ–МАРТ 2016 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



Микроструктура и морфология перлита стали 09Г2С, подвергнутой ВК в исходном крупнозернистом состоянии (а, б) и после предварительного РКУП (в, г)

НОВОСИБИРСК

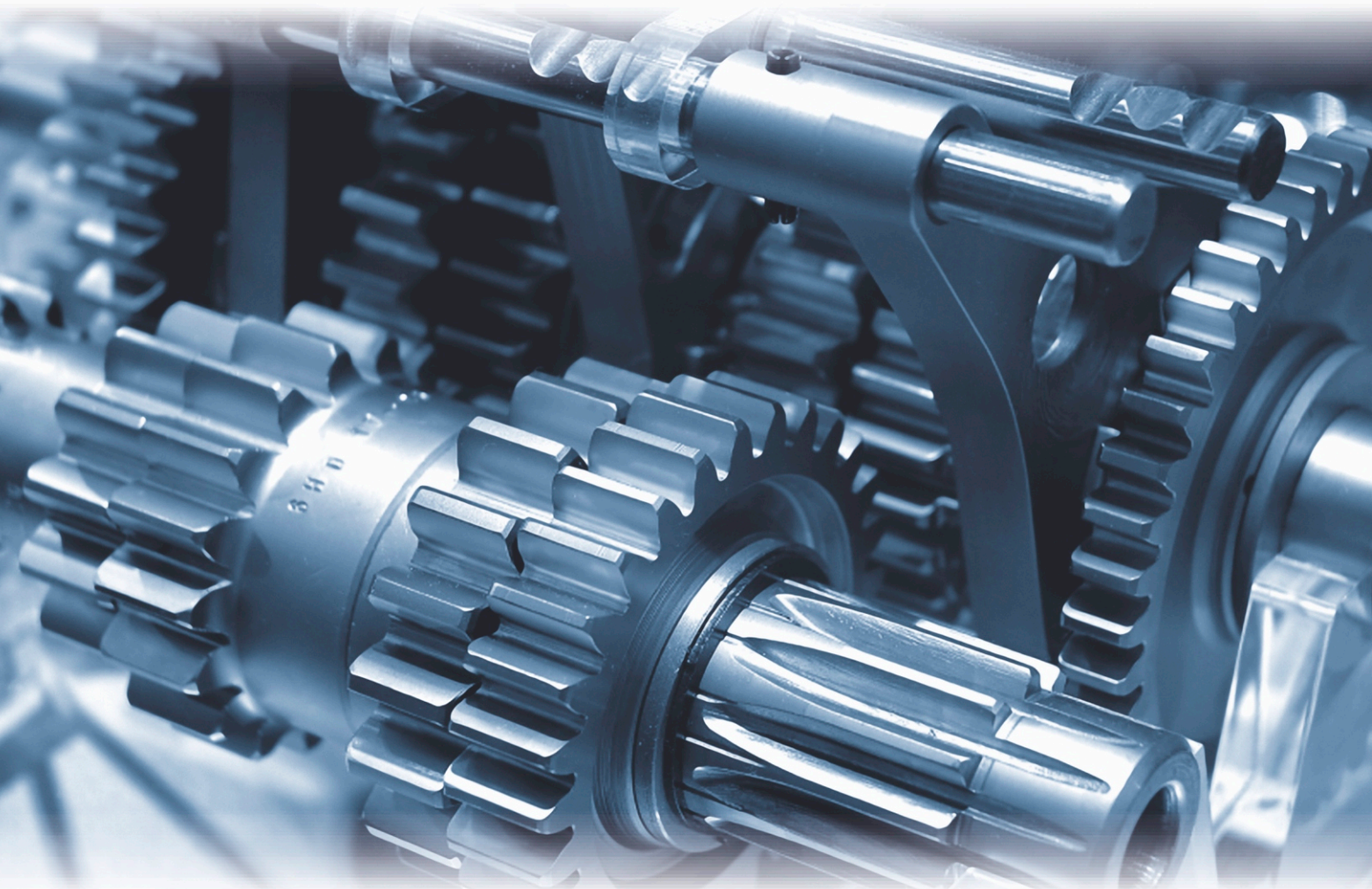


Выставка оборудования
для металлообработки и сварки

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**
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ЖУРНАЛ

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309

№ 1 (70) ЯНВАРЬ–МАРТ 2016 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

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

Члены совета

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

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

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

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

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

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

СОУЧРЕДИТЕЛИ

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Атапин Владимир Григорьевич – профессор,
доктор технических наук

Скиба Вадим Юрьевич – доцент, кандидат технических наук

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

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

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

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

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

Индекс: **70590** («РОСПЕЧАТЬ»)

Адрес редакции:

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

Тел. (383) 346-17-77

Сайт журнала http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov
E-mail: metal_working@mail.ru

Цена свободная

Перепечатка материалов из журнала «Обработка металлов» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ

Ларичкин А.Ю., Захарченко К.В., Горев Б.В., Капустин В.И. Физическое моделирование технологического процесса формообразования элементов конструкций из алюминиевого сплава В95 в условиях ползучести.....	6
Голышев А.А. Стандартизация лазерно-кислородной резки по критерию шероховатости поверхности.....	16
Рахимьянов Х.М., Рахимьянов А.Х., Смирнов А.Н. Особенности формирования канала реза при тонкоструйной плазменной резке биметаллических композиций, выполненных из разнородных материалов.....	22

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

Атапин В.Г. Оптимизация конструкций многоцелевого станка с учетом точности и производительности.....	31
---	----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Шаркеев Ю.П., Ковалевская Ж.Г., Химич М.А., Ибрагимов Е.А., Сапрыкин А.А., Яковлев В.И., Батаев В.А. Исследование строения и фазового состава порошков Ti и Nb после механической активации.....	42
Яковлева С.П., Махарова С.Н., Мордовской П.Г. Влияние комбинированной мегапластической деформации на структуру и свойства стали 09Г2С.....	52
Тихомирова Л.Б., Ильиных А.С., Галай М.С., Сидоров Э.С. Влияние нормализации на структуру и механические свойства алюминотермитных сварных соединений рельсов.....	60
Рекомендации по написанию научной статьи	67
Подготовка аннотации	69
Правила для авторов	72

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

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

Подписано в печать 02.03.2016. Выход в свет 15.03.2016. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ.л. 10,0. Уч.-изд. л. 18,6. Изд. № 47. Заказ 330. Тираж 300 экз.

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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

ISSN 1994-6309

Journal no.1(70) January–March 2016

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

Editor of the English translation:

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

The magazine is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year

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

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

Tel.: (383) 3461777

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

E-mail: metal_working@mail.ru

EDITORIAL COUNCIL

CHAIRMAN:

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

MEMBERS:

The Federative Republic of Brazil:

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

The Federal Republic of Germany:

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

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

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

The Republic of Belarus:

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

The Ukraine:

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

The Russian Federation:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CONTENTS

TECHNOLOGY

Larichkin A.Yu., Zakharchenko K.V., Gorev B.V., Kapustin V.I. Experimental modeling of technological process of pure aluminum alloy (Al-Zn-Mg-Cu) structural elements forming under creep.....	6
Golyshev A.A. Standardization of oxygen-assisted laser cutting by the surface roughness criterion.....	16
Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov A.Kh., Smirnov A.N. Features of cut channel formation during high-precision plasma cutting of bimetallic compositions made of promiscuous materials.....	22

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

Atapin V.G. Optimization of multifunction machines constructions with required accuracy and productivity.....	31
--	----

MATERIAL SCIENCE

Sharkeev Yu.P., Kovalevskaya Zh.G., Khimich M.A., Ibragimov E.A., Saprykin A.A., Yakovlev V.I., Bataev V.A. Investigation of the structure and phase composition of Ti and Nb powders after mechanical activation.	42
Yakovleva S.P., Makharova S.N., Mordovskoi P.G. Structure and mechanical properties of the low-carbon steel after severe plastic deformation and forging.....	52
Tikhomirova L.B., Ilinykh A.S., Galay M.S., Sidorov Je.S. The effect of normalization on the structure and mechanical properties of rails aluminothermitic welded joints.....	60
Guidelines for Writing a Scientific Paper	67
Abstract requirements	69
Rules for authors	72

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В95 В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ*

А.Ю. ЛАРИЧКИН^{1,2}, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., ассистент

К.В. ЗАХАРЧЕНКО^{1,3}, аспирант, м.н.с., ассистент

Б.В. ГОРЕВ¹, доктор техн. наук, вед. науч. сотр.

В.И. КАПУСТИН³, канд. тех. наук, доцент

*(¹Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
СО РАН, г. Новосибирск,*

²НГУ, г. Новосибирск,

³НГТУ, г. Новосибирск)

Поступила 9 ноября 2015

Рецензирование 11 января 2016

Принята к печати 11 февраля 2016

Ларичкин А.Ю. – 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15,
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
e-mail: larichking@gmail.com

Выполнено моделирование технологического процесса формообразования панели заданной геометрии из сплава В95очТ2, включающего в себя пластическое деформирование в диапазоне скоростей от 10^{-5} до 10^{-2} с⁻¹ при нормальной (20 °С) температуре, температуре искусственного старения (165 °С) и при температуре отжига (420 °С) с последующей термообработкой по режиму Т2 в соответствии с производственной инструкцией ПИ 1.2.699–2007. Экспериментально установлено влияние параметров процесса (температуры и скорости деформирования) на усталостную долговечность. Показано, что для сплава В95очТ2 сопротивление усталостному разрушению не уменьшается после предварительного деформирования при температуре отжига.

Ключевые слова: технология формообразования, скорость деформирования, температура, ползучесть, долговечность.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-6-15

Введение

К прочностным и весовым характеристикам элементов конструкций современных летательных аппаратов предъявляют высокие требования, которые достигаются внедрением новых алюминиевых сплавов и технологий их обработки при создании готового изделия [1, 2, 3]. Одним из широко используемых деформируемых, высокопрочных алюминиевых сплавов является

В95 [4, 5], из которого изготавливают несущие элементы фюзеляжа, центроплана и крыльев ряда самолетов, в том числе и для континентального лайнера Сухой SuperJet SSJ 100.

В связи с усовершенствованием форм летательных аппаратов стали востребованными методы формовки поверхностей сложной геометрии из прямоугольных монолитных плит при повышенных температурах. По сравнению с изготовлением элементов сборных конструкций

* Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ: № 13-01-0048, 14-08-31352, 15-01-07631, 16-08-00483.

такие методы формовки позволяют сохранить ресурс, уменьшить вес, избавиться от сборочных и подгоночных работ на стадии изготовления изделия. Технологии формовки крупногабаритных элементов конструкций, позволяющие за один технологический шаг совместить процессы релаксации и термической обработки материала изделия, применяются на отечественных авиационных заводах, в том числе НАЗ им. В.П. Чкалова [6].

В большинстве случаев технология изготовления элементов авиационных конструкций включает в себя операции формообразования в ненагретом состоянии, при которых материал испытывает воздействие ударных нагрузок, что способствует появлению в изделии недопустимо больших остаточных напряжений и трещин, которые приводят к ухудшению усталостных характеристик и снижению ресурса конструкции в целом.

В работе [7] исследовано влияние на механические свойства алюминиевого сплава 7075 (Al-Zn-Mg-Cu) высоких скоростей деформирования (от $1,3 \cdot 10^3$ до $3,1 \cdot 10^3$ с⁻¹) в диапазоне температур от 25 до 300 °С. Сплав 7075 является зарубежным аналогом В95. Авторами проводилось сравнение свойств состаренных образцов и образцов в состоянии поставки. Показано, что скорость деформации и температура существенно влияют на эволюцию микроструктуры и морфологию зерна. Средний размер зерна после ударной деформации может быть выражен отношением Холла-Петча.

В статье [8] рассмотрено изменение динамического размягчения сплава 7075 в зависимости от температуры (250, 300, 350, 400 и 450 °С) и скоростей деформирования (0,01; 0,1; 1 и 10 с⁻¹) при сжатии. Показано, что изменение температуры существенно влияет на скорость динамического размягчения. Получена зависимость напряжения от значений деформации, скорости деформации и температуры.

В работе [9] показано, что механизмом деформации для одноосных испытаний образцов из сплава 7075 при 300 и 350 °С являются скольжения по границам зерен, а также, что оптимальной скоростью сверхпластической деформации является $3 \cdot 10^{-1} \dots 10^{-2}$ с⁻¹. Граничная разориентация зерен и постоянность температуры являются двумя основными факторами, которые вносят вклад в высокие удлинения на разрыв.

Работа [10] посвящена экспериментальному исследованию образцов из сплава 7075 в состоянии поставки и в кованом состоянии при температурах (от 250 до 450 °С) и скоростях деформации (от 0,002 до 2 с⁻¹). Измерялась анизотропия материала при комнатной температуре для кованых образцов. Однородность и структуру материала оценивали с помощью измерения твердости по Виккерсу и оптической микроскопии. Одним из результатов работы стал факт слабой выраженности деформационной анизотропии материала во время испытаний при повышенных температурах по сравнению с существенным ее проявлением при холодной деформации.

В основе технологии формообразования конструкций лежит решение обратной задачи неупругого деформирования тела в условиях ползучести с последующим упругим распрямлением. Суть задачи заключается в определении такого усилия и формы оснастки для формования заготовки, которое обеспечит заданную кривизну изделия после снятия нагрузки. Математический аппарат для решения подобных задач приведен в работе [11]. Сложность решения этих задач связана как с существенной анизотропией свойств ползучести материала заготовки, так и с учетом разнсопротивляемости материала растяжению и сжатию. Современные подходы к решению ряда задач ползучести изложены в работах [12, 13].

В статье [14] показано численное решение задачи формования элемента конструкции двойной кривизны в условиях ползучести с учетом разнсопротивляемости материала растяжению и сжатию. В противном случае это может привести к различию между расчетными прогибами конструкции и прогибами, наблюдаемыми в эксперименте. В работе [15] дано решение задачи кручения пластины постоянным моментом с учетом анизотропии свойств материала, в которой отмечено, что наименее сопротивляющимся ползучести в анизотропной плите является направление под углом 45° к ее нормали.

Ответ на вопрос о влиянии характеристик технологического процесса: скорости и температуры формообразования заготовки на усталостную долговечность отформованных конструкций являются актуальными для современной авиастроительной отрасли производства. Выбор параметров формообразования связан с требова-

ниями к конечным физико-механическим свойствам материала. В настоящей работе авторами установлены зависимости влияния скорости и температуры предварительного деформирования на усталостную долговечность сплава В95, который является базовым конструкционным материалом для силовых деталей планера современных самолетов и вертолетов.

Физическое моделирование заключалось в воссоздании на лабораторных образцах из сплава В95 условий технологического процесса формообразования, который реализуется при изготовлении панелей сложной геометрии из изначально прямой плиты на установке УФП-1М [6]. Параметры процесса, при которых проводилась предварительная деформация образцов: в каждой области температур $T = 20, 165, 420$ °С изменялась скорость деформирования от 10^{-5} до 10^{-2} с $^{-1}$. Обработанные таким способом плоские образцы были испытаны на циклическую долговечность.

1. Методика экспериментального исследования

1.1. Определение параметров материала и подготовка образцов

Было подготовлено три серии образцов. Образцы вырезались из сплава В95счТ2, плита толщиной $h = 15$ мм. Целевая толщина заготовки 4 мм достигалась ее фрезерованием путем очередного снятия слоев с двух сторон. Чистота поверхности полученных образцов составляла Ra 0,32 (среднеквадратическое отклонение микронеровностей определялось по ГОСТ 2789–73). Образцы вырезались из плиты в двух ортогональных направлениях – вдоль и поперек проката. Образцы имеют прямоугольное поперечное сечение, значение которых приведено в табл. 1.

Образцы подвергались одноосному растяжению при различных скоростях деформирования в изотермических условиях. Испытания прово-

Таблица 1

Размеры образцов из сплава В95счТ2 и параметры их предварительного деформирования при температурах $T = 20, 165, 420$ °С

Номер	Направление относительно проката	a_0 , мм	b_0 , мм	$\dot{\varepsilon}$, с $^{-1}$	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	σ_2 МПа
Серия I ($T = 20$ °С)							
1	Вдоль	3,66	9,61	0,01	107,0	510	535,9
8	Вдоль	3,97	9,92	0,01	107,0	458	495,2
2	Поперек	3,93	9,61	0,01	107,0	499	534
Серия II ($T = 165$ °С)							
1*	Вдоль	3,86	9,92	0,01	107,0	403	399,8
2*	Вдоль	3,93	9,89	0,0001	103,0	382	381,4
3*	Вдоль	3,97	9,93	0,001	106,0	414	412,7
3	Вдоль	4,04	9,97	0,0001	94,9	375	373,3
7	Вдоль	3,97	9,92	0,01	71,6	440	440,9
13	Вдоль	4,03	10,00	0,0001	63,0	374	373,5
14	Вдоль	4,03	10,24	0,001	65,7	391	389,5
15	Вдоль	4,03	9,96	0,000002	51,7	293	268,4
4	Поперек	4,03	9,69	0,0001	92,2	373	371,1
6	Поперек	3,98	9,96	0,01	74,0	246	349,9
9	Поперек	3,95	9,95	0,01	68,0	318	324,2
11	Поперек	4,08	10,00	0,0001	66,2	440	385,6
12	Поперек	3,81	9,96	0,001	71,4	398	393,6
Серия III ($T = 420$ °С)							
1	Вдоль	3,99	9,87	0,01	25,6	53,95	51,35
2	Вдоль	4,00	9,94	0,0001	15,4	17,97	17,13
3	Вдоль	3,98	9,94	0,00001	9,7	11,48	10,75

Номер	Направление относительно проката	a_0 , мм	b_0 , мм	$\dot{\varepsilon}$, с^{-1}	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	σ_2 МПа
4	Вдоль	3,99	9,93	0,01	23,0	42,84	38,56
5	Вдоль	4,00	9,95	0,0001	13,5	15,74	16,33
6	Вдоль	3,99	9,94	0,00001	10,4	11,28	10,90
7	Вдоль	3,97	9,93	0,01	18,6	45,17	40,34
8	Вдоль	3,99	9,93	0,0001	12,0	16,81	16,75
9	Вдоль	3,97	9,91	0,00001	10,7	11,76	11,14

В таблице: a_0 , b_0 – толщина и ширина рабочей части образцов соответственно; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформирования; E – модуль упругости; $\sigma_{0,2}$ – значение напряжения при деформации 0,2 %; σ_2 – значение напряжения при деформации 2 %.

дильсь на установке Zwick/Roell Z100 (максимальное усилие 100 кН, чувствительность датчика усилия 0,01 Н) с использованием круглой трехзонной высокотемпературной печи Mytec (до 1100 °С). Нагрев до целевой температуры осуществлялся в течение 30 мин. Измерение деформаций выполнялось штатным экстензометром на базе 50 мм.

Образец помещали в печь, закрепляли в захватах установки и нагревали до целевой температуры. В программе установки задавалась скорость движения траверсы для каждого образца. Окончанием испытания было условие достижения деформации растяжения 2 %. В табл. 1 даны геометрические размеры образцов, скорости их деформирования и значения механических параметров материала для каждого из них:

1) серия I – образцы, подвергнутые предварительной полной деформации $\varepsilon = 2\%$ при $T = 20\text{ °C}$;

2) серия II – образцы, подвергнутые предварительной полной деформации $\varepsilon = 2\%$ при $T = 165\text{ °C}$;

3) серия III – образцы, подвергнутые предварительной полной деформации $\varepsilon = 2\%$ при $T = 420\text{ °C}$.

После предварительного деформирования образцы проходили термообработку: выдержка при $T = 470\text{ °C}$, закалка в воду и искусственное старение по режиму T2 в соответствии с ПИ 1.2.699–2007.

1.2. Испытания на усталость

Испытания на циклическую долговечность подготовленных вышеописанным способом образцов осуществлялись при

$T = 20\text{ °C}$ на сервогидравлической машине Instron 8801. Для измерения приращения компонентов тензора полных деформаций использовались экстензометры: № W-E-404-f «Transverse/Diametral Extensometer» – в продольном и № 2620-601 «Dynamic Extensometer» – в поперечном направлениях.

Образцы испытывали при регулярном нагружении с частотой циклов 10 Гц. Цикл напряжений отнулевой. Максимальное напряжение цикла для каждого образца составляло 250 МПа. Напряжения для усталостных испытаний определяли при помощи параметрической диаграммы деформирования (рис. 1), описанной в работе [16].

Диаграмма деформирования, представленная на рис. 1, получена при отнулевом цикле нагружения и построена в координатах $\varepsilon_{y \max}$ от $\sigma_{x \max}$, где $\varepsilon_{y \max}$ – максимальные поперечные деформации, соответствующие $\sigma_{x \max}$ – максимальному напряжению в цикле.

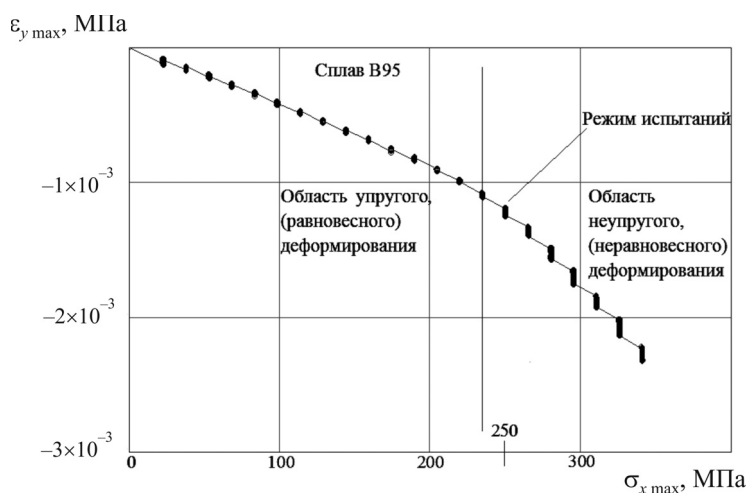


Рис. 1. Диаграмма периодического деформирования образца сплава В95 при ступенчатом увеличении нагрузки

Диаграмма позволяет найти область перехода от упругого к неупругому (неравновесному) деформированию и определить характеристики цикла напряжений при усталостных испытаниях. Из рис. 1 видно, что максимальные напряжения цикла 250 МПа соответствуют первой ступени, при которой в материале активизируются диссипативные процессы при периодическом нагружении. Современные результаты исследований по образованию микро- и макротрещин в конструкциях из алюминиевых сплавов при усталостных режимах нагружения приведены в работе [17].

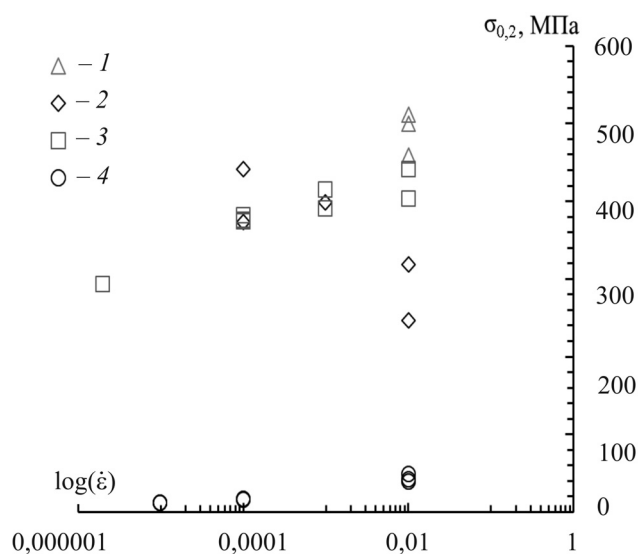


Рис. 2. Зависимость $\sigma_{0,2}$ от скорости деформирования и направления проката заготовок:

1 – серия I – образцы, вырезанные вдоль и поперек проката; 2 – серия II – поперек проката; 3 – серия II – вдоль проката; 4 – серия III – вдоль проката

2. Результаты экспериментов

На рис. 2 показана зависимость $\sigma_{0,2}$ от логарифма скорости деформаций для каждой серии испытаний. Из графиков видно, что в случае повышенных температур имеется тенденция к росту значения $\sigma_{0,2}$ для образцов, вырезанных вдоль проката при увеличении скорости деформаций, а также наблюдается тенденция к уменьшению значения $\sigma_{0,2}$ для поперечных образцов при увеличении скорости деформации.

В сериях испытаний I и II после достижения целевого значения деформации образец разгружался полностью. В серии испытаний III после достижения целевого значения деформации фиксировалось положение траверс машины

и происходил процесс релаксации до момента времени, который указан в регламенте формообразования элементов конструкций из сплава В950чТ2 в отчете Научно-технического центра «Ползучесть» на базе НАЗ им. В.П. Чкалова, г. Новосибирск.

На рис. 3 изображены σ – ϵ диаграммы образцов серии III. Числами обозначены номера образцов этой серии (см. табл. 1, серия III).

Стоит отметить, что после остановки движения траверс машины по достижении $\epsilon = 2\%$ до определенного момента времени шел рост деформации при спаде усилия (см. рис. 3). По достижении этого момента деформация начинала уменьшаться. Такое запаздывание можно связать с тем, что в момент начала стадии релаксации фиксировалась деформация всего образца, а не базы измерений. Так может проявляться эффект последствия или эффект обратной ползучести материала. Важно отметить, что для элементов конструкций из данного материала, отформованных указанным образом, возможны отклонения от целевых размеров с погрешностью 0,03...0,05 %.

В табл. 2 представлены значения числа циклов до разрушения трех серий образцов.

На рис. 4 представлены зависимости числа циклов до разрушения от скорости предварительной деформации, полученные по данным табл. 2, сгруппированные по сериям испытаний.

На рис. 4 показано, что с уменьшением скорости предварительного деформирования материала при температуре 420 °С (серия III) сопротив-

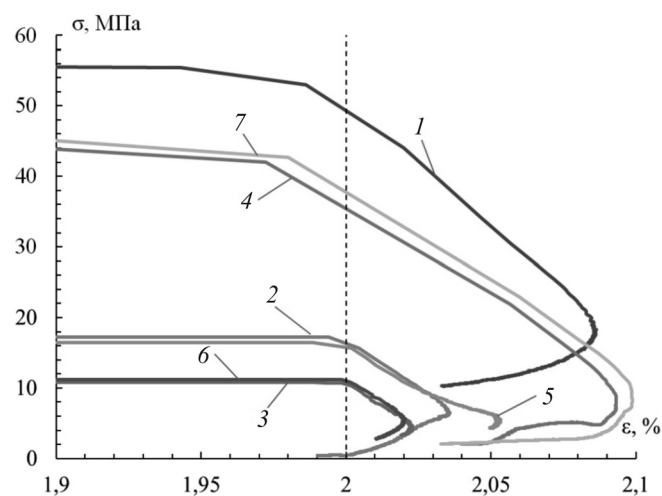


Рис. 3. Рост и уменьшение деформации на базе замеров продольной деформации после остановки траверс машины

Результаты усталостных испытаний трех партий образцов из сплава В950чТ2

Номер образца	a , мм	b , мм	$\dot{\epsilon}$, с^{-1}	$F_{\max}$, Н	N	Направление
Образцы серии I						
8	3,80	9,70	0,01	9216	50821	Вдоль
4	3,919	9,796	0,001	9597	76236	–
9	3,95	10,0	0,001	9875	105680	–
5	3,916	9,887	0,0001	9679	73935	–
*8	3,70	9,70	0,0001	8972	124578	–
Образцы серии II						
1	3,70	9,75	0,01	9020	95792	Вдоль
2	3,80	9,70	0,01	9216	113727	Вдоль
*7	3,928	9,86	0,01	9681	67414	Вдоль
3	3,70	9,65	0,001	8928	119182	Вдоль
*5	3,85	9,80	0,0001	9432	95538	Вдоль
8	3,9	9,79	0,01	9546	115423	–
7	3,89	9,82	0,01	9550	107777	–
5	3,91	9,79	0,001	9560	37202	–
6	3,877	9,86	0,01	9554	82215	Поперек
9	3,907	9,85	0,01	9624	72884	Поперек
Образцы серии III						
4	3,91	9,89	0,01	9654	86675	Вдоль
7	3,90	9,84	0,01	9594	96655	Вдоль
5	3,90	9,89	0,0001	9643	71982	Вдоль
8	3,91	9,89	0,0001	9667	45854	Вдоль
3	3,90	9,92	0,00001	-	57580	Вдоль
6	3,90	9,90	0,00001	9651	73766	Вдоль
9	3,90	9,87	0,00001	9623	49403	Вдоль

Здесь a и b значения поперечных размеров образца после термической обработки; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, при которой проходило растяжение образца в состоянии поставки; $F_{\max}$ – максимальное усилие в цикле; N – число циклов до разрушения.

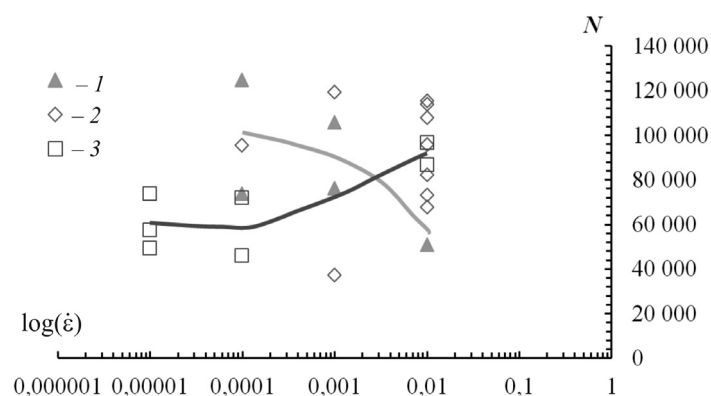


Рис. 4. Зависимость числа циклов до разрушения от скорости предварительной деформации для различных серий испытаний (см. табл. 2):

1 – серия I; 2 – серия II; 3 – серия III

ление усталостному разрушению снижается в 1,5 раза. Отмечено, что циклическая долговечность образцов серии III не уменьшилась по сравнению с образцами серии I для скоростей порядка 10^{-2} с^{-1} .

3. Обсуждение

Описанный в работе подход позволяет дать оценку влияния температуры и скорости предварительного деформирования на усталостную долговечность изделий из сплава В950чТ2 на основании экспериментальных методов исследования материалов. Статьи зарубежных авторов, посвященные различным методам деформирования алюминиевого

сплава 7075, который является аналогом сплава В95, не содержат непосредственной информации о влиянии скорости предварительного деформирования на усталостную долговечность. Сопоставимые значения усталостной долговечности при предварительном деформировании в случае нормальной и повышенной температур, а также существенное снижение напряжений при высокотемпературном деформировании показывают принципиальную возможность использования технологий формообразования конструкций из сплава В95 в режимах ползучести для современного самолетостроения.

Представленный в работе подход является перспективным для оценки влияния температуры и скорости деформирования на усталостную долговечность различных типов алюминиевых сплавов.

Выводы

В работе отражены экспериментальные данные по моделированию технологического процесса получения поверхности двойной кривизны из плиты сплава В95очТ2. Моделирование заключалось в проведении всех ступеней процесса на лабораторных образцах: предварительное деформирование при различных температурах и скоростях деформации (см. табл. 1, рис. 2), а также представлены результаты испытаний готовых образцов на усталостную долговечность (см. табл. 2, рис. 4) после закалки и термической обработки по режиму Т2.

Основные выводы

1. Установлена тенденция роста значения $\sigma_{0.2}$ материала с увеличением скорости деформирования в случае повышенных температур для образцов, вырезанных вдоль проката плиты.

2. Отмечено, что при релаксации образцов из серии III наблюдался эффект последействия (см. рис. 3). Уровень наблюдаемых деформаций показывает необходимость учета этого эффекта в проектировании формообразования крупногабаритных конструкций при повышенных температурах.

3. Показано, что значения усталостной долговечности материала В95очТ2 после предварительного деформирования при температуре старения (165 °С) с последующей термической обработкой становятся выше с уменьшением

скорости предварительного деформирования (см. рис. 4).

4. Экспериментально показано, что при увеличении скорости деформирования в серии III есть тенденция к увеличению числа циклов до разрушения. В серии I имеется тенденция к уменьшению числа циклов до разрушения, что коррелирует с результатами применения метода формования, предложенного в работе [18].

5. Предварительное деформирование образцов из сплава В95очТ2 при температуре отжига (420 °С) и скоростью деформирования 10^{-2} с^{-1} с последующей термообработкой по режиму Т2 не уменьшает сопротивление усталостному разрушению (в два раза) по сравнению с образцами, деформируемыми при температуре 20 °С.

Данные выводы позволяют определить оптимальные значения температуры и скорости деформирования для технологического процесса формообразования деталей сложной геометрии, производимых за один технологический цикл. Критерием оптимальности выступает значение высокой усталостной долговечности изделия. Процесс формообразования осуществляется в режиме ползучести, когда совмещены процессы деформирования и термообработки.

Список литературы

1. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Антипов В.В. Перспективные алюминиевые сплавы для самолетных конструкций // Технология легких сплавов. – 2007. – № 2. – С. 35–38.
2. Aluminum-lithium alloys: processing, properties, and applications / eds.: N.E. Prasad, A. Gokhale, R.J.H. Wanhil. – 1st ed. – [S. l.]: Elsevier Publ.: Butterworth-Heinemann, 2013. – 608 p. – ISBN 978-0-12-401698-9.
3. Fundamentals of aluminium metallurgy: production, processing and applications / ed. by R. Lumley. – 1st ed. – Oxford: Woodhead Publ., 2011. – 864 p. – ISBN 978-184569-654-2.
4. Фридляндер И.Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе. ВИАМ/2002-203509. – URL: <http://viam.ru/public/files/2002/2002-203509.pdf> (дата обращения: 15.02.2016).
5. ОСТ 1 90026–80. Сплавы алюминиевые деформируемые повышенной чистоты. Марки. – М.: ВИАМ, 1980. – 13 с.
6. Патент 2056197 Российская Федерация, МПК В 21 D 11/20. Способ формообразования деталей и устройство для его осуществления / П.В. Миодушев



ский, Г.А. Раевская, О.В. Соснин. – № 5037750/08; заявл. 15.04.92; опубл. 20.03.96. – 6 с.

7. Effect of aging on high strain rate and high temperature properties of 7075 aluminium alloy / W.S. Lee, W.C. Sue, C.F. Lin, C.J. Wu // *Materials Science and Technology*. – 1999. – Vol. 15, iss. 12. – P. 1379–1386. – doi: 10.1179/026708399101505509.

8. Dynamic softening behaviors of 7075 aluminum alloy / G. Quan, K. Liu, J. Zhou, B. Chen // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2009. – N 19. – P. 537–541.

9. Evolution of the microstructure, texture and creep properties of the 7075 aluminium alloy during hot accumulative roll bonding / P. Hidalgo-Manrique, C.M. Cepeda-Jiménez¹, A. Orozco-Caballero, O.A. Ruano, F. Carreño // *Materials Science and Engineering: A*. – 2014. – Vol. 606. – P. 434–442. – doi: 10.1016/j.msea.2014.03.105.

10. Naser T.S.B., Krallics G. Mechanical behavior of multiple-forged Al 7075 aluminum alloy // *Acta Polytechnica Hungarica*. – 2014. – Vol. 11, N 7. – P. 103–117. – doi: 10.12700/APH.11.07.2014.07.7.

11. Цвелодуб И.Ю. Постулат устойчивости и его приложения в теории ползучести металлических материалов. – Новосибирск: Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, 1991. – 201 с.

12. Altenbach H., Naumenko K. Modeling of creep for structural analysis. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2007. – 230 p. – ISBN-13 978-3-540-70834-6. – doi: 10.1007/978-3-540-70839-1.

13. From creep damage mechanics to homogenization methods: a Liber Amicorum to celebrate the birthday of Nobutada Ohno / H. Altenbach, T. Matsuda, D. Okumura, eds. – Cham: Springer International Publ., 2015. –

601 p. – ISBN 978-3-319-19439-4. – doi: 10.1007/978-3-319-19440-0.

14. Математическое моделирование процессов ползучести металлических изделий из материалов, имеющих разные свойства при растяжении и сжатии / С.Н. Коробейников, А.И. Олейников, Б.В. Горев, К.С. Бормотин // *Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии*. – 2008. – Т. 9, № 1. – С. 346–365.

15. Банищикова И.А., Цвелодуб И.Ю., Петров Д.М. Деформирование элементов конструкций из сплавов с пониженной сопротивляемостью деформациям ползучести в сдвиговом направлении // *Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки*. – 2015. – Т. 157, № 3. – С. 34–41.

16. Захарченко К.В., Капустин В.И. Влияние поверхностных слоев образцов на деформационные характеристики сплава Д16АТ // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2015. – Т. 81, № 7. – С. 51–56.

17. George C. Sih multiscale fatigue crack initiation and propagation of engineering materials: structural integrity and microstructural worthiness. – Dordrecht: Springer Netherlands Publ., 2008. – 371 p. – ISBN-13 978-1-4020-8519-2. – doi: 10.1007/978-1-4020-8520-8.

18. Патент 2396367 Российская Федерация, МПК С 22 F 1/053 (2006.01). Способ получения изделия из высокопрочного алюминиевого сплава / О.Г. Сенаторова, Е.А. Ткаченко, В.В. Сидельников, В.В. Антипов, Н.Е. Блинова, В.В. Шестов, Е.В. Красова. – № 2008141034/02; заявл. 16.10.08; опубл. 10.08.10, Бюл. № 22. – 7 с.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (70), January – March 2016, Pages 6–15

Experimental modeling of technological process of pure aluminum alloy (Al-Zn-Mg-Cu) structural elements forming under creep

Larichkin A.Yu.^{1,2}, Ph.D. (Physics and Mathematics), Scientific associate, Assistant, e-mail: larichking@gmail.com

Zakharchenko K.V.^{1,3}, Ph.D. student, Junior researcher, Assistant, e-mail: zaharchenkok@mail.ru

Gorev B.V.¹, D.Sc. (Engineering), Leading researcher, e-mail: gorevbv@yandex.ru

Kapustin V.I.³, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: macler06@mail.ru

¹Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the RAS, 15 Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

²Novosibirsk State University, 2 Pirogova Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

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

Abstract

Due to the improvement of the forms of aircraft, methods of complex surfaces forming using rectangular solid plates and elevated temperatures have become popular. Compared with the production of prefabricated elements, such molding techniques allow saving resources, reducing weight, getting rid of assembly and fitting work on the stage of manufacturing. How different will the fatigue life of pre-deformed at different temperatures and deformation rates products be? The answer to this question is relevant to aerospace industry. A pilot study of the issue is conducted. Fatigue life of pure aluminum alloy (Al-Zn-Mg-Cu), depending on temperature of pre-deformation and strain rate is set.

Experimental modeling of fatigue life of pure aluminum alloy samples is made. Three series of samples previously plastically deformed at different strain rates (1 - at room temperature, 2 – artificial aging temperature and 3 – at the annealing temperature) were used. Plastically deformed samples were heat-treated using the mode T2 in accordance with the production instruction 1.2.699–2007 PI. The effect of the reverse creep at relaxation is shown. This effect should be considered when designing the formation of large structural components at elevated temperatures. The number of cycles to failure at regular loading depends on temperature and deformation rate. Pure aluminum alloy (Al-Zn-Mg-Cu) fatigue resistance does not decrease after a pre-deformation at the annealing temperature.

Keywords:

processing technique, forming, strain rate, experiment, durability, aluminum alloy, creep, fatigue.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-6-15

References

1. Kolobnev N.I., Khokhlatova L.B., Antipov V.V. Perspektivnye alyuminiyevye splavy dlya samoletnykh konstruksii [Advanced aluminium-lithium alloys for aircraft structures]. *Tekhnologiya legkikh splavov – Technology of light alloys*, 2007, no. 2, pp. 35–38.
2. Prasad N.E., Gokhale A., Wanhil R.J.H., eds. Aluminum-lithium alloys: processing, properties, and applications. 1st ed. Elsevier Publ., Butterworth-Heinemann, 2013. 608 p. ISBN 978-0-12-401698-9
3. Lumley R., ed. Fundamentals of aluminium metallurgy: production, processing and applications. 1st ed. Oxford, Woodhead Publ., 2011. 864 p. ISBN 978-184569-654-2
4. Fridlyander I.N. *Sovremennye alyuminiyevye, magniyeve splavy i kompozitsionnye materialy na ikh osnove* [Modern aluminum, magnesium alloys, and composites developed on their base]. VIAM/2002-203509. Available at: <http://viam.ru/public/files/2002/2002-203509.pdf> (accessed 15.02.2016)
5. OST 1 90026–80. *Splavy alyuminiyevye deformiruemye povyshennoi chistoty. Marki* [Industry standard 1 90026–80. Premium aluminium wrought alloys. Grades]. Moscow, VIAM Publ., 1980. 13 p. (In Russian)
6. Miodushevskii P.V., Raevskaya G.A., Sosnin O.V. *Sposob formoobrazovaniya detalei i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method of forming parts and device for its realization]. Patent RF, no. 2056197, 1996.
7. Lee W.S., Sue W.C., Lin C.F., Wu C.J. Effect of aging on high strain rate and high temperature properties of 7075 aluminium alloy. *Materials Science and Technology*, 1999, vol. 15, iss. 12, pp. 1379–1386. doi: 10.1179/026708399101505509
8. Quan G., Liu K., Zhou J., Chen B. Dynamic softening behaviors of 7075 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, no. 19, pp. 537–541.
9. Hidalgo-Manrique P., Cepeda-Jiménez C.M., Orozco-Caballero A., Ruano O.A., Carreño F. Evolution of the microstructure, texture and creep properties of the 7075 aluminium alloy during hot accumulative roll bonding. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, vol. 606, pp. 434–442. doi: 10.1016/j.msea.2014.03.105
10. Naser T.S.B., Krallics G. Mechanical behavior of multiple-forged Al 7075 aluminum alloy. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2014, vol. 11, no. 7, pp. 103–117. doi: 10.12700/APH.11.07.2014.07.7
11. Tselodub I.Yu. *Postulat ustoichivosti i ego prilozheniya v teorii polzuchesti metallicheskich materialov* [The postulate of sustainability and its application to the creep theory of metallic materials]. Novosibirsk, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics Publ., 1991. 201 p.
12. Naumenko K., Altenbach H. *Modeling of creep for structural analysis*. Berlin, Heidelberg, Springer Publ., 2007. 230 p. ISBN 978-3-540-70834-6. doi: 10.1007/978-3-540-70839-1
13. Altenbach H., Matsuda T., Okumura D., eds. *From creep damage mechanics to homogenization methods: a Liber Amicorum to celebrate the birthday of Nobutada Ohno*. Cham, Springer International Publ., 2015. 601 p. ISBN 978-3-319-19439-4. doi: 10.1007/978-3-319-19440-0

14. Korobeinikov S.N., Oleinikov A.I., Gorev B.V., Bormotin K.S. Matematicheskoe modelirovanie protsessov polzuchesti metallicheskih izdelii iz materialov, imeyushchikh raznye svoistva pri rastyazhenii i szhatii [Mathematical simulation of creep processes in metal patterns made of materials with different extension compression properties]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye: novye vychislitel'nye tekhnologii – Numerical Methods and Programming*, 2008, vol. 9, no. 1, pp. 346–365.

15. Bانشchikova I.A., Tselodub I.Yu., Petrov D.M. Deformirovanie elementov konstruktssii iz splavov s ponizhennoi soprotivlyaemost'yu deformatsiyam polzuchesti v sdvigovom napravlenii. [Deformation of structural elements made of alloys with reduced resistance to creep in shear direction]. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie nauki – Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series*, 2015, vol. 157, no. 3, pp. 34–41.

16. Zakharchenko K.V., Kapustin V.I. Vliyanie poverkhnostnykh sloev obraztsov na deformatsionnye kharakteristiki splava D16AT [Comparative analysis of the surface layer effect on the stress-strain characteristics of D16AT Alloy]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 2015, vol. 81, no. 7, pp. 51–56.

17. Sih G.C., ed. *Multiscale fatigue crack initiation and propagation of engineering materials: structural integrity and microstructural worthiness*. Dordrecht, Springer Netherlands Publ., 2008. 371 p. ISBN-13 978-1-4020-8519-2. doi: 10.1007/978-1-4020-8520-8

18. Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Sidel'nikov V.V., Antipov V.V., Blinova N.E., Shestov V.V., Krasova E.V. *Sposob polucheniya izdeliya iz vysokoprochnogo alyuminievogo splava* [Procedure for production of item out of high-strength aluminium alloy]. Patent RF, no. 2396367, 2010.

Funding

The reported study was partially supported by RFBR, research projects No. 13-01-0048, 14-08-31352, 15-01-07631, 16-08-00483.

Article history:

Received 9 November 2015

Revised 11 January 2016

Accepted 11 February 2016

СТАНДАРТИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНО-КИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ ПО КРИТЕРИЮ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

**А.А. ГОЛЫШЕВ, аспирант
(ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск)**

Поступила 30 сентября 2015
Рецензирование 15 января 2016
Принята к печати 26 февраля 2016

Голышев А.А. – 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1,
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
e-mail: alexgol@itam.nsc.ru

Проведено исследование лазерно-кислородной резки листов низкоуглеродистой стали газоразрядным CO_2 -лазером и иттербиевым волоконным лазером с длиной волны излучения 10,6 и 1,07 мкм соответственно. Выполнена экспериментальная оптимизация лазерной резки по критерию минимальной шероховатости поверхности реза. Показано, что бороздчатая структура боковой поверхности реза неоднородна и имеет характерные особенности в верхней и нижней части образцов. Получено, что лазерно-кислородная резка низкоуглеродистой стали CO_2 -лазером обладает лучшим качеством поверхности образца после обработки по сравнению с резкой иттербиевым волоконным лазером. Установлено, что лазерная резка низкоуглеродистой стали соответствует 4...6 классу шероховатости. Получено, что с ростом толщины разрезаемого листа величина шероховатости изменяется по закону $R_z = 1,15t + 6,5$ – для резки CO_2 -лазером и $R_z = 3,7t + 3,8$ – для резки иттербиевым волоконным лазером.

Ключевые слова: лазерная резка, шероховатость поверхности, CO_2 -лазер, иттербиевый волоконный лазер.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-16-21

Введение

В последнее десятилетие лазерная резка металлов заняла лидирующее место в промышленности по сравнению с другими методами раскроя листовых материалов [1,2]. Использование лазерных технологий в обработке материалов обеспечивает высокую производительность и точность, экономит энергию и материалы, позволяет реализовать принципиально новые технологические решения и использовать труднообрабатываемые материалы, а кроме того, повышает экологическую безопасность работ. На сегодняшний день наиболее применяемыми в промышленности являются газоразрядный CO_2 -лазер с длиной волны 10,6 мкм и волоконные лазеры с длиной волны порядка одного микронметра [2, 3].

Процесс лазерной резки основан на локальном воздействии сфокусированного лазерного луча с материалом с последующим удалением расплава струей вспомогательного газа. Основные принципы и особенности лазерной резки описаны в работах [4–7]. Процесс лазерной резки происходит следующим образом. Лазерный луч с помощью линзы фокусируется на поверхности металла и нагревает его до температуры плавления. Соосно с лучом через газодинамическое сопло подается струя вспомогательного газа, которая служит для удаления продуктов резки. С помощью технологического стола лазерный луч передвигается относительно листа и образует узкий рез. Продукты резки в виде расплавленных частиц металла могут прилипать к нижней поверхности реза, образуя грат. Схема процесса лазерной резки представлена на рис. 1.

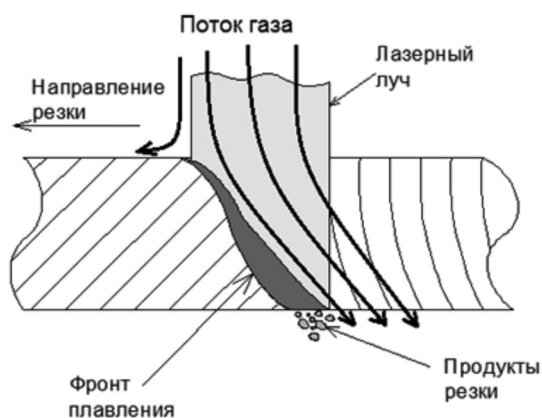


Рис. 1. Схема процесса лазерной резки

После процесса резки на боковой поверхности образца появляется углубленная бороздчатая структура (рис. 2). Бороздки расположены равномерно друг за другом. Они характеризуются тремя показателями: глубиной, частотой и формой [8, 9]. Именно бороздчатая структура имеет шероховатостью поверхности реза.

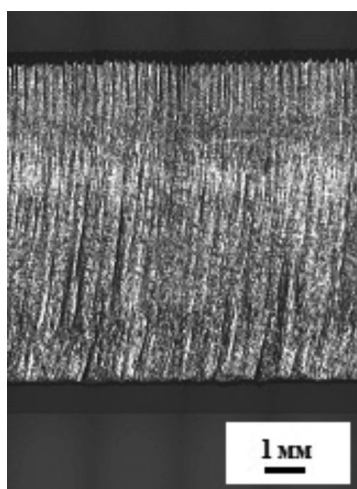


Рис. 2. Поверхность лазерного реза низкоуглеродистой стали толщиной 14 мм

Одним из наиболее важных параметров, характеризующим лазерную резку, является критерий качества обрабатываемой детали [10]. Основными показателями качества лазерной резки принято считать шероховатость поверхности и величину грата. Это связано в первую очередь с тем, что при минимальном значении этих параметров другие показатели качества реза имеют допустимые значения. Поэтому получение лазерного реза, обладающего минимальной шероховатостью и отсутствием грата в нижней части образца, представляет собой практический интерес. Следует особо отметить, что режим, облада-

ющий максимальной скоростью резки, может не являться оптимальным с точки зрения качества реза [11–14].

Главная задача, которая решается в данной работе, заключается в определении минимально возможной шероховатости поверхности заготовки после лазерной резки. Это позволит лучше понять возможности лазерной резки, так как на сегодняшний день до сих пор неизвестно, какими классами шероховатости характеризуется поверхность после лазерной обработки.

Методика эксперимента

В работе использовался иттербиевый волоконный лазер IPG/IRE-Polus мощностью 2 кВт и параметром BPP = 3,8 мм·мрад (BPP – Beam Parameter Product, произведение радиуса пучка в ближней зоне на угловой радиус пучка в дальней зоне) с коллиматором IPG, модель D5-WC/AC. Диаметр пучка на фокусирующей линзе после коллиматора – 17 мм, фокусное расстояние линзы – 200 мм. Использовался также газоразрядный CO₂-лазер [15] с самофильтрующим резонатором мощностью до 8 кВт и BPP = 4,7 мм·мрад. Диаметр пучка на фокусирующей линзе составлял 25 мм при фокусном расстоянии ZnSe линзы 190 мм.

В настоящей работе проведены исследования лазерно-кислородной резки листов низкоуглеродистой стали марки Ст3 различной толщины. В этом случае в качестве вспомогательного газа использовался кислород, который не только выдувает расплав из зоны резки, но и вступает в экзотермическую реакцию с металлом, в результате которой получается дополнительный источник энергии.

Основными параметрами, задаваемыми при газолазерной резке, являются мощность излучения W , скорость резки V , давление технологического газа P , а также толщина разрезаемого материала t . При практическом использовании лазерной резки необходимо понимать, как зависят параметры резки, прежде всего мощность лазерного излучения и скорость резки, от толщины разрезаемого листа. Это необходимо как для оценки производительности лазерной обработки материала, так и для улучшения качества обрабатываемой детали.

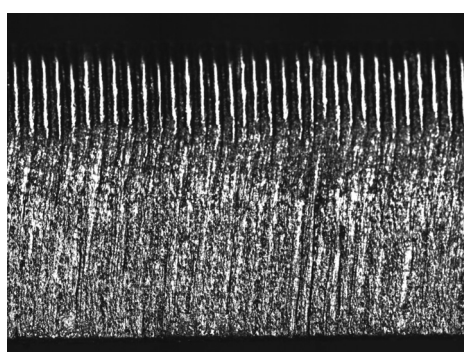
Большое внимание в работе уделяется оптимизации лазерной резки, которая проводилась

по критерию минимума шероховатости поверхности реза. Данный процесс проходил в несколько этапов. На начальном этапе для определенной мощности излучения находилось оптимальное положение фокусного пятна относительно поверхности металла. Этот параметр имеет большое влияние на ширину b и геометрию канала реза. Следующий этап заключается в определении оптимальной скорости резки V .

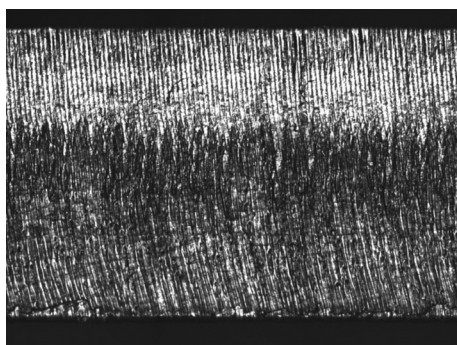
В качестве меры шероховатости (характерной высоты неоднородности) приняты величины R_z (высота неровностей профиля по десяти точкам) и R_a (среднее арифметическое отклонение профиля), которые измерялись при помощи лазерного конфокального сканирующего микроскопа Olympus LEXT и профилометра Rank Taylor Hobson серии Form Talysurf.

Результаты и обсуждение

В начале работы была проведена оптимизация лазерной резки по критерию минимальной шероховатости поверхности реза. На рис. 3



а



б

Рис. 3. Боковая поверхность реза низкоуглеродистой стали $t = 5$ мм, $W = 1$ кВт:

а – волоконный лазер ($V = 0,8$ м/мин);
б – CO_2 -лазер ($V = 1,5$ м/мин)

представлены фотографии боковой поверхности лазерного реза низкоуглеродистой стали толщиной 5 мм, обладающей минимальной шероховатостью. Видно, что бороздчатая структура неоднородна и имеет характерные особенности в верхней и нижней части образцов. Кроме того, видно, что боковая поверхность реза при использовании разных типов лазеров обладает различным качеством поверхности.

Так как боковая поверхность реза неоднородна (см. рис. 3), то для наиболее точного определения качества реза величины шероховатости измерялись в 30 сечениях S_i ($i = 0 \dots 30$) вдоль всей толщины заготовки. В результате была получена интегральная картина качества реза по всей толщине листа (рис. 4). Измеренные значения шероховатости представлены в таблице. Заметим, что наибольший интерес представляют значения $R_{z\text{низ}}$ и $R_{a\text{низ}}$, которые определяют максимально возможную шероховатость реза и измеряются в нижней части листа.

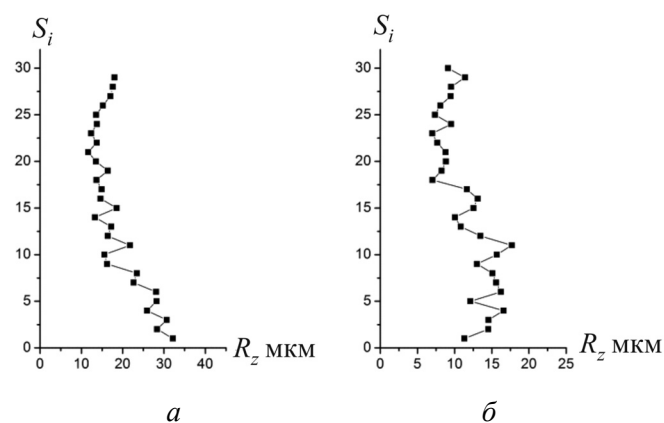


Рис. 4. Распределение шероховатости по толщине листа низкоуглеродистой стали при $t = 5$ мм, $W = 1$ кВт:

а – волоконный лазер ($V = 0,8$ м/мин); б – CO_2 -лазер ($V = 1,5$ м/мин)

Оптимальные значения шероховатости боковой поверхности лазерного реза для толщины 5 мм

Параметр	Волоконный лазер	CO_2 -лазер
Скорость резки (м/мин)	0,8	1,5
$R_{z\text{низ}}$ (мкм)	30	15
$R_{a\text{низ}}$ (мкм)	5,2	3,2

Из таблицы видно, что при лазерно-кислородной резке CO_2 -лазером оптимизированная величина шероховатости приблизительно в два раза меньше чем при резке иттербиевым волоконным лазером. Исходя из этого видно, что лазерная резка низкоуглеродистой стали с использованием различных типов лазеров характеризуется различным классом шероховатости.

Получив значения шероховатости для лазерно-кислородной резки листов толщиной 5 мм, найдем, как изменяется класс шероховатости с ростом толщины разрезаемого листа. Для этого проведем оптимизацию лазерной резки низкоуглеродистой стали листов толщиной 3, 10 и 16 мм по аналогичному критерию. На рис. 5 представлена зависимость шероховатости поверхности реза от толщины разрезаемого листа. Видно, что с увеличением толщины разрезае-

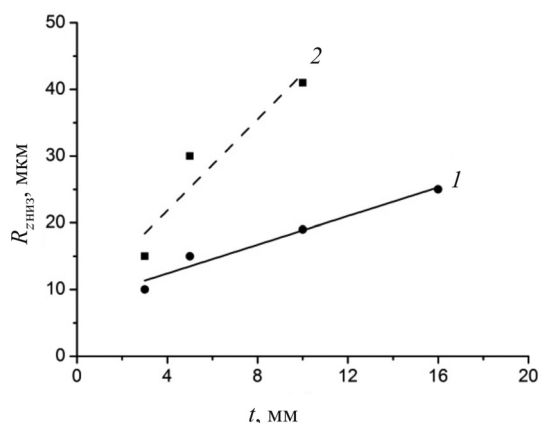


Рис. 5. Зависимость шероховатости поверхности реза от толщины разрезаемого листа при лазерно-кислородной резке (1 – CO_2 -лазер; 2 – волоконный лазер)

мого листа, значение шероховатости линейно растет.

Используя полученные оптимальные значения шероховатости поверхности реза из проведенных экспериментов, можно записать зависимость шероховатости от толщины листа в виде $R_z = 1,15t + 6,5$ – для лазерно-кислородной резки CO_2 -лазером и $R_z = 3,7t + 3,8$ – для лазерно-кислородной резки иттербиевым волоконным лазером. Из рис. 5 видно, что для всех исследуемых толщин класс шероховатости варьируется в пределах 4...6 (см. ГОСТ 2789–73).

Выводы

Проведена оптимизация лазерно-кислородной резки низкоуглеродистой стали марки Ст3 по критерию минимума шероховатости с использованием двух типов лазеров. При лазерно-кислородной резке CO_2 -лазером шероховатость существенно меньше, чем при резке иттербиевым волоконным лазером. Получено, что лазерно-кислородная резка низкоуглеродистой стали обладает 4...6 классом шероховатости в зависимости от выбранной толщины разрезаемого листа. Получены зависимости $R_z = 1,15t + 6,5$ – для лазерно-кислородной резки CO_2 -лазером и $R_z = 3,7t + 3,8$ – для лазерно-кислородной резки иттербиевым волоконным лазером.

Список литературы

1. Ковалев О.Б., Фомин В.М. Физические основы лазерной резки толстых листовых материалов. – М.: Физматлит, 2013. – 256 с. – ISBN 978-5-9221-1520-9.
2. Investigation on disk and CO_2 laser beam fusion cutting differences based on power balance equation / L.D. Scintilla, L. Tricarico, A. Wetzig, E. Beyer // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2013. – N 69. – P. 30–37. – doi: 10.1016/j.ijmachtools.2013.02.008.
3. Powell J., Kaplan A.F.H. A technical and commercial comparison of fiber laser and CO_2 laser cutting // 31th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics ICALEO: Congress Proceedings, 23–27 September 2012. – Anaheim, California, USA, 2012. – P. 277–281.
4. Steen W.M., Mazumder J. Laser material processing. – 4th ed. – London: Springer-Verlag London Publ., 2010. – 558 p. – ISBN 978-1-84996-061-8. – doi: 10.1007/978-1-84996-062-5.
5. LIA handbook of laser material processing / eds.: J.F. Ready, D.F. Farson, T. Feeley. – 1st ed. – Orlando: LIA Magnolia Publ., 2001. – 715 p. – ISBN 978-3-540-41770-5.
6. Dahotre N.B., Harimkar S.P. Laser fabrication and machining of materials. – 1st ed. – New York: Springer Publ., 2008. – 558 p. – doi: 10.1007/978-0-387-72344-0. – ISBN 978-0-387-72343-3.
7. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – 2-е изд., стер. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с. – ISBN 5-7038-2701-9.
8. Mathematical modelling of striation formation in oxygen laser cutting of mild steel / G.V. Ermolaev, O.B. Kovalev, A.M. Orishich, V.M. Fomin // Journal of

Physics D: Applied Physics. – 2006. – Vol. 39, N 19. – P. 4236–4244. – doi: 10.1088/0022-3727/39/19/017.

9. Ermolaev G.V., Kovalev O.B. Simulation of surface profile formation in oxygen laser cutting of mild steel due to combustion cycles // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2009. – Vol. 42, N 18. – P. 185506. – doi: 10.1088/0022-3727/42/18/185506.

10. Оришнич А.М., Фомин В.М. Актуальные проблемы физики лазерной резки металлов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 176 с. – ISBN 978-5-7692-1212-3.

11. Experimental study of laser-oxygen cutting of low-carbon steel using fibre and CO₂ lasers under conditions of minimal roughness / A.A. Golyshev, A.G. Malikov, A.M. Orishich, V.B. Shulyatyev // Quantum Electronics. – 2014. – Vol. 44, N 10. – P. 970–974. – doi: 10.1070/QE2014v044n10ABEH015412.

12. Mahrle A., Beyer E. Theoretical aspects of fibre laser cutting // Journal of Physics D: Applied Physics. –

2009. – Vol. 42, N 17. – P. 175507. – doi: 10.1088/0022-3727/42/17/175507.

13. Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyat'ev V.B. Experimental optimisation of the gas-assisted laser cutting of thick steel sheets // Quantum Electronics. – 2009. – Vol. 39, N 6. – P. 547–551. – doi: 10.1070/QE2009v-039n06ABEH014040.

14. Mechanical characteristics of high-quality laser cutting of steel by fiber and CO₂ lasers / V.M. Fomin, A.A. Golyshev, A.G. Malikov, A.M. Orishich, V.B. Shulyatyev // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2015. – Vol. 56, iss. 4. – P. 726–735. – doi: 10.1134/S0021894415040203.

15. High-quality beam generation in a 8-kW cw CO₂ laser / Yu.V. Afonin, A.P. Golyshev, A.I. Ivanchenko, A.N. Malov, A.M. Orishich, V.A. Pechurin, V.F. Filiev, V.B. Shulyat'ev // Quantum Electronics. – 2004. – Vol. 34, N 4. – P. 307–309. – doi: 10.1070/QE2004v-034n04ABEH002671.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (70), January – March 2016, Pages 16–21

Standardization of oxygen-assisted laser cutting by the surface roughness criterion

Golyshev A.A., Ph.D. student, Junior researcher, e-mail: alexgol@itam.nsc.ru

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

Abstract

Laser cutting technology rightly ranks highly in the range of many common types of metals mechanical cutting. High density of laser radiation power permits cutting metal and non-metal materials of different thickness. Low cut width, high speed of processing, and accuracy are the peculiarities of the laser-cutting technology. In spite of many advantages, opposite to the other technologies, the laser cutting still has no position in the processing quality standard system. The paper deals with the investigation of the oxygen-assisted laser cutting of low-carbon steel by the gas-discharge CO₂ laser and ytterbium fiber laser with the radiation wave length of 10.6 μm and 1.07 μm, respectively. The sheets of 3, 5, 10, and 16 mm were cut. The laser radiation was assigned as 200 W per 1 mm of the sheet thickness for the both laser types.

Initial stage was to optimize the laser cutting by the criterion of the minimal surface roughness. It is shown that the striated structure of the side surface of the cut is not uniform and has its features in the top and bottom parts of the samples. To define the cut quality class, the roughness value measured in the bottom part was used. It is found that the gas-assisted laser cutting of low-carbon steel by the CO₂ laser shows the better quality of the cut surface as compared with the treatment by the ytterbium fiber laser. It is also obtained that the laser cutting of low-carbon steel correlates to the 4 – 6 class of roughness. We founded that, as the cut sheet thickness rises, the roughness value changes in accordance with the law $R_z = 1,15t + 6,5$ for the cutting by the CO₂-laser and $R_z = 3,7t + 3,8$ for the cutting by the ytterbium fiber laser.

Keywords:

laser cutting, surface roughness, CO₂-laser, ytterbium fiber laser.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-16-21

References

1. Kovalev O.B., Fomin V.M. *Fizicheskie osnovy lazernoi rezki tolstykh listovykh materialov* [Physical basis of laser cutting of thick sheet materials]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 256 p. ISBN 978-5-9221-1520-9
2. Scintilla L.D., Tricarico L., Wetzig A., Beyer E. Investigation on disk and CO₂ laser beam fusion cutting differences based on power balance equation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, no. 69, pp. 30–37. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2013.02.008
3. Powell J., Kaplan A.F.H. A technical and commercial comparison of fiber laser and CO₂ laser cutting. *Proceedings 31th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, Anaheim, California, USA, 23–27 September 2012, pp. 277–281.
4. Steen W.M., Mazumder J. *Laser material processing*. 4th ed. London, Springer-Verlag London Publ., 2010. 558 p. ISBN 978-1-84996-061-8. doi: 10.1007/978-1-84996-062-5
5. Ready J.F., Farson D.F., Feeley T., eds. *LIA handbook of laser material processing*. 1st ed. Orlando, LIA Magnolia Publ., 2001. 715 p. ISBN 978-3-540-41770-5
6. Dahotre N.B., Harimkar S.P. *Laser fabrication and machining of materials*. 1st ed. New York, Springer Publ., 2008. 558 p. ISBN 978-0-387-72343-3. doi: 10.1007/978-0-387-72344-0
7. Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki* [Technological processes of laser treatment]. 2nd ed. Moscow, BMSTU Publ., 2008. 664 p. ISBN 5-7038-2701-9
8. Ermolaev G.V., Kovalev O.B., Orishich A.M., Fomin V.M. Mathematical modelling of striation formation in oxygen laser cutting of mild steel. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, vol. 39, no. 19, pp. 4236–4244. doi: 10.1088/0022-3727/39/19/017
9. Ermolaev G.V., Kovalev O.B. Simulation of surface profile formation in oxygen laser cutting of mild steel due to combustion cycles. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, vol. 42, no. 18, p. 185506. doi: 10.1088/0022-3727/42/18/185506
10. Orishich A.M., Fomin V.M. *Aktual'nye problemy fiziki lazernoi rezki metallov* [Actual problems of the physics about metal laser cutting]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2012. 176 p. ISBN 978-5-7692-1212-3
11. Golyshev A.A., Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyatyev V.B. Experimental study of laser-oxygen cutting of low-carbon steel using fibre and CO₂ lasers under conditions of minimal roughness. *Quantum Electronics*, 2014, vol. 44, no. 10, pp. 970–974. doi: 10.1070/QE2014v044n10ABEH015412
12. Mahrle A., Beyer E. Theoretical aspects of fibre laser cutting. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, vol. 42, no. 17, p. 175507. doi: 10.1088/0022-3727/42/17/175507
13. Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyat'ev V.B. Experimental optimisation of the gas-assisted laser cutting of thick steel sheets. *Quantum Electronics*, 2009, vol. 39, no. 6, pp. 547–551. doi: 10.1070/QE2009v039n06ABEH014040
14. Fomin V.M., Golyshev A.A., Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyatyev V.B. Mechanical characteristics of high-quality laser cutting of steel by fiber and CO₂ lasers. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2015, vol. 56, iss. 4, pp. 726–735. doi: 10.1134/S0021894415040203
15. Afonin Yu.V., Golyshev A.P., Ivanchenko A.I., Malov A.N., Orishich A.M., Pechurin V.A., Filev V.F., Shulyat'ev V.B. High-quality beam generation in a 8-kW cw CO₂ laser. *Quantum Electronics*, 2004, vol. 34, no. 4, pp. 307–309. doi: 10.1070/QE2004v034n04ABEH002671

Article history:

Received 30 September 2015

Revised 15 January 2016

Accepted 26 February 2016

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАНАЛА РЕЗА ПРИ ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Х.М. РАХИМЯНОВ¹, доктор техн. наук, профессор

А.Х. РАХИМЯНОВ¹, ассистент

А.Н. СМЕРНОВ², доктор техн. наук, профессор

(¹НГТУ, г. Новосибирск,

²КузГТУ, г. Кемерово)

Поступила 19 октября 2015

Рецензирование 15 января 2016

Принята к печати 15 февраля 2016

Рахимьянов А.Х. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: centerfht@mail.ru

Рассматриваются особенности формирования канала реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при тонкоструйной плазменной резке. Выявлено, что механизм формирования канала реза определяется как выбором технологической схемы раскроя композиции, так и назначением лобовой стороны реза. Показано, что различный характер геометрии реза на участках биметалла определяется теплофизическими свойствами материалов композиции, в первую очередь температурой его плавления. Так, при раскрое пакета со стороны низкоуглеродистой стали на участке алюминия формируется поднутрение, заполненное элементами расплава стали. Это объясняется как существенной разницей в температурах плавления стали и алюминия, так и ослаблением газодинамических потоков в канале реза, ответственных за удаление продуктов расплава. При смене лобовой стороны раскроя со стали на алюминий наблюдается осаждение продуктов расплава алюминия в канале реза, что объясняется его высокой кинематической вязкостью. Установлено образование зоны термического влияния на участке низкоуглеродистой стали размером до 300 мкм.

Ключевые слова: биметаллическая композиция, канал реза, тонкоструйная плазменная резка, температура плавления, расплав.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-22-30

Введение

Внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий на всех стадиях промышленного производства машиностроительной продукции является необходимым условием для повышения его эффективности. Последнее в значительной степени зависит от технологических решений, принятых на начальной стадии производства, поскольку достижение высоких показателей точности на этапе заготовительного производ-

ства во многом определяет дальнейшее развитие технологического процесса, в первую очередь на стадии механической обработки. Стремление к повышению эффективности заготовительного производства и определило интенсивную разработку и внедрение современных технологий листового раскроя металлических материалов – лазерной, плазменной, гидроабразивной резки [1–5].

Сравнительный анализ, представленный одним из передовых производителей оборудования термической резки – фирмой «Hypertherm»

(США), показал, что в условиях серийного производства для раскроя листовых металлических материалов (углеродистых и нержавеющей сталей, цветных металлов и сплавов) в широком диапазоне толщин (от 0,5 до 80 мм) весьма привлекательной является современная технология тонкоструйной плазменной резки [6], которую авторы статьи [7] рассматривают как альтернативу лазерной резке.

Результаты экспериментальных исследований по оценке точности [8], качества [9] при обработке различных материалов – конструкционных углеродистых [10] и нержавеющей сталей [11], а также медных и алюминиевых сплавов [12, 13] подтвердили эффективность использования данной технологии раскроя. Дальнейшие исследования, направленные на расширение технологических возможностей тонкоструйной плазменной резки, позволили выявить перспективы данной технологии в раскрое композиций, представляющих собой соединение разнородных металлических материалов [14–16]. В этих работах дана оценка точностных характеристик реза биметаллических композиций, выполненная согласно рекомендациям ISO 9013: 2002 [17], при использовании различных технологических схем тонкоструйной плазменной резки. Однако остается открытым вопрос о механизмах

формирования канала реза в биметаллических композициях, накладывающих определенные ограничения на выбор технологических параметров процесса.

Целью настоящей работы является изучение особенностей формирования канала при тонкоструйной плазменной резке биметаллической композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М».

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования проводились на технологическом комплексе тонкоструйной плазменной резки, структура и состав которого представлены в работе [10]. В качестве материалов для раскроя использовались биметаллические соединения, полученные сваркой взрывом [18–19]. Для плакирования был выбран листовой прокат стали Ст3 (ГОСТ 380-2005) [20] толщиной 3 мм, а в качестве плакирующего материала – листовой прокат алюминия А5М (ГОСТ 21631–76) [21] толщиной 3 мм. Выбор столь разнородных, в первую очередь по теплофизическим характеристикам, материалов в композиции и определяет специфику формирования канала реза при тепловом воздействии. В таблице приведены теплофизические характеристики материалов исследуемой биметаллической композиции.

Теплофизические характеристики стали Ст3 и алюминия А5М

Марка материала	Плотность, г/см ³	Теплоемкость, кал/г×град	Теплопроводность, ккал/м·ч·град			Температура плавления, °С	Удельная теплота плавления, кДж/кг
			20 °С	200 °С	500 °С		
Ст3	7,80	0,1077	63	53	37	1539	277
А5М	2,70	0,2129	197	197	197	660	390

Изучение структурно-фазового состояния материала в зоне реза проводилось с использованием оптической микроскопии на микроскопе модели Axio Observer A1m при съемке камерой AxioCam MRc5. Для исследования тонкого строения материала использовался растровый электронный микроскоп модели CarlZeiss 1540 с полевой эмиссией катода.

Анализ результатов химических процессов, протекающих в канале реза при тонкоструйной плазменной резке, проводился методом рентгеновской дифрактометрии [22] на дифрактометре

модели ARL X'TRA с использованием медной рентгеновской трубки в качестве источника излучения.

Результаты и обсуждения

При использовании технологической схемы Hi-Focus^{plus} для раскроя пакета со стороны стали и с учетом строения плазменной дуги в канале реза [23] предполагалось, что максимальная теплопередача от участков плазменного столба дугового разряда и анодного пятна будет про-

исходить в верхней половине биметаллического пакета – на участке стали Ст3, температура плавления которой превышает 1500 °С (с учетом задействования механизма кислородной резки температура плавления окиси железа снижается до 1350 °С) [24]. Менее теплонапряженная часть дугового разряда (факельная) распространяется на участке алюминия с низкой температурой плавления (660 °С). Даже такое, казалось бы, благоприятное распределение теплонапряженности процесса резки не обеспечивает благоприятной формы реза (рис. 1). На верхнем участке стали геометрия реза по точности и качеству хорошая, без видимых следов осаждения элементов расплава (рис. 2).

Геометрия реза и его качество на нижнем участке биметаллической композиции имеют существенные отличия (рис. 1). Во-первых, на границе стыка металлов сформирован уступ размером ~200 мкм на сторону реза, что свидетельствует о расширении канала реза на данном участке до 0,4 мм. Во-вторых, канал реза меняет свои размеры на участке алюминия, внизу пакета отклонение составляет уже 0,8 мм на сторону. В-третьих, рез не имеет правильной геометрии, а представляет собой волнообразную кривую, не имеющую регулярности характера. В-четвертых, на рассматриваемом участке имеются остатки расплава стали переменной толщины с наличием дефектов в виде пор, пустот, трещин, отдельных фрагментов материала.

Подобный характер формирования реза данной композиции можно объяснить следующим

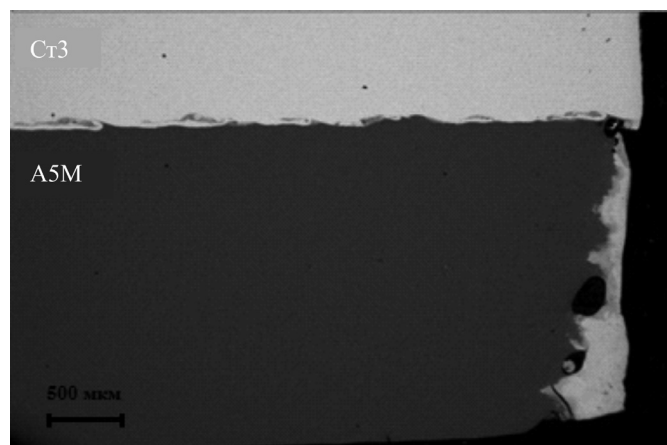


Рис. 1. Поперечное сечение реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскросе по технологической схеме Hi-Focus^{plus} со стороны стали Ст3

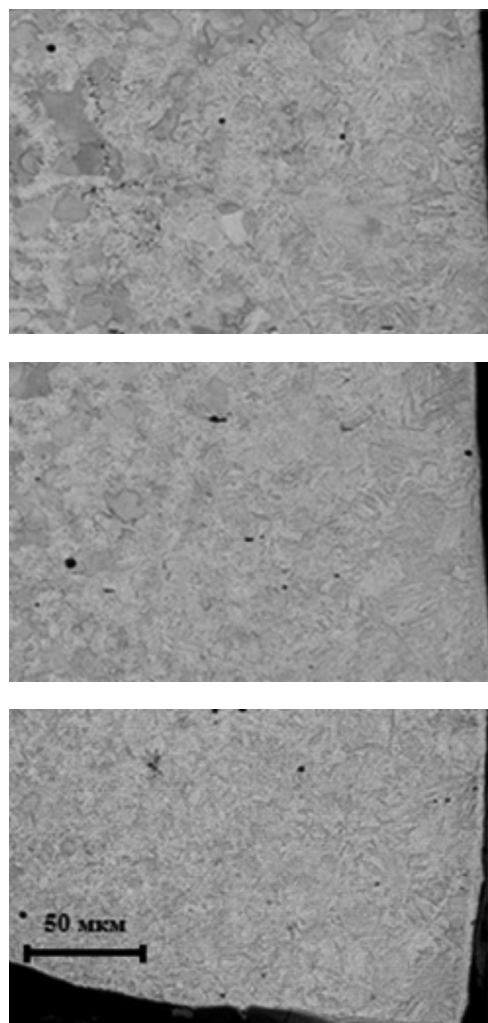


Рис. 2. Панорама реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» на участке стали Ст3 при раскросе пакета по технологической схеме Hi-Focus^{plus} со стороны стали Ст3

образом. В силу значительной разницы в температурах плавления железа и алюминия даже с учетом меньшей теплонапряженности процесса в зоне действия факела плазменной дуги на участке алюминия расплавление последнего происходит в больших объемах, чем у стали, что и приводит к формированию разной ширины канала реза на участках составляющих биметалла с образованием уступа на их границе. Этому способствует также существенная разница в теплопроводностях стали и алюминия, что обеспечивает дополнительный приток тепла в нижнюю часть биметаллической композиции. Если бы формирование канала реза ограничивалось действием рассмотренных процессов, то на участке алюминия он был бы геометрически ровным с сужением к низу. Однако образование

уступа на границе сталь – алюминий, представляющего собой своеобразную нишу, приводит к искажению и ослаблению газодинамических потоков и способствует попаданию туда части расплава стали с верхнего участка. Медленное (относительно скорости гидродинамических потоков выноса основной массы расплава из канала реза газовыми потоками) стекание высокотемпературного расплава стали по каналу реза на участке алюминия за счет высокой теплопроводности последнего приводит к появлению жидкой фазы и расширению канала. Таким образом, жидкая ванна расплава стали является источником тепла в этот момент времени для дальнейшего расплавления алюминия. Поскольку стекание расплава не может быть равномерным на всем протяжении канала, расплавление материала по объему также неравномерно. Это приводит к формированию подобной геометрии канала реза на участке алюминиевой составляющей биметалла. Постепенное охлаждение расплава по мере стекания по каналу реза приводит к его кристаллизации и осаждению.

Характер распределения микротвердости в зоне термического влияния подтверждает представленные соображения о процессах формирования канала реза в исследуемой биметаллической композиции (рис. 3).

Изменение микротвердости на участке низкоуглеродистой стали имеет традиционный характер при поверхностных методах термического воздействия [25, 26], а именно постепенное снижение от максимума у поверхности до исходного значения на границе зоны термического влияния. При этом ширина зоны термического

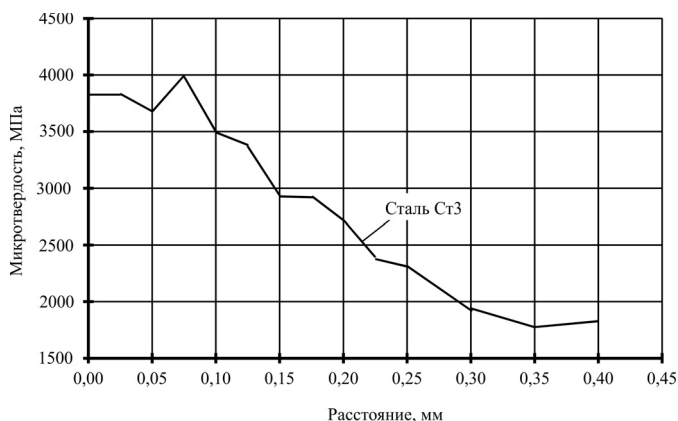


Рис. 3. Характер распределения микротвердости в зоне термического влияния при раскросе композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» со стороны стали Ст3

влияния достигает 300 мкм. Микротвердость на участке алюминия не претерпела изменений в результате воздействия низкотемпературной плазмы и соответствовала микротвердости исходного материала.

Смена лобовой стороны реза со стали на алюминий в рамках технологической схемы Hi-Focus^{plus} также не обеспечивает улучшения геометрии и качества реза (рис. 4). Если геометрия реза на верхнем (алюминиевом) участке биметалла, характерная для раскроса металлов с высокой теплопроводностью, сформирована действием непосредственно плазменной дуги, то на нижнем (стальном) участке в окончательном формировании канала реза участвует расплав алюминия. Если в предыдущем случае натекание расплава стали на участке алюминия было вызвано образованием ниши на пути движения расплава и ослаблением газодинамических условий в расширенном канале реза, то в данной схеме осаждение расплава алюминия главным образом обусловлено его высокой кинематической вязкостью. Характер геометрии канала на участке стали свидетельствует о том, что его окончательное формирование определяется не действием плазменной дуги, а подплавлением от стекающих по нему элементов расплава алюминия (рис. 5).

Уменьшение зоны термического влияния на участке стали по оценкам структурного состояния до 150...180 мкм свидетельствует о снижении температурного градиента в случае, когда

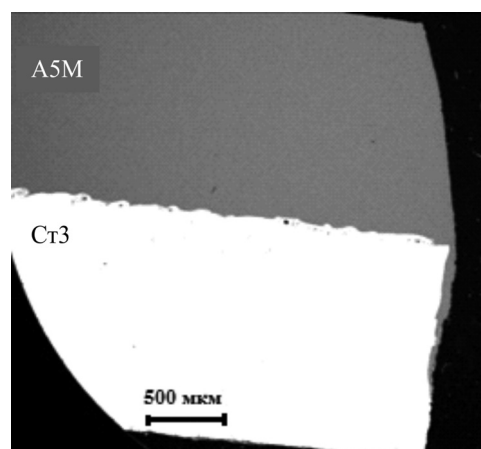


Рис. 4. Поперечное сечение реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскросе пакета по технологической схеме Hi-Focus^{plus} со стороны алюминия А5М

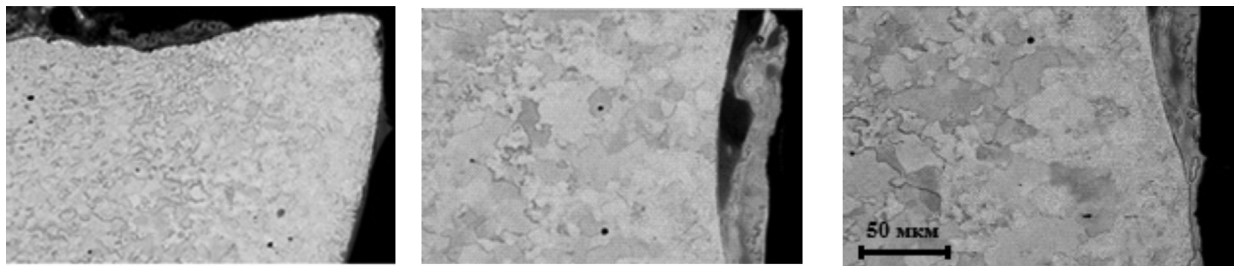


Рис. 5. Формирование канала реза на участке стали Ст3 при раскрое композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» по технологической схеме Hi-Focus^{plus} со стороны алюминия А5М

источником тепла является стекающий расплав по сравнению с прямым действием на обрабатываемый материал плазменной дуги.

Осажденный в канале реза расплав представляет собой продукты кристаллизации из расплава как алюминия, так и стали и оксида алюминия, что подтверждают результаты рентгенофазового анализа (рис. 6). При этом в расплаве имеются поры, трещины и отдельные частицы стали Ст3 (рис. 7).

Использование менее энергоемкой технологической схемы Hi-Focus на режимах раскроя

алюминиевых сплавов в целом не изменило в лучшую сторону картину формирования канала реза, структурного состояния при раскрое с любой стороны биметаллического пакета.

Выводы

Экспериментально установлено, что при тонкоструйной плазменной резке биметаллических композиций характер формирования канала реза определяется как выбором технологической схемы раскроя, так и назначением лобовой стороны реза, а также теплофизическими свойствами материалов композиции, в первую очередь температурой плавления и кинематической вязкостью расплава. Так, при раскрое биметаллического пакета со стороны стали на нижнем участке формируется ниша, заполненная расплавом стали, что объясняется значительной разницей в температурах плавления металлов, составляющих биметаллическую композицию, и ухудшением газодинамических потоков в канале реза. Смена лобовой стороны раскроя приводит к осаждению элементов расплава алюминия в канале реза, вызванное его высокой кинематической вязкостью.

Показано, что высокоинтенсивный характер процесса обработки приводит к образованию зоны термического влияния величиной до 300 мкм.

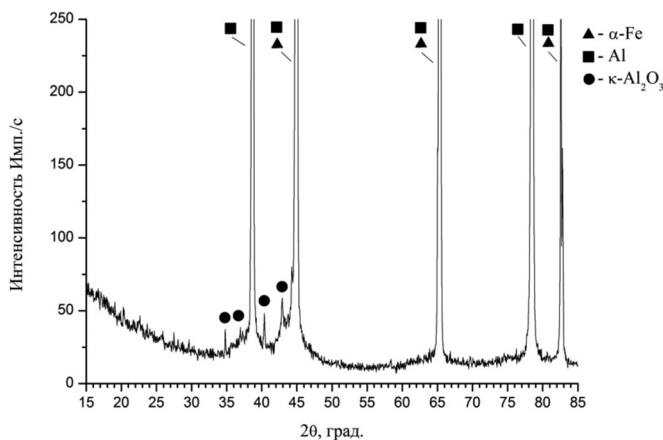


Рис. 6. Фазовый состав продуктов расплава с поверхности реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскрое по технологической схеме Hi-Focus^{plus} со стороны алюминия А5М

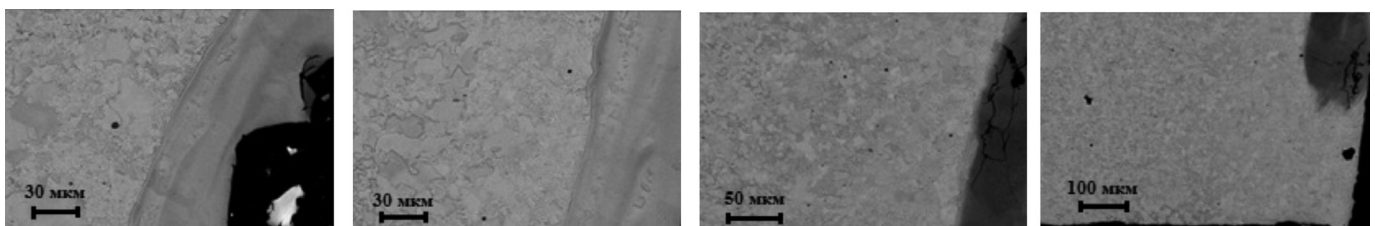


Рис. 7. Структура осажденного расплава в канале реза на участке стали Ст3 при раскрое композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» по технологической схеме Hi-Focus^{plus} со стороны алюминия А5М

Список литературы

1. Забелин А.М., Оришич А.М., Чирков А.М. Лазерные технологии машиностроения: учебное пособие / Новосибирский государственный университет. – Новосибирск: [б. и.], 2004. – 142 с.
2. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная резка металлов. – М.: Высшая школа, 1988. – 127 с. – ISBN 5-06-001252-2.
3. Васильев К.В. Плазменно-дуговая резка – перспективный способ термической резки // Сварочное производство. – 2002. – № 9. – С. 26–28.
4. Шманев В.А., Шулепов А.П., Мещеряков А.В. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1995. – 144 с. – ISBN 5-217-01779-1.
5. Серикова Е.В. Гидроабразивный метод резки материалов // Строительные и дорожные машины. – 2006. – № 2. – С. 27–29.
6. Чиеу К.Ф. Исследование эффективности технологии узкоструйной плазменной резки металлов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.08.04 / Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. – СПб., 2008. – 26 с.
7. Kirkpatrick I. High definition plasma – an alternative to laser technology // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. – 1998. – Vol. 70, iss. 3. – P. 215–217. – doi: <http://dx.doi.org/10.1108/00022669810370349>.
8. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А. Анализ погрешностей формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов // Современные проблемы в технологии машиностроения: всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения профессора Муханова И.И.: сборник трудов. – Новосибирск, 2009. – С. 151–153.
9. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А. Влияние технологий тонкоструйной плазменной резки на формирование шероховатости реза // Современные проблемы машиностроения: 7 международная научно-техническая конференция, Томск, 11–13 ноября 2013 г.: сборник научных трудов. – Томск, 2013. – С. 349–353.
10. Рахимьянов А.Х. Выбор технологических схем и оптимизация режимов тонкоструйной плазменной резки конструкционных сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 2 (63). – С. 46–55.
11. Исследование обрабатываемости стали 12X18H10T методом тонкоструйной плазменной резки / Х.М. Рахимьянов, К.Х. Рахимьянов, А.Х. Рахимьянов, С.В. Шопф, В.В. Захаров // Инновации в машиностроении: труды 4 международной научно-практической конференции, Новосибирск, 2–4 октября 2013 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – С. 38–44.
12. Рахимьянов А.Х. Тонкоструйная плазменная резка медных сплавов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI международной научно-технической конференции, Барнаул, 23–26 сентября 2014 г. / под ред. А.Г. Суслова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 66–70.
13. Рахимьянов А.Х., Красильников Б.А. Технологические особенности плазменного раскроя алюминиевых сплавов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI международной научно-технической конференции, Барнаул, 23–26 сентября 2014 г. / под ред. А.Г. Суслова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 71–77.
14. Рахимьянов А.Х., Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А. Технологические особенности раскроя биметаллического соединения «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» при тонкоструйной плазменной резке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 3 (64). – С. 51–67.
15. Rakhmyanov Kh., Rakhmyanov A., Zhuravlev A. Advantages of high-precision plasma cutting for processing bimetallic compositions // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 294–298. – doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.698.294](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.698.294).
16. Rakhmyanov Kh., Rakhmyanov A., Heifetz M. High-precision plasma cutting of the steel – aluminum bimetallic composition // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 41–45. – doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.788.41](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.788.41).
17. ISO 9013:2002. Резка тепловая. Классификация резов, полученных тепловым способом. Геометрические характеристики изделий и допуски на характеристики. – М.: Стандартинформ, 2002. – 25 с. – (Стандарты Международной организации по стандартизации (ИСО)).
18. Дерibas А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом / отв. ред. С.С. Григорян. – 2-е изд., доп. и перераб. – Новосибирск: Наука, 1980. – 221 с.
19. Захаренко И.Д. Сварка металлов взрывом / АН БССР, Витебское отделение Института физики твердого тела и полупроводников. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 205 с.
20. ГОСТ 380–2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. – М.: Стандартинформ, 2007. – 8 с.
21. ГОСТ 21631–76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008. – 30 с.
22. Pecharsky V.K., Zavalij P.Y. Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials. – 1st ed. – New York: Springer US Publ., 2003. – 713 p. – ISBN 978-0-387-24147-0. – doi: [10.1007/b106242](http://dx.doi.org/10.1007/b106242).

23. *Ширинов И.Г., Котиков В.Н.* Плазменная резка. – Л.: Машиностроение, 1987. – 192 с.

24. *Полевой Г.В., Сухинин Г.К.* Газопламенная обработка металлов: учебник для среднего профессионального образования. – М.: Академия, 2005. – 336 с. – ISBN 5-7695-1604-6.

25. *Головин Г.Ф., Замятин М.М.* Высокочастотная термическая обработка. – Л.: Машиностроение, 1968. – 228 с.

26. *Самохоцкий А.И., Парфеновская Н.Г.* Технология термической обработки металлов. – М.: Машиностроение, 1976. – 311 с.

OBRAOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (70), January – March 2016, Pages 22–30

Features of cut channel formation during high-precision plasma cutting of bimetallic compositions made of promiscuous materials

Rakhimyanov Kh.M.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru

Rakhimyanov A.Kh.¹, Assistant, e-mail: centerfht@mail.ru

Smirnov A.N.², D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: n.ababkov@gmail.com

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

²Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 28 Vesennaya st., Kemerovo, 650000, Russian Federation

Abstract

The paper discusses the features of formation of the cut channel of bimetallic composition “steel St3 + aluminum A5M” during high-precision plasma cutting. The mechanism of formation of the cut channel is defined as a choice of technological scheme of cutting the composition and appointment of the front side of the cut are identified. It is shown that the different character of the geometry of the cut in the areas of the bimetal is defined by thermal properties of materials composition, and above all, its melting point. Thus, when cutting the package from the side of low carbon steel the undercut, filled with elements of melted steel, is formed on portion of aluminum. This is due to significant differences in melting temperatures of steel and aluminum, as well as the weakening of the gas-dynamic flows in the cut channel, responsible for the removal of the products melt. The formations of heat affected zone in the area of low carbon steel up to 300 microns width are established. The maximum value of microhardness (up to 4000 MPa) is observed at the surface, with a gradual decrease in microhardness up to 1800 MPa, which corresponds to the hardness of the starting material. If you change the front side of the cut with steel to aluminum, deposition of products of aluminum melt in the cut channel, due to its high kinematic viscosity is observed. When cutting a bimetallic composition from the side of aluminum the heat affected zone in the area of steel decreases to 150-180 microns. X-ray and metallographic analysis showed that the products of melt in the cut channel contain elements of aluminum, steel and aluminum oxide.

Keywords:

bimetallic composition, cut channel, high-precision plasma cutting, melting point, melt.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-22-30

References

1. Zabelin A.M., Orishich A.M., Chirkov A.M. *Lazernye tekhnologii mashinostroeniya* [Laser technology engineering]. Novosibirsk, 2004. 142 p.

2. Grigor'yants A.G., Sokolov A.A. *Lazernaya rezka metallov* [Laser cutting of metal]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 127 p. ISBN 5-06-001252-2

3. Vasil'ev K.V. Plazmenno-dugovaya rezka – perspektivnyi sposob termicheskoi rezki [Plasma-arc cutting – a promising method of thermal cutting]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding International*, 2002, no. 9, pp. 26–28. (In Russian)

4. Shmanev V.A., Shulepov A.P., Meshcheryakov A.V. *Struinaya gidroabrazivnaya obrabotka detalei GTD* [Hydro-abrasive jet machining of GTE parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 144 p. ISBN 5-217-01779-1
5. Serikova E.V. Gidroabrazivnyi metod rezki materialov [Waterjet cutting method of materials]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny – Construction and road building machinery*, 2006, no. 2, pp. 27–29.
6. Chieu K.F. *Issledovanie effektivnosti tekhnologii uzkostruinoi plazmennoi rezki metallov*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Research of efficiency of technology narrow jet plasma cutting. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2008. 26 p.
7. Kirkpatrick I. High definition plasma – an alternative to laser technology. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 1998, vol. 70, iss. 3, pp. 215–217. doi: <http://dx.doi.org/10.1108/00022669810370349>
8. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A. [Analysis of errors in forming trickle plasma cutting metal materials]. *Sbornik trudov vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sovremennye problemy v tekhnologii mashinostroeniya", posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora Mukhanova I.I.* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Modern Problems in Mechanical Engineering Technology", dedicated to the 100th anniversary of the birth of professor Mukhanov I.I.]. Novosibirsk, 2009, pp. 151–153. (In Russian)
9. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A. [Impact of technology trickle plasma cutting on the formation of the surface roughness of the cut]. *Sbornik nauchnykh trudov 7 mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Sovremennye problemy mashinostroeniya"* [Proceedings of the 7th International Scientific-Technical Conference "Modern Problems of Engineering"]. Tomsk, 11–13 November 2013, pp. 349–353. (In Russian)
10. Rakhimyanov A.Kh. Vybór tekhnologicheskikh skhem i optimizatsiya rezhimov tonkostruinoi plazmennoi rezki konstruksionnykh stalei [Selection of technological schemes and high-precision plasma cutting mode optimization for structural steels]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 2 (63), pp. 46–55.
11. Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov K.Kh., Rakhimyanov A.Kh., Shopf S.V., Zakharov V.V. [Study workability of the steel 12X18H10T trickle method for plasma cutting]. *Trudy 4 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Innovatsii v mashinostroenii"* [Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference "Innovations in Machine building"]. Novosibirsk, 2–4 October 2013, pp. 38–44. (In Russian)
12. Rakhimyanov A.Kh. [High-precision plasma cutting of copper alloys]. *Materialy VI mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Innovatsii v mashinostroenii – osnova tekhnicheskogo razvitiya Rossii"* [Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference "Innovations in mechanical engineering based on technological development of Russia–2014"], Barnaul, 23–26 September 2014, pt. 2, pp. 66–70. (In Russian)
13. Rakhimyanov A.Kh., Krasil'nikov B.A. [Technological features of plasma cutting aluminum alloys]. *Materialy VI mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Innovatsii v mashinostroenii – osnova tekhnicheskogo razvitiya Rossii"* [Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference "Innovations in Mechanical Engineering Based on Technological Development of Russia–2014"], Barnaul, 23–26 September 2014, pt. 2, pp. 71–77. (In Russian)
14. Rakhimyanov A.Kh., Rakhimyanov Kh.M., Krasil'nikov B.A. Tekhnologicheskie osobennosti raskroya bimetallichesкого soedineniya "stal' St3 + stal' 12X18H10T" pri tonkostruinoi plazmennoi rezke [Technological features of the bimetallic joints "steel Ст3 + steel 12X18H10T" layout by high-precision plasma cutting]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 3 (64), pp. 51–67.
15. Rakhimyanov Kh., Rakhimyanov A., Zhuravlev A. Advantages of high-precision plasma cutting for processing bimetallic compositions. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 294–298. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.698.294](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.698.294)
16. Rakhimyanov Kh., Rakhimyanov A., Heifetz M. High-precision plasma cutting of the steel – aluminum bimetallic composition. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 41–45. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.788.41](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.788.41)
17. ISO 9013:2002. *Thermal cutting. Classification of thermal cuts. Geometrical product specification and quality tolerances*. Moscow, Standartinform Publ., 2002. 25 p. (In Russian)
18. Deribas A.A. *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom* [Physics of hardening and explosion welding]. 2nd ed. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 221 p.
19. Zakharenko I.D. *Svarka metallov vzryvom* [Metal welding explosion]. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1990. 205 p.
20. GOST 380–2005. *Stal' uglerodistaya obyknovennogo kachestva. Marki* [State Standard 380–2005. Common quality carbon steel. Grades]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 8 p.

21. GOST 21631–76. *Listy iz alyuminiya i alyuminiyevykh splavov. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 21631–76. Sheets of aluminium and aluminium alloys. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 30 p.
22. Pecharsky V.K., Zavalij P.Y. *Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials*. 1st ed. New York, Springer US Publ., 2003. 713 p. ISBN 978-0-387-24147-0. doi: 10.1007/b106242
23. Shirshov I.G., Kotikov V.N. *Plazmennaya rezka* [Plasma cutting]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 192 p.
24. Polevoi G.V., Sukhinin G.K. *Gazoplamennaya obrabotka metallov* [Flame machining metals]. Moscow, Academia Publ., 2005. 336 p. ISBN 5-7695-1604-6
25. Golovin G.F., Zamyatin M.M. *Vysokochastotnaya termicheskaya obrabotka* [High-frequency heat treatment]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1968. 228 p.
26. Samokhotskii A.I., Parfenovskaya N.G. *Tekhnologiya termicheskoi obrabotki metallov* [Technology of heat treatment of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 311 p.

Article history:

Received 19 October 2015

Revised 15 January 2016

Accepted 15 February 2016

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА С УЧЕТОМ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

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

Поступила 16 декабря 2015

Рецензирование 15 января 2016

Принята к печати 15 февраля 2016

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

Рассматривается решение задачи по обеспечению на этапе проектирования минимальной массы тяжелого многоцелевого станка при заданной точности и производительности механической обработки. Показано, что на этапе моделирования несущей системы станка для типовых условий эксплуатации масса несущей системы в результате оптимизации на 35 % меньше его производственного варианта. В процессе оптимизации основным является ограничение на перемещение шпинделя в направлении действия максимальной составляющей силы резания. Для решения задачи используется совместная работа методов оптимизации и метода конечных элементов. На этапе расчета отдельной несущей конструкции с целью формирования реальной геометрии для стойки получено, что крутильная жесткость новой стойки выше, так как угол поворота оптимальной стойки меньше, чем стойки производственного варианта – 0,0778 рад и 0,1495 рад соответственно. При расчете паллеты, входящей в состав тяжелого поворотного-подвижного стола, ее масса уменьшается на 35,5 % по сравнению с производственным вариантом.

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

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-31-41

Введение

В современном станкостроении на этапе проектирования несущих систем и отдельных несущих конструкций широко используется метод конечных элементов (МКЭ) [1–5]. Однако выбранный вариант конструкции, полученный в результате расчетов МКЭ, не есть лучший в абсолютном смысле, так как исследованы не все возможные варианты [6]. Более эффективным направлением является использование МКЭ в сочетании с методами оптимизации. Отметим некоторые постановки задач по оптимальному проектированию конструкций станков.

1. В работах [7, 8] рассматриваются задачи оптимального проектирования станин токарного и фрезерного станков, траверсы и колонны радиально-сверлильного станка. Постановка зада-

чи оптимизации включает в себя минимизацию массы при ограничениях по прочности, жесткости, низшим частотам собственных колебаний и устойчивости автоколебаний. Несущие конструкции моделируются стержневыми конечными элементами. Задача решается методом штрафных функций, получено уменьшение массы до 20 %.

2. В работе [9] за целевую функцию принимается стоимость изготовления конструкций при ограничениях на точность и производительность механической обработки и на локальные деформации. В ней предложен многоэтапный метод проектирования, использующий упрощенные модели несущей системы (стержневые элементы коробчатого типа) и включающий в себя три этапа: упрощение конструкции, оптимизация и реализация. Задача оптимизации решается на основе метода штрафных функций.

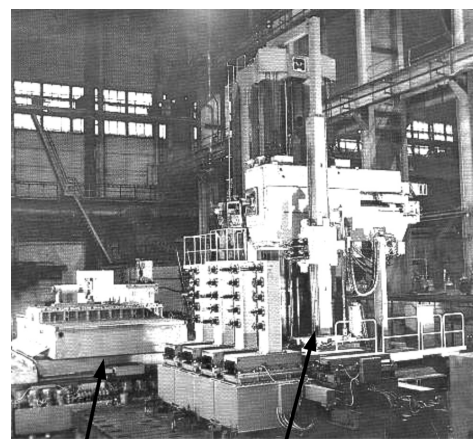
3. Оптимизация несущих конструкций на основе обобщенного критерия с весовыми коэффициентами рассматривается в работах [10, 11]. Стойка моделируется стержнем коробчатого прямоугольного поперечного сечения без перегородок. Недостатком данного метода является сложность определения весовых коэффициентов. В работе [12] применяется анализ чувствительности для расчета токарно-карусельного станка; выбранный вариант стойки имеет уменьшенную массу (на 10 %) и податливость (более чем в два раза).

На практике, как известно, при проектировании станок разделяют на подконструкции по конструктивной зависимости. Однако, так как силовые и деформационные взаимосвязи на границах контакта подконструкций неизвестны, проектирование идет методом последовательных приближений для удовлетворения взаимных требований, что удлиняет сроки проектирования. При проектировании новых узлов тяжелых и уникальных станков основным является подход, основанный на опыте проектировщика, а также использовании унифицированных и стандартных решений. В связи со сложностью современных многоцелевых станков актуальным остается разработка научно обоснованной технологии проектирования таких станков.

Целью настоящей работы является изложение основных этапов новой технологии проектирования оптимальных несущих конструкций тяжелого МС сверлильно-фрезерно-расточной группы, предназначенного для обработки корпусных деталей массой до 200 т (рис. 1). Структурно МС состоит из фрезерно-расточного станка и поворотно-подвижного стола.

1. Теория

Известны компоновка многоцелевого станка, ограничения внешних размеров несущей системы станка, внешняя нагрузка и условия опирания. Сформулируем следующую задачу: спроектировать несущие конструкции, которые



Стол Станок фрезеровочный

Рис. 1. Тяжелый многоцелевой станок

удовлетворяли бы условиям прочностной надежности и минимально возможной массе при заданных нормах точности и производительности механической обработки. Поставленная задача решается за четыре этапа (рис. 2).

Этап I (рис. 2, блок 1). Определяются внешние нагрузки на основе детерминированных или вероятностных моделей.

Этап II (рис. 2, блок 2). Расчет несущей системы с упрощенными по геометрии несущими конструкциями. Конструкции моделируются

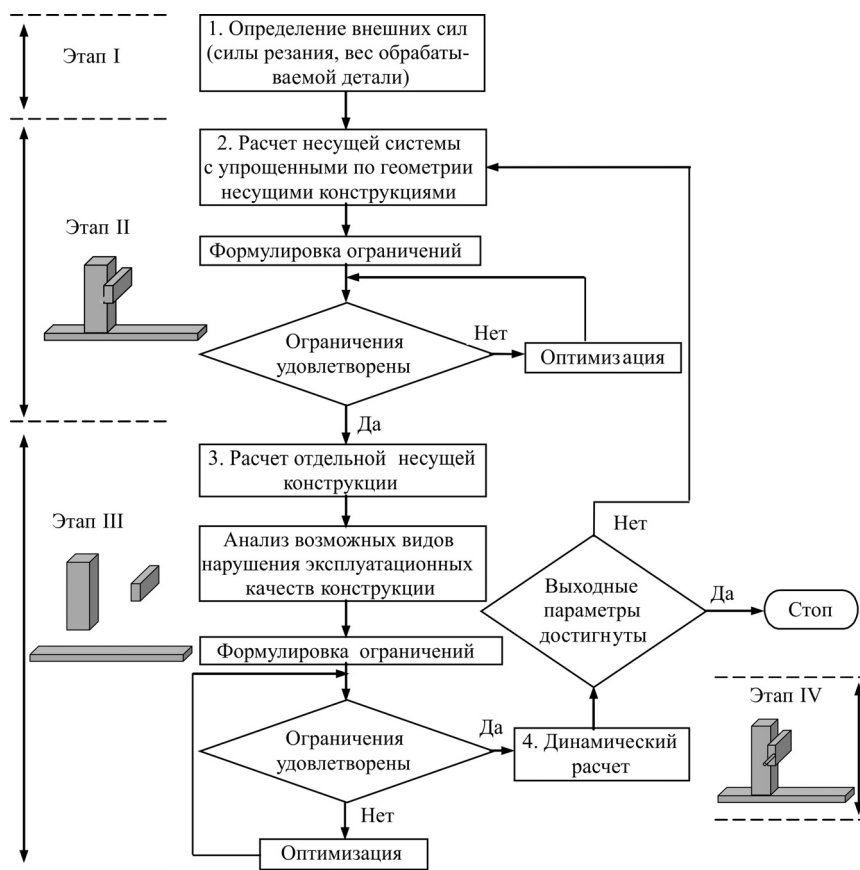


Рис. 2. Блок-схема проектирования несущих конструкций МС

пространственными структурами с упрощенной геометрией поперечного сечения (стержень, корбчатый профиль, пластина и т. д.). На данном этапе формулируется задача математического программирования:

минимизировать

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

при ограничениях:

напряжения

$$g_1(X) = 1 - \sigma_{\text{экв}} / [\sigma] \geq 0, \quad (2)$$

перемещения

$$g_2(X) = 1 - \Delta / [\Delta] \geq 0, \quad (3)$$

переменные проектирования

$$g_3(X) = V_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где ρ – плотность материала; V – объем материала конструкции; $\sigma_{\text{экв}}$, $[\sigma]$ – эквивалентное и допускаемое напряжения; Δ , $[\Delta]$ – расчетные и допускаемые перемещения инструмента в зоне резания.

За целевую функцию (1) принимается масса конструкции, так как рассматривается проектирование тяжелых станков массой 300...400 т. Внешней нагрузкой для несущей системы являются силы резания. Переменными проектирования являются геометрические размеры поперечного сечения несущих конструкций. Задача (1)–(4) решается методом штрафных функций в форме

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

Задача безусловной оптимизации решается методом Давидона–Флетчера–Пауэлла (ДФП) [13, 14]. В результате определяем силовые и кинематические условия для отдельной несущей конструкции.

Этап III (рис. 2, блок 3). Рассматривается расчет отдельной несущей конструкции (стойка, шпиндельная бабка и др.) при удовлетворении силовых и кинематических условий, полученных на этапе II. Целевая функция – масса конструкции. Ограничения задачи оптимизации формируются на основе возможных нарушений

эксплуатационных показателей конструкции (нарушения условий прочности, жесткости, потери устойчивости и др.). В результате получаем оптимальную конструкцию с реальной геометрией поперечного сечения.

Этап IV (рис. 2, блок 4). Проводится динамический анализ или имитационное моделирование для типовых условий эксплуатации несущей системы с оптимальными несущими конструкциями.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Расчет несущей системы фрезерно-расточного станка (этап II) – стойка 1, шпиндельная бабка 2, станина 3 (рис. 3)

Расчетные условия: торцовое фрезерование; наибольшее усилие подачи 40 кН при черновой обработке и 3 кН при чистовой обработке; соотношение составляющих силы резания $F_x : F_y : F_z = 0,5 : 1,0 : 0,7$; учитываются отклонения от плоскостности и прямолинейности обрабатываемой поверхности (ГОСТ 24643–81, 6-й квалитет); шпиндельная бабка находится в крайнем верхнем положении при среднем положении стойки на станине, а вылеты шпинделя ($\leq 0,4$ м) и ползуна ($\leq 0,6$ м) соответствуют предельным значениям, характерным для чистовой обработки.

Конечноэлементная модель несущей системы станка (рис. 4, а) содержит пластинчатые четырехузловые конечные элементы для моде-

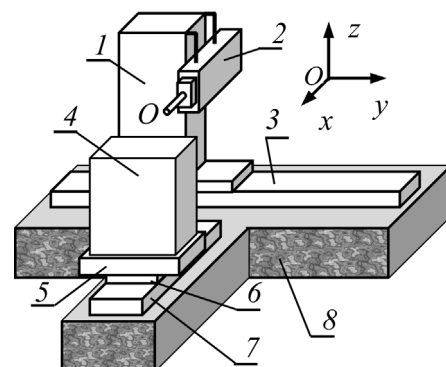


Рис. 3. Компонровка многоцелевого станка:

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

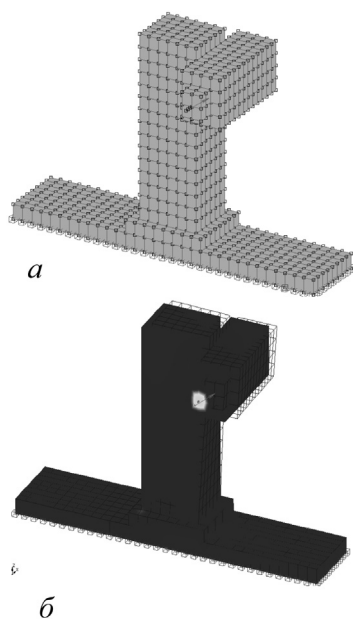


Рис. 4. Исходное (а) и деформированное (б) состояния НС станка

лирования стойки, корпуса шпиндельной бабки и станины; шпиндель моделируется пространственным стержневым конечным элементом. В расчетах учитываются упругие деформации и контактные деформации в стыках несущей системы. Расчет ведется на основе модели (1) – (4). Эффективным является вариант несущей системы, имеющий наименьшую массу и перемещения в зоне обработки, не превышаю-

щие допускаемых перемещений. При решении используется авторское программное обеспечение, реализующее интегрированную работу МКЭ и методов оптимизации [15].

В табл. 1 приведены основные результаты расчетов НС станка в зависимости от условий эксплуатации. На рис. 4, б показано деформированное состояние НС станка. Вариант НС станка, полученный в результате интегрированной работы МКЭ и методов оптимизации, имеет меньшую массу по сравнению с серийным вариантом и его, согласно принятой системе предпочтений, следует признать лучшим. Результаты расчетов также показывают, что при проектировании станка на типовые условия эксплуатации выигрыш по массе составляет около 35 %. Активным ограничением является перемещение конца шпинделя по оси y (действует максимальная составляющая силы резания).

2.2. Расчет отдельной несущей конструкции станка (этап III)

Здесь рассмотрим расчет стойки МС (рис. 3). Выделим в несущей системе на уровне шпиндельной бабки подконструкцию, состоящую из двух поясов серийной стойки общей высотой 1 м (рис. 5). При расчете несущей системы на этапе I для стойки получены расчетные усилия

Таблица 1

Результаты расчета НС станка

Параметр	Результаты моделирования НС станка для условий эксплуатации			
	Предельные			Типовые*
Вариант НС	серийный	оптимальный	МКЭ без оптимизации	оптимальный
Размеры сечения, м:				
стойка	2,0×2,46	1,8×2,6	2,0×2,46	1,8×2,6
шпиндельная бабка	1,3×2,20	1,7×2,0	1,6×2,00	1,7×2,0
ползун	0,6×0,80	0,8×0,8	0,6×0,8	0,8×0,8
Перемещения в зоне резания (расчет/норма):				
по оси x	0,52	0,67	0,76	0,68
по оси y	0,99	0,99	0,99	0,99
по оси z	0,51	0,54	0,42	0,61
Масса, т	169,9	158,2	202,8	102,2

* Типовые условия эксплуатации: чистовая обработка, фреза диаметром 250 мм, число зубьев 20, глубина резания 0,5 мм, частота вращения шпинделя 170 мин⁻¹ (0 – 500 мин⁻¹).

Таблица 3

Допускаемая деформация
для подконструкции

Узлы	Деформация по оси, 10^{-6}		
	x	y	z
1–3	0,92	0,45	0,135
7–9	0,88	0,46	–
1–7	–	3,00	–
3–9	–	3,00	–

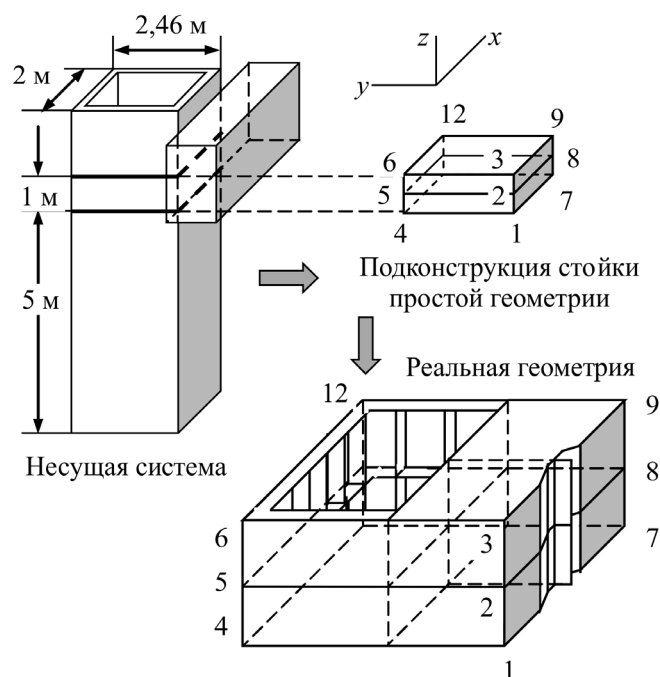


Рис. 5. Выделение подконструкции и ее реальная геометрия

в местах контакта шпиндельной бабки со стойкой и поле перемещений (здесь не приводятся). Для выделенной подконструкции поле перемещений приведено в табл. 2. Допускаемая деформация $[\delta]$ (табл. 3) назначается для точек 1–3 и 7–9 передней стенки стойки, положение которой определяет точность обработки. Определение $[\delta]$ проводится по формуле $[\delta] = (\delta_i - \delta_j)/L_{ij}$, где i, j – номер узла

Таблица 2

Поле перемещений узлов подконструкции
стойки
(запас по жесткости $n = 1,5$)

Узел	Перемещение по оси, 10^{-5}		
	x	y	z
1	0,340	–0,394	0,0265
2	0,396	–0,421	0,0360
3	0,432	–0,439	0,0400
4	0,189	–0,378	0,1300
5	0,218	–0,416	0,1240
6	0,236	–0,435	0,1220
7	0,335	–0,095	–0,1034
8	0,392	–0,122	–0,1090
9	0,428	–0,141	–0,1110
10	0,186	–0,097	0,0080
11	0,217	–0,123	0,0140
12	0,235	–0,142	0,0160

Расчетная схема подконструкции включает в себя 189 пластинчатых конечных элементов (КЭ), 159 узлов, ребра жесткости моделируются пластинчатым КЭ. Дополнительно в узлах 1–12 вводятся упругие связи, жесткость которых определяется как отношение сила/перемещение для конкретного узла. Значение жесткости связи автоматически вводится в матрицу жесткости конструкции.

При оптимизации подконструкции определяются переменные проектирования (здесь – толщина стенки, ребра) при удовлетворении поля перемещений, приведенного в табл. 2:

$$\text{минимизировать } \psi_0 = \rho \sum_{i=1}^k V_i$$

при ограничениях:

$$\text{перемещения } \psi_1 = 1 - \delta/[\delta] \geq 0,$$

$$\text{напряжения } \psi_2 = 1 - \sigma_{\text{экв}}/[\sigma] \geq 0,$$

переменные проектирования

$$\psi_3 = V_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, k,$$

где k – число пластинчатых конечных элементов; ρ – плотность материала; V – объем конечного элемента; $\delta, [\delta]$ – расчетная и допускаемая деформация; $\sigma_{\text{экв}}, [\sigma] = 100$ МПа – эквивалентное и допускаемое напряжения. Результаты расчета подконструкции стойки для различных условий приведены в табл. 4.

Расчеты показывают, что при сравнении параметров оптимальной подконструкции (см. табл. 4) с параметрами серийной стойки (толщина стенки в плоскости xz, yz 0,030 м, в плоскости xy 0,045 м, масса 6,46 т) очевидно, что серийная стойка отвечает типовым условиям эксплуатации с коэффициентом запаса по жесткости n несколько больше 1,0. В табл. 5 представлено

Таблица 4

Результаты оптимального проектирования подконструкции стойки

Параметр	Условия эксплуатации			
	Предельные		Типовые	
	$n = 1,5$	$n = 1,0$	$n = 1,5$	$n = 1,0$
Толщина, м:				
плоскость xz , yz	0,0797	0,0527	0,0463	0,0284
плоскость xy	0,0923	0,0830	0,0565	0,0415
Масса, т	15,30	11,62	9,04	6,08

Таблица 5

Поле перемещений узлов оптимальной подконструкции стойки (обозначения узлов по рис. 5)

Узел	Перемещение по оси, м, 10^{-5}		
	x	y	z
1	0,341	-0,378	0,0255
2	0,387	-0,408	0,0310
3	0,414	-0,423	0,0326
4	0,187	-0,343	0,1303
5	0,219	-0,364	0,1304
6	0,240	-0,380	0,1304
7	0,336	-0,198	-0,0953
8	0,387	-0,226	-0,0947
9	0,418	-0,243	-0,0948
10	0,186	-0,182	0,0095
11	0,221	-0,213	0,0115
12	0,243	-0,231	0,0130

расчетное поле перемещений оптимальной подконструкции стойки для узлов согласно табл. 2 (коэффициент запаса по жесткости $n = 1,5$, предельные условия эксплуатации). Полученное поле перемещений узлов оптимальной подконструкции с реальной геометрией хорошо согласуется с полем подконструкции упрощенной геометрии, полученным при расчете несущей системы (этап II). Ограничение по допускаемой деформации для точек 1–3 по оси y выполняется ($0,45 \cdot 10^{-6}$), другие расчетные деформации меньше допускаемых.

Следовательно, наибольшее влияние при проектировании стойки имеет составляющая силы резания по оси y . Угол поворота передней стенки оптимальной стойки равен 0,0778 рад, что меньше, чем у стойки в составе несущей системы с упрощенными по геометрии базовыми деталями – 0,1495 рад, т. е. крутильная жесткость новой стойки выше.

2.3. Расчет паллеты тяжелого поворотно-подвижного стола (этап III)

Паллета (рис. 6) представляет собой пространственную тонкостенную конструкцию прямоугольной формы ячеистой структуры с размерами $L = 5,6$ м, $B = 3,6$ м, $H = 0,8$ м (рис. 7). Расчетные условия следующие.

1. Корпус паллеты моделируется пластинчатым прямоугольным и стержневым (ребра жесткости) конечными элементами. В процессе построения более мелкой сетки ребра моделируются пластинчатым КЭ.



Рис. 6. Поворотно-подвижный стол

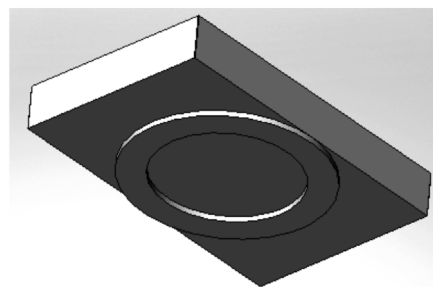
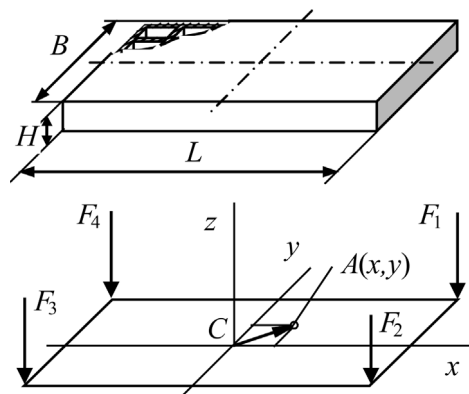


Рис. 7. Паллета, расчетная схема ее поверхности и опорная поверхность

Таблица 6

Результаты расчета жесткости паллеты МКЭ

Число конечных элементов	Максимальные вертикальные перемещения, мм	
	Нагрузка равномерная	Нагрузка неравномерная
199	0,259	0,328
757	0,211	0,249
1044	0,208	—

2. Паллета опирается на жесткие круговые направляющие саней стола (внешний диаметр 3,6 м).

3. Расчетными нагрузками являются собственные веса паллеты (380 кН для серийной паллеты) и обрабатываемой детали (2 МН).

4. Полагаем, что обрабатываемая деталь опирается в угловых зонах паллеты. Внешняя нагрузка F от веса детали и паллеты в предельном случае характеризуется силами F_i ($i = 1, \dots, 4$), приложенными в угловых точках паллеты (рис. 7). Нагрузка F_i вычисляется по формулам сопротивления материалов [16]:

$$F_i = (1/4) F [1 \pm x / (L/2) \pm y / (B/2)].$$

5. Центр тяжести детали A (рис. 7) в плоскости xy имеет эксцентриситет по отношению к вертикальной оси стола на $1/20$ длины и $1/30$ ширины паллеты; это – наибольшее значение эксцентриситета, установленное на основе анализа конфигураций встречающихся на практике крупногабаритных деталей.

Результаты расчета паллеты методом конечных элементов приведены на рис. 8 и в табл. 6. Анализ результатов показывает, что наличие ребер по нижнему контуру паллеты повышает ее жесткость на 40 %. Максимальные напряжения не превышают 8 МПа. Наибольшая относительная деформация паллеты (число КЭ равно 757) при неравномерном распределении нагрузки от веса обрабатываемой детали составляет $1,2 \cdot 10^{-5}$ (см. рис. 6). Полученный результат меньше принятого критерия жесткости $2 \cdot 10^{-5}$. За критерий жесткости принимается угол наклона паллеты у направляющих, непосредственно влияющий на работоспособность гидростатических направляющих [17]. На практике вместо угла наклона ис-

пользуется вертикальная линейная относительная деформация, определяемая на поверхности паллеты и равная $2 \cdot 10^{-5}$ при ширине направляющих стола 1 м, толщине масляного слоя $4 \cdot 10^{-5}$ м. Паллета имеет повышенную жесткость и, следовательно, избыточную массу.

В результате расчета на основе МКЭ получен вариант конструкции с меньшей массой (в скобках – параметры серийной конструкции).

Толщина, мм:	60	(60)
верхняя плита	30	(60)
боковые стенки	20	(50)
внутренние перегородки ребра	60	(60)
Вертикальное перемещение, мм	0,427	(0,249)
Масса, т	24,4	(38,12)

Следовательно, для заданной компоновки паллеты ее масса уменьшилась на 36 % по сравнению с массой серийной конструкции.

Задача оптимального проектирования паллеты имеет следующий вид:

минимизировать

$$\psi_0 = \rho \left(\sum_{i=1}^k V_i + \sum_{j=1}^m V_j \right) \quad (5)$$

при ограничениях:

перемещения

$$\psi_1 = 1 - \delta/[\delta] \geq 0,$$

напряжения

$$\psi_2 = 1 - \sigma_{\text{экв}}/[\sigma] \geq 0,$$

устойчивость

$$\psi_3 = 1 - n\sigma/\sigma_{\text{кр}} \geq 0,$$

собственная частота

$$\psi_4 = p_1/[p_1] - 1 \geq 0$$

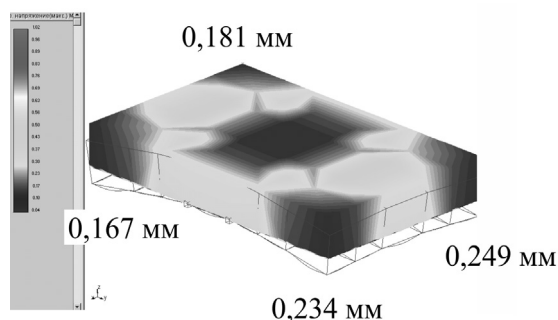


Рис. 8. Деформированное состояние паллеты при неравномерном приложении нагрузки от веса обрабатываемой детали

переменные проектирования

$$\psi_5 = V_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, k,$$

$$\psi_6 = V_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, m,$$

где k, m – число пластинчатых и стержневых конечных элементов (КЭ); ρ – плотность материала; V – объем материала конечного элемента; $\delta, [\delta]$ – расчетная и допускаемая относительная деформация, определяемая в направлении, перпендикулярном плоскости паллеты; $\sigma_{\text{экв}}, [\sigma] = 100$ МПа – эквивалентное и допускаемое напряжения; $n = 2$ – коэффициент запаса на устойчивость; $\sigma, \sigma_{\text{кр}}$ – сжимающее напряжение в плоскости КЭ и критическое напряжение; $p_1, [p_1] = 12$ Гц – расчетное значение и нижняя граница (определяется частотой вращения шпинделя 500 мин^{-1} с отстройкой от резонанса 30 %) первой собственной частоты.

В связи с тем что длина, ширина и высота паллеты определяются габаритами обрабатываемой детали, а также конструктивными соображениями и не варьируются, то переменными проектирования являются толщина t_c стенки корпуса и толщина t_p ребра (при постоянной ширине).

Задача (5) решается методом штрафных функций в форме

$$\varphi = \psi_0 / \psi_0^H + r \sum_{i=1}^4 (1 / \psi_i), \quad (6)$$

где ψ_0^H – начальная масса серийной конструкции паллеты до оптимизации; r – малый положительный параметр. Решение задачи получено безусловной минимизацией функции (6) для убывающей последовательности значений параметра r методом ДФП [13, 14]. В табл. 7 приведены результаты расчетов.

Таблица 7

Результаты оптимизации паллеты

Проект паллеты	Толщина, мм				Наибольшее вертикальное перемещение, мм	Масса, т
	Верхняя плита	Боковая стенка	Внутренняя стенка	Ребро		
Серийный	60,0	60,0	50,0	60,0	0,249	38,12
МКЭ	60,0	30,0	20,0	60,0	0,427	24,40
Исходный для оптимизации	70,0	40,0	40,0	70,0	–	32,05
Оптимальный	29,0	36,3	36,3	69,5	0,452	24,59

В результате оптимизации масса паллеты уменьшилась на 35,5 % по сравнению с серийным вариантом, что практически совпадает с результатом, полученным при расчете только МКЭ. Различие по толщине, по-видимому, связано с разной чувствительностью переменных проектирования при оптимальном поиске. Для оптимальной паллеты наибольшие напряжения составили 13,4 МПа, невязка по критерию жесткости равна 0,65 %. Низшая собственная частота паллеты равна 88,6 Гц и превосходит частоту вынужденных колебаний (от вращения шпинделя) почти в 9 раз. Выбор начальной точки с другими параметрами (толщина 60, 45, 45, 60 мм соответственно графам табл. 7) показал аналогичный результат по целевой функции, что свидетельствует о достижении оптимума задачи.

Выводы

Рассмотренные процедуры в приложении для конкретных несущих конструкций тяжелого многоцелевого станка обеспечивают создание станков без избыточных возможностей (на заданную точность и производительность механической обработки), прогнозирование их работоспособности в условиях интенсивных механических воздействий, научное обоснование выбора проектных решений (на основе применения МКЭ и методов оптимизации). В отличие от классического метода проектирования данная технология позволяет проектировщикам разрабатывать несущие конструкции независимо друг от друга. Это дает возможность рационально распределить работу между несколькими проектировщиками, и на этапе проектирования от-

дельной несущей конструкции получать оптимальную конструкцию с реальной геометрией поперечного сечения и минимально возможной массой при удовлетворении полученных граничных условий на этапе расчета несущей системы, состоящей из несущих конструкций упрощенной геометрии.

При оптимизации отдельных несущих конструкций получено улучшение их проектов. Так, угол поворота передней стенки оптимальной стойки меньше, чем у стойки в составе несущей системы с упрощенными по геометрии базовыми деталями: 0,0778 рад и 0,1495 рад соответственно, т. е. крутильная жесткость оптимальной стойки выше. Масса паллеты уменьшилась на 35,5 % по сравнению с серийным вариантом.

Список литературы

1. Атапин В.Г. Расчет деформированного состояния фундамента тяжелого многоцелевого станка // Вестник машиностроения. – 1989. – № 6. – С. 31–32.
2. Витес Б.И., Гроссман В.М., Кравцов О.А. Проектирование корпусных деталей металлорежущих станков с использованием метода конечных элементов // Станки и инструмент. – 1991. – № 5. – С. 13–14.
3. Пахматов В.А., Шалдыбин А.Я. Использование метода конечных элементов для анализа конструкций базовых деталей тяжелых станков // СТИИ. – 1992. – № 2. – С. 11–13.
4. Lull B. Statische und dynamische berechnung von werkzeugmaschinenstellen // Maschinenbautechnik. – 1977. – Vol. 26, N 1. – P. 10–13.
5. Roscher A. Berechnung der dynamischen eigenschaften von werkzeugmaschinenstellen mit hilfe der methode der finiten elemente // Maschinenbautechnik. – 1978. – Vol. 27, N 4. – P. 156–160.
6. Haug E.J., Choi K.K., Komkov V. Design sensitivity analysis of structural systems. – Orlando, Florida: Academic Press, 1986. – 381 p. – (Mathematics in Science and Engineering; vol. 177).
7. Rao S.S., Grandhi R.V. Optimum design of radial drilling machine structure to satisfy static rigidity and natural frequency requirements // Journal of Mechanical Design. – 1983. – Vol. 105, iss. 2. – P. 236–241. – doi: 10.1115/1.3258515.
8. Reddy C.P., Rao S.S. Automated optimum design of machine-tool structures for static rigidity, natural frequencies and regenerative chatter stability // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 1978. – Vol. 100, iss. 2. – P. 137–146. – doi: 10.1115/1.3439401.
9. Yoshimura M., Takeuchi Y., Hitomi K. Design optimization of machine-tool structures considering manufacturing cost, accuracy and productivity // Journal of Mechanical Design. – 1984. – Vol. 106, iss. 4. – P. 531–537. – doi: 10.1115/1.3258606.
10. Каминская В.В., Гильман А.М., Егоров Ю.Б. Об автоматизированных расчетах оптимальных размеров деталей и узлов станков // Станки и инструмент. – 1975. – № 3. – С. 2–5.
11. Каминская В.В., Гильман А.М. Оптимизация параметров несущих систем карусельных станков // Станки и инструмент. – 1978. – № 10. – С. 6–7.
12. Хомяков В.С., Яцков А.И. Оптимизация несущей системы одностоечного токарно-карусельного станка // Станки и инструмент. – 1984. – № 5. – С. 14–16.
13. Ravindran A., Ragsdell K.M., Reklaitis G.V. Engineering Optimization: methods and applications. – 2nd ed. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. – 688 p. – ISBN-10: 0-471-55814-1. – ISBN-13: 978-0-471-55814-9.
14. Bunday B.D. Basic optimisation methods. – London: Edward Arnold, 1984. – 136 p. – ISBN-13: 978-0-713-13506-0. – ISBN: 0-713-13506-9.
15. Атапин В.Г., Гапонов И.Е., Павин А.Г. Автоматизация проектирования тяжелых многоцелевых станков // I Всесоюзный съезд технологов-машиностроителей: тезисы докладов. – М., 1989. – С. 42–43.
16. Атапин В.Г. Сопротивление материалов: учебник. – М.: Юрайт, 2015. – 432 с. – ISBN 978-5-9916-5203-2.
17. Каминская В.В., Левина З.М., Решетов Д.Н. Станины и корпусные детали металлорежущих станков. – М.: Машгиз, 1960. – 362 с.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (70), January – March 2016, Pages 31–41

Optimization of multifunction machines constructions with required accuracy and productivity

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

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

Abstract

One of the main criteria of the supporting constructions (column, spindle head, bed) of the multifunction machine is the mass of constructions. It is required to find such distribution of material in the supporting constructions whereby conditions of strength reliability are satisfied with minimum possible mass. Supporting system, consisting of these optimum supporting constructions, has to provide the precision and productivity of machining. In order to support business objectives, the technology of rational designing of supporting constructions, offered by us, uses the principle of decomposition and the integrated work of the finite elements method with optimization methods. The main stages of this technology – optimization of the supporting system of the machine with the supporting constructions simplified on geometry and optimum design of the individual supporting constructions for definition of real geometry of cross section are considered. Calculation of the supporting system with the simplified supporting constructions (without edges of rigidity, partitions, etc.) is made for limit and operating conditions of working. Calculations showed that in the stage of the machine supporting system modeling for typical operating conditions the mass of the supporting system due to optimization is 35% less than the production version. Active restrictions in strain of an end face of a spindle in the direction of action increases the cutting force.

Due to high dimension of calculation models of the supporting constructions it is offered to use the substructure at a stage of optimum design of the individual supporting constructions on the basis of the principle of decomposition. The calculated strain field of the optimal column substructure is consistent with the strain field of the column, which is obtained when calculating the machine supporting system, consisting of simplified supporting constructions at satisfaction of precision standards of working. Restriction on the allowed strain for knots on an axis of y ($0.45 \cdot 10^{-6}$) is strictly carried out, and on the rest settlement strains there are less than allowed. The turning angle of the optimal column with real cross-section is less, than the turning angle of the column as part of supporting system with the supporting constructions of simplified geometry – 0.0778 rad and 0.1495 rad, respectively, i.e. torsion rigidity of the optimal column is higher. As a result of optimum design, a mass of the pallet, consisting of the moving-rotary table, is reduced by 35.5 % in comparison with a production version.

Keywords:

multifunction machines, design, supporting system, supporting constructions, finite elements method, optimization methods.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-31-41

References

1. Atapin V.G. Raschet deformirovannogo sostoyaniya fundamenta tyazhelogo mnogotsелеvogo stanka [Calculation of the deformed state of the foundation of a heavy multipurpose machine tool]. *Vestnik mashinostroeniya – Soviet Engineering Research*, 1989, no. 6, pp. 31–32. (In Russian)
2. Vites B.I., Grossman V.M., Kravtsov O.A. Proektirovanie korpusnykh detalei metallorazhreshchikh stankov s ispol'zovaniem metoda konechnykh elementov [Design of body parts of machine tools using finite element method]. *Stanki i instrument – Russian Engineering Research*, 1991, no. 5, pp. 13–14. (In Russian)
3. Pakhmotov V.A., Shaldybin A.Ya. Ispol'zovanie metoda konechnykh elementov dlya analiza konstruktivnykh bazovykh detalei tyazhelykh stankov [Using the finite element method for structural analysis of basic parts heavy machinery]. *STIN – Russian Engineering Research*, 1992, no. 2, pp. 11–13. (In Russian)

4. Lull B. Statische und dynamische berechnung von werkzeugmaschinenstellen. *Maschinenbautechnik*, 1977, vol. 26, no. 1, pp. 10–13.
5. Roscher A. Berechnung der dynamischen eigenschaften von werkzeug-maschinengestellten mit hilfe der methode der finiten elemente. *Maschinenbautechnik*, 1978, vol. 27, no. 4, pp. 156–160.
6. Haug E.J., Choi K.K., Komkov V. *Design sensitivity analysis of structural systems*. Mathematics in Science and Engineering. Vol. 177. Orlando, Florida, Academic Press, 1986. 381 p.
7. Rao S.S., Grandhi R.V. Optimum design of radial drilling machine structure to satisfy static rigidity and natural frequency requirements. *Journal of Mechanical Design*, 1983, vol. 105, iss. 2, pp. 236–241. doi: 10.1115/1.3258515
8. Reddy C.P., Rao S.S. Automated optimum design of machine-tool structures for static rigidity, natural frequencies and regenerative chatter stability. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1978, vol. 100, iss. 2, pp. 137–146. doi: 10.1115/1.3439401
9. Yoshimura M., Takeuchi Y., Hitomi K. Design optimization of machine-tool structures considering manufacturing cost, accuracy, and productivity. *Journal of Mechanical Design*, 1984, vol. 106, iss. 4, pp. 531–537. doi: 10.1115/1.3258606
10. Kaminskaya V.V., Gil'man A.M., Egorov Yu.B. Ob avtomatizirovannykh raschetakh optimal'nykh razmerov detalei i uzlov stankov [An automated calculation of the optimum sizes of parts and assemblies of machine tools]. *Stanki i instrument – Machines and Tooling*, 1975, no. 3, pp. 2–5. (In Russian)
11. Kaminskaya V.V., Gil'man A.M. Optimizatsiya parametrov nesushchikh sistem karusel'nykh stankov [Optimization of parameters of the bearing systems vertical lathes]. *Stanki i instrument – Machines and Tooling*, 1978, no. 10, pp. 6–7. (In Russian)
12. Khomyakov V.S., Yatskov A.I. Optimizatsiya nesushchei sistemy odnostoechnogo tokarno-karusel'nogo stanka [Optimization of the support system of single-column vertical turning and boring lathe]. *Stanki i instrument – Soviet Engineering Research*, 1984, no. 5, pp. 14–16. (In Russian)
13. Ravindran A., Ragsdell K.M., Reklaitis G.V. *Engineering Optimization: methods and applications*. 2nd ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2006. 688 p. ISBN-10: 0-471-55814-1. ISBN-13: 978-0-471-55814-9
14. Bunday B.D. *Basic optimization methods*. London, Edward Arnold Publ., 1984. 136 p. ISBN-13: 978-0-713-13506-0. ISBN: 0-713-13506-9.
15. Atapin V.G., Gaponov I.E., Pavin A.G. [Design automation of heavy machining centers]. *I Vsesoyuznyi s"ezd tekhnologov-mashinostroitelei. Tezisy dokladov* [Proceedings of the First All-Union Congress of Mechanical Engineering-technologists]. Moscow, 1989, pp. 42–43.
16. Atapin V.G. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Urait Publ., 2015. 432 p. ISBN 978-5-9916-5203-2.
17. Kaminskaya V.V., Levina Z.M., Reshetov D.N. *Staniny i korpusnye detali metallorazhreshchikh stankov* [Machine beds and case parts of machine tools]. Moscow, Mashgiz Publ., 1960. 362 p.

Article history:

Received 16 December 2015

Revised 15 January 2016

Accepted 15 February 2016

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОРОШКОВ Ti И Nb ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ*

*Ю.П. ШАРКЕЕВ^{1,2}, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией
Ж.Г. КОВАЛЕВСКАЯ^{2,1}, канд. техн. наук, доцент, ведущий инженер
М.А. ХИМИЧ^{3,1}, аспирант, инженер
Е.А. ИБРАГИМОВ⁴, старший преподаватель
А.А. САПРЫКИН⁴, канд. техн. наук, зав. кафедрой
В.И. ЯКОВЛЕВ⁵, канд. техн. наук, доцент
В.А. БАТАЕВ⁶, доктор техн. наук, профессор
(¹ИФПМ СО РАН, г. Томск,
²НИ ТПУ, г. Томск,
³НИ ТГУ, г. Томск,
⁴ЮТИ ТПУ, г. Юрга,
⁵АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул,
⁶НГТУ, г. Новосибирск)*

Статья поступила 16 ноября 2015

Рецензирование 11 января 2016

Принята к печати 11 февраля 2016

Ковалевская Ж.Г. – 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4,
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
e-mail: zhanna_kovalevskaya@mail.ru

Методами рентгеноструктурного анализа, растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа исследованы порошки с массовым соотношением 60 % Ti и 40 % Nb после механической активации в планетарной мельнице АГО-2С. Порошки перемешивались в течение 10, 15 и 20 мин. Частицы Ti и Nb в процессе перемешивания и интенсивной пластической деформации объединялись в агломераты размером от 10 до 30 мкм. Внутри агломератов Ti и Nb распределялись равномерно. По мере увеличения времени активации количество растворенного в титане ниобия росло, достигая при 20 минутах состава Ti₃₇Nb. При этом из фаз исходных компонентов сформировалась β-фаза – твердый раствор замещения Ti и Nb. С увеличением времени активации доля β-фазы возрастала. Во всем интервале времени обработки в сплаве сохранялся α-Ti. В заключение показано, что форма и гранулометрический состав полученного порошка сплава Ti-Nb, его фазовый состав с равномерным распределением компонентов позволят использовать его в аддитивной технологии селективного лазерного спекания.

Ключевые слова: титан, ниобий, механическая активация, смесь порошка, агломерация, механическое сплавление, фазовый состав, сплав Ti-40Nb.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-42-51

Введение

Механическая активация порошков в мельницах [1] используется как один из методов получения лигатур для металлургии. Измельчение

порошка обеспечивает получение максимальной поверхности вещества, активация накапливает энергию в виде дефектов кристаллического строения и позволяет снизить энергию активации системы при последующих превращениях.

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

При механической активации смеси порошков двух и более веществ за счет твердофазного перемешивания и аномально высокой диффузии происходит формирование твердых растворов. При высокой растворимости компонентов друг в друге формируется вещество, состоящее из одной фазы – твердого раствора компонентов друг в друге. В результате из перемешиваемых веществ образуется сплав, созданный так называемым «сухим» технологическим процессом [1, 2].

В последнее время получаемые механической активацией порошки используют в аддитивной технологии селективного лазерного спекания (СЛС) для получения деталей из многокомпонентных сплавов [3–6]. При спекании порошков чистых компонентов сверхвысокие скорости протекания процесса плавления и охлаждения вещества затрудняют взаимную диффузии компонентов сплава друг в друга, если они представляют собой отдельные объекты [7]. Предварительная механическая активация смеси порошков решает эту проблему.

В работе представлены результаты исследования строения и фазового состава сплава двухкомпонентной системы титан-ниобий, состава $Ti - 40 \text{ мас. \% Nb}$, полученного механической активацией из порошков чистых компонентов с учетом параметров обработки.

Материал и методика исследования

Оборудование для эксперимента было предоставлено Проблемной научно-исследовательской лабораторией СВС им. В.В. Евстигнеева Алтайского государственного технического университета. Механическая активация осуществлялась в планетарной мельнице типа АГО-2С, успешно используемой для механохимической активации и синтеза неорганических материалов [8, 9]. Принцип действия планетарной мельницы заключается в использовании двух барабанов объемом 135 мл, которые вращаются вокруг центральной оси и одновременно вокруг собственной оси в противоположном направлении. В барабаны загружают металлический порошок и мелющие тела-шары диаметром 6...10 мм из стали ШХ15. Частицы порошка претерпевают множество соударений с мелющими шарами и стенками барабана. Это обеспечивает высокую кинетическую энергию мелющих тел. Из-за

большой скорости их движения создаются высокие напряжения в активируемом веществе и разогрев перемешиваемого материала. Для снижения температуры применяют водоохлаждаемую камеру.

В эксперименте использовались порошки технически чистого титана марки ПТМ и ниобия марки НПБ-а. Порошки смешивались в массовом соотношении 60 % Ti и 40% Nb порциями по 10 г. В смесь порошков добавлялся так называемый агент, контролирующий процесс (АКП). Агент был выбран из группы спиртов, так как использование органических соединений в роли АКП показало хорошие результаты в работах других исследователей [10, 11]. Время обработки порошка составляло 10, 15, и 20 мин.

Для оценки морфологии, структуры, элементного и фазового анализа полученных порошков в ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН проводилась растровая электронная микроскопия (РЭМ) и энергодисперсионный микроанализ (ЭДМА) на микроскопе LEO EVO 50 (Zeiss, Германия) и рентгеноструктурный анализ (РСА) – на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 (Буревестник, Россия) в монохроматическом CoK_{α} -излучении по схеме Брегга-Брентано. Проводились исследования свободно насыпанных порошков и на шлифах порошков, залитых в эпоксидную смолу. Поверхность шлифа травилась раствором 10 об. % HCl + 80 об. % H_2SO_4 + 10 об. % H_2O , затем на нее напылялось проводящее покрытие из серебра.

Результаты эксперимента

Как показали результаты РЭМ, частицы исходных порошков Ti и Nb имеют осколочную форму (рис. 1, а, б). Такая форма частиц характерна для металлов, получаемых электролитическим рафинированием. Порошок изготавливают путем измельчения осадка [12, 13].

Частицы Nb были мельче частиц Ti . Основным объемом порошка Ti составляли частицы размером от 5 до 20 мкм, Nb – от 2 до 8 мкм (рис. 2).

Как показал РСА, порошок Ti состоял из α -фазы – низкотемпературной модификации с ГПУ кристаллической решеткой [14]. Порошок ниобия состоял из β -фазы с ОЦК кристаллической решеткой, характерной для равновесного состояния технически чистого Nb [14].

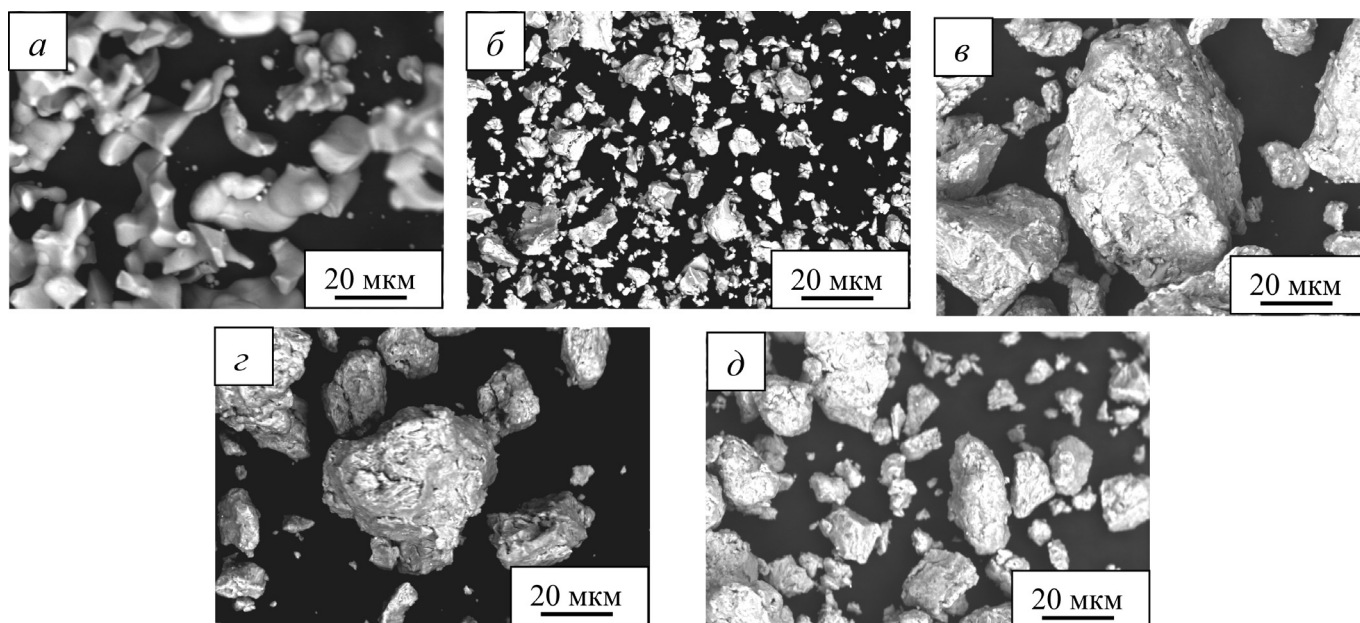


Рис. 1. РЭМ-изображение порошка Ti (а), Nb (б) и порошка, полученного механической активацией в течение 10 мин (в), 15 мин (з) и 20 мин (д)

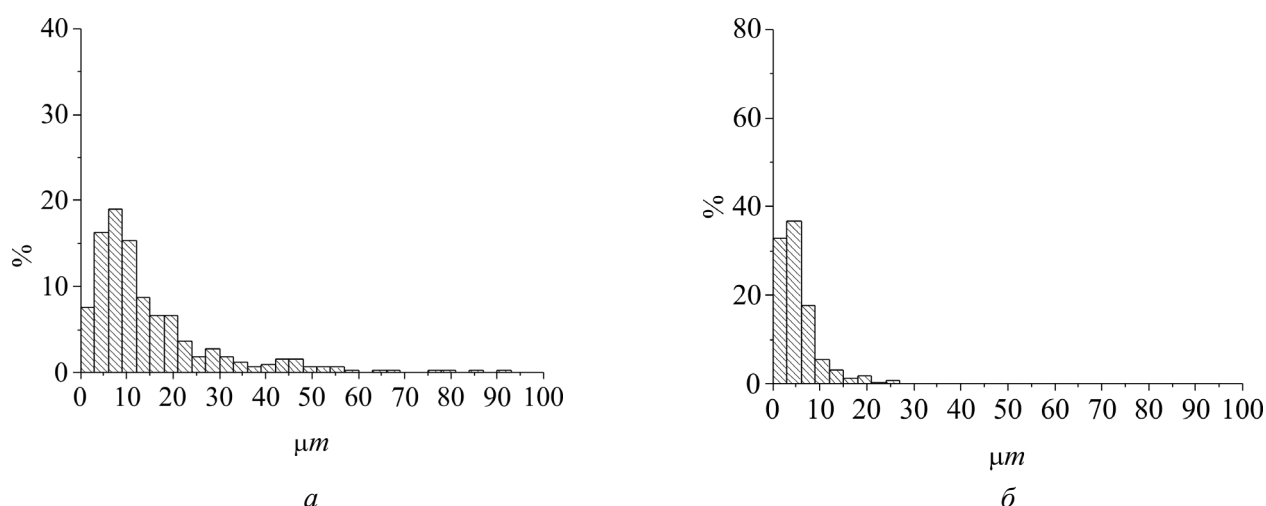


Рис. 2. Гистограммы распределения частиц порошка по размерам: Ti (а), Nb (б)

По данным ЭДМА, порошок Ti технически чистый. В отдельных частицах Nb идентифицируется примесь Ta, что характерно для порошка Nb, полученного электролитическим способом [13]. На поверхности отдельных частиц порошка обоих металлов идентифицируется кислород, что предполагает наличие оксидов титана и ниобия. Метод ЭДМА некорректно оценивает количество кислорода в составе материала, поэтому идентификация оксидов требует дополнительных исследований. Рентгеноструктурно оксиды металлов не выявлены.

В процессе механической активации смеси порошка Ti и Nb в течение 10 мин формируется

сыпучая масса образовавшихся частиц сплава Ti-Nb. Происходит объединение исходных частиц в объекты большего размера и формируются агломераты чешуйчатого строения (рис. 1, в). Основная часть порошка имела неправильную форму и размер частиц в интервале (10...30) мкм. Меньшая часть сформировавшихся частиц была овальной формы размером около 100 мкм. Отдельные агломераты имели размер до 180 мкм. Распределению частиц по размерам характерен бимодальный вид (рис. 3, а). По объему материала доля крупных частиц соизмерима с долей мелких.

С увеличением времени обработки до 15 мин внешние характеристики получаемого порошка

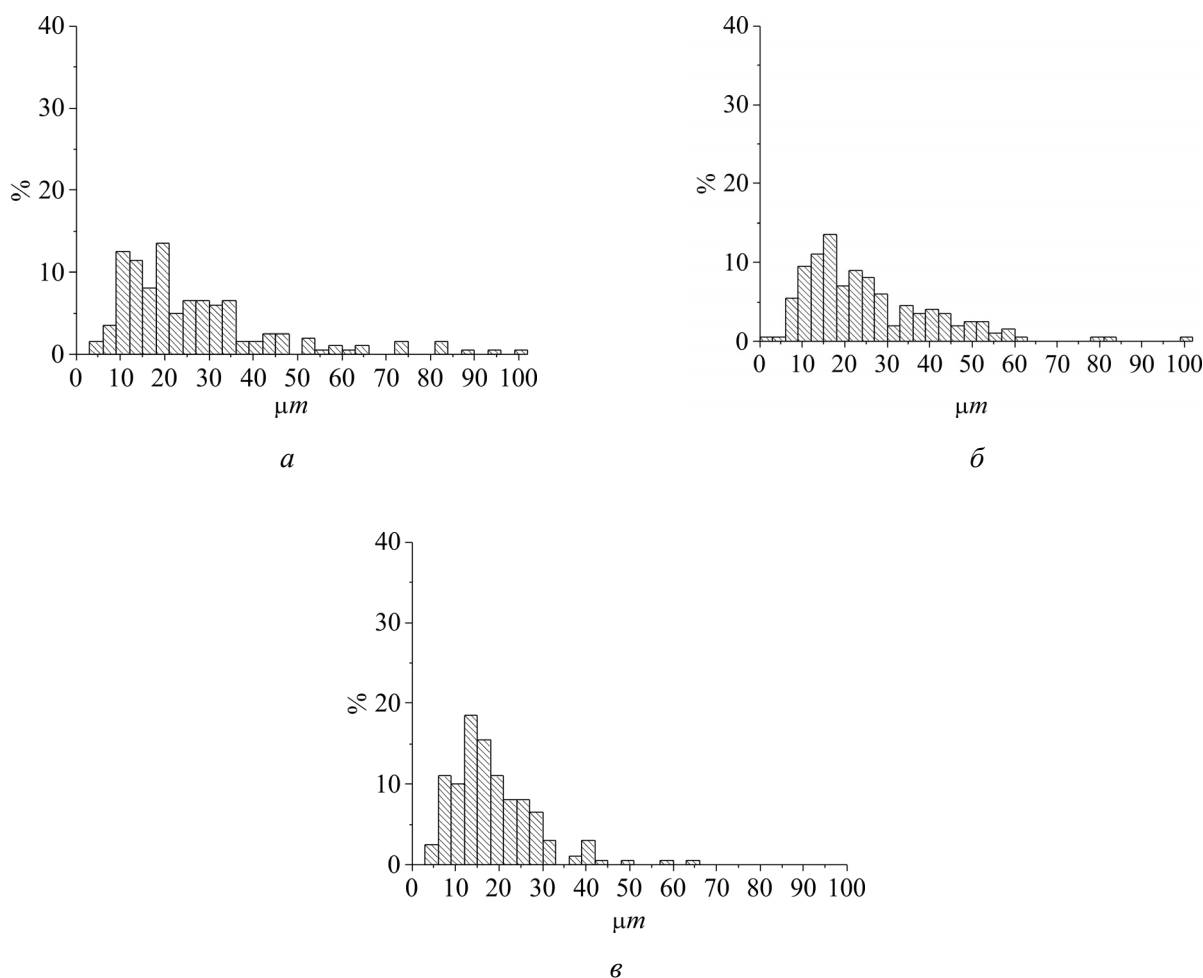


Рис. 3. Гистограммы распределения по размерам частиц порошка, полученного механической активацией в течение 10 мин (а), 15 мин (б) и 20 мин (в)

не меняются. Порошок сохраняет сыпучесть. Увеличение продолжительности воздействия приводит к частичной сфероидизации крупных агломератов и уменьшению их максимального размера до 80 мкм (рис. 1, з). Мелкие частицы не изменяют своего размера, но их объемная доля за счет уменьшения доли крупных частиц возрастает. Бимодальный характер распределения частиц по размерам сохраняется (рис. 3, б).

Дальнейшее увеличение времени обработки до 20 мин приводит к налипанию части обработанного порошка на мелющие шары, а в объеме свободной массы – к образованию конгломератов. Конгломераты представляют собой рыхлые образования, которые можно разделить на отдельные частицы. В результате увеличения времени обработки снизился разброс гранулометрического состава порошка и произошло смещение размера основной части частиц в область меньших значений от 5 до 25 мкм (рис. 3, в). Значительного изменения формы частиц не

наблюдалось (см. рис. 1, д). Бимодальный характер распределения частиц по размерам сглаживается.

Механическая обработка приводит к изменению соотношения фаз в исследуемом порошке. Результаты РСА показали, что с увеличением времени обработки интенсивность пиков α -фазы снижается (рис. 4). Тем не менее при наибольшем интервале обработки в 20 мин в порошке сохраняется α -Ti. Пики β -фазы смещаются в область больших углов, что свидетельствует о формировании на основе β -Nb твердого раствора Ti и Nb. Смещение пиков обусловлено уменьшением параметра ОЦК кристаллической решетки при замещении атомов Nb на атомы Ti [14].

Распределение компонентов сплава в частицах порошка после механической активации наглядно демонстрирует метод картирования ЭДМА. Как при исследовании поверхности порошка, так и при исследовании сечения частиц порошка обнаружено, что оба металла распреде-

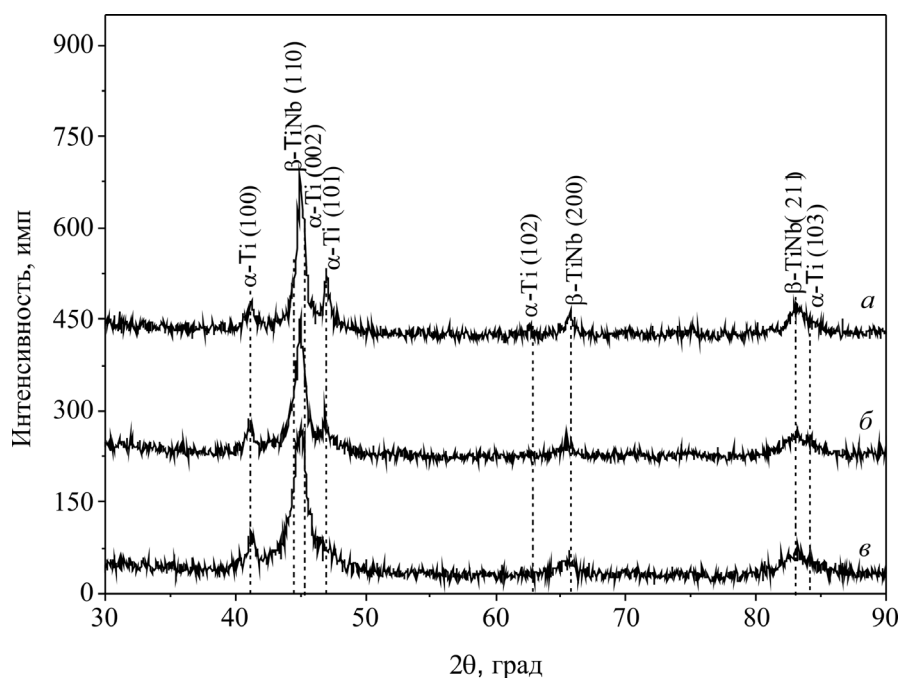


Рис. 4. Дифрактограммы порошка, полученного механической активацией в течение 10 мин (а), 15 мин (б) и 20 мин (в)

ляются на поверхности и в объеме частиц равномерно. При времени активации 10 мин среднее количество Ti на поверхности частиц составляло 67 % и при увеличении времени активации снижалось до 65 %. При исследовании сечения частиц порошка получены близкие значения концентраций компонентов. Когда время активации составляло 10 мин, среднее количество Ti внутри частиц соответствовало 66 %. При увеличении времени активации до 20 мин количество Ti снижалось до 63 %. При этом как на поверхности частиц, так и внутри их присутствовал разброс значений концентрации компонентов. На поверхности частицы-агломерата концентрация Ti может меняться от 49 до 89 %. Мелкие частицы соответствуют по концентрации чистому Ti. Но доля таких частиц незначительная. Частицы чистого Nb отсутствовали. С увеличением времени активации снижался интервал разброса значений концентраций элементов в частицах порошка. При этом частицы чистого Ti исчезли.

Для сопоставления внутреннего строения получаемых частиц сплава и распределения элементов в них было проведено травление поверхности сечения частиц порошка. На РЭМ-изображении видно, что строение частиц слоистое (рис. 5).

Частицы представляют собой плотно соединенные в пачки чешуйки материала. В некото-

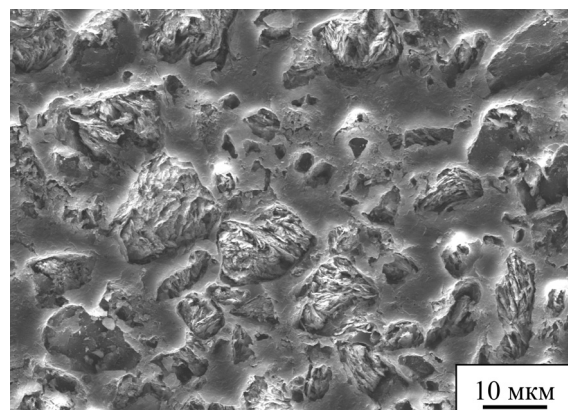


Рис. 5. РЭМ-изображение сечения частиц порошка, полученного механической активацией в течение 15 мин

рых частицах наблюдалась совместная пластическая деформация уже сложившихся в пачки агломератов.

При картировании поверхности сечения частиц неоднородности распределения элементов не наблюдалось. Контраст распределения Ti и Nb не наследует слоистую структуру (рис. 6).

Следовательно, при смешивании происходит взаимная диффузия элементов друг в друга с формированием однородного сплава Ti-Nb.

Обсуждение результатов

В основе процесса формирования сплава из чистых компонентов при механической активации

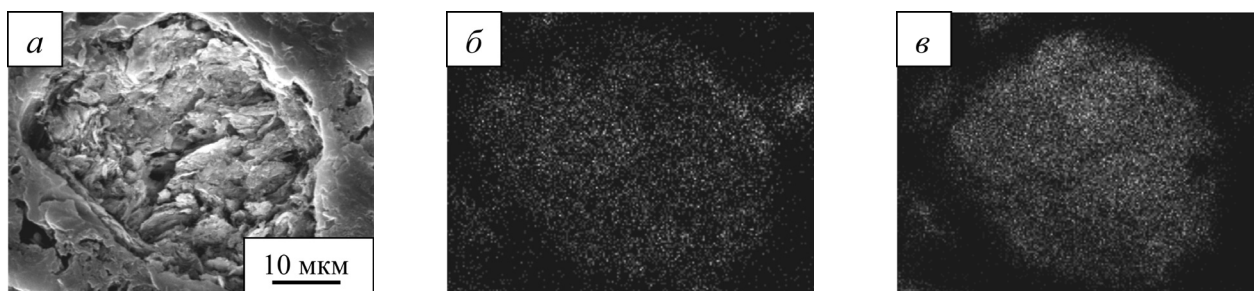


Рис. 6. РЭМ-изображение частицы порошка, полученного механической активацией в течение 15 мин (а), и распределение компонента Ti (б) и Nb (в) по сечению частицы

ции лежит механизм холодной сварки в условиях интенсивной пластической деформации [1, 2]. В результате соударения частиц компонентов между собой и мелющими телами под действием напряжения сжатия и сдвига происходит пластическая деформация и дробление частиц компонентов. На образовавшихся новых поверхностях частиц присутствует множество открытых атомных связей. Открытые атомные связи при контакте двух активных поверхностей образуют прочную металлическую связь. Если контактируют поверхности частиц разных компонентов, то наряду с образованием прочной связи по границе раздела будет происходить процесс диффузии компонентов друг в друга. А так как процесс перемешивания продолжается, то выделяемое тепло и дополнительная деформация будут поддерживать процесс диффузии и перемешивания компонентов. В результате в нашем случае, когда компоненты Ti и Nb полностью растворимы друг в друге, должен получиться общий твердый раствор – β -фаза с концентрацией компонентов в соответствии с массовым соотношением загружаемых компонентов 60 % Ti и 40 % Nb и соответственно сплав состава Ti40Nb. Как показали результаты элементного анализа полученных порошков, после 10 мин обработки формируется сплав состава Ti33Nb. При увеличении времени обработки до 15 мин – Ti35Nb и при максимальном времени воздействия 20 мин – Ti37Nb. На неполное растворение компонентов друг в друге указывает и наличие в фазовом составе получаемого порошка небольшой доли α -Ti (см. рис. 4). В случае полной растворимости компонентов в сплаве на дефрактограммах α -фаза не должна идентифицироваться [15, 16]. Следовательно, для полного завершения процесса формирования сплава требуется большее время обработки. По полученной зависимости состава сплава

от времени обработки можно предположить, что необходимое время для полной механической активации составит 25...30 мин, что соответствует данным, полученным в работе [17].

У метода механической активации имеются недостатки – холодная сварка происходит не только между частицами компонентов, но и между компонентами и мелющими телами. Этот эффект можно использовать как способ получения покрытия [18], но при получении сплава проявление данного эффекта следует избегать, так как снижается выход готового продукта [16]. Кроме того, размер и форма получаемых частиц должны быть оптимизированы для дальнейшего использования в технологии СЛС. Форма частиц порошка должна быть близкой к сферической с рекомендуемым размером 10...50 мкм [19].

Рассмотрим, как время активации повлияло на гранулометрический состав, форму получаемого порошка и выход готового продукта. На основе собственных исследований авторов работ [8, 9], а также [15–17] можно описать процесс формирования порошка сплава следующим образом. В первые десять минут активации за счет динамических ударов стальных шаров и взаимного контакта происходит интенсивная пластическая деформация частиц Ti и Nb. Так как частицы Nb мельче, требуется меньшее напряжение для их деформации, и частицы данного компонента полностью смешиваются с фрагментами частиц Ti, образуя агломераты. Частицы Ti крупнее и их весовая доля больше, поэтому некоторые фрагменты разрушенных частиц сохраняют обособленность и химический состав. При многократном соударении агломераты вновь деформируются, за счет чего происходит перемешивание материала двух компонентов внутри агломерата. Далее агломераты вновь разрушаются и т. д.

При активации в первую очередь происходит взаимодействие частиц между собой. Поэтому при прерывании процесса на 10-й мин на выходе получают достаточно крупные агломераты чешуйчатой формы и более мелкие фрагменты разрушенных агломератов. О том, что весь представленный материал является сплавом, говорят результаты картирования. Компоненты равномерно распределены по объему во всех типах образовавшихся частиц. Приложенное напряжение и нагрев приводят к взаимной диффузии атомов компонентов в кристаллическую решетку друг друга. Налипания продукта на мелющие тела не наблюдается.

При увеличении времени обработки до 15 мин процесс формирования частиц несколько изменяется. Так как к этому времени в частицах накапливается большое количество дефектов кристаллического строения, то процесс их разрушения начинает преобладать над агломерацией. В результате снижается средний размер основной массы частиц и крупных агломератов. Форма агломератов становится более равноосной.

Дальнейшее увеличение времени активации должно привести к исчезновению бимодального характера распределения частиц по размерам и приобретению ими формы, близкой к округлой, что и наблюдается в нашем эксперименте. Однако увеличение времени обработки до 20 мин активизирует процесс налипания частиц сплава на мелющие шары, за счет чего снижается выход готового продукта. Процесс происходит в присутствии АКП и в условиях непрерывного охлаждения. Однако этого недостаточно, чтобы исключить процесс налипания частиц к мелющим шарам. Следовательно, требуется использовать дополнительный фактор, усиливающий эффект от АКП.

Выводы

1. Методом механической активации в планетарной мельнице АГО-2С из смеси порошков титана и ниобия в соотношении Ti – 40 мас. % Nb получен порошок двухкомпонентного сплава титан-ниобий.

2. В полученном двухкомпонентном сплаве по мере увеличения времени активации количество растворенного ниобия в титане растёт,

достигая при 20 мин активации соотношения Ti37Nb.

3. В процессе механической активации фазы основных компонентов – α -Ti и β -Nb – растворяются друг в друге и формируют твердый раствор Ti и Nb – β -TiNb. С увеличением времени активации доля β -фазы возрастает.

4. Форма и гранулометрия полученного порошка сплава Ti-Nb, его фазовый состав с равномерным распределением компонентов позволяют использовать его в аддитивной технологии селективного лазерного спекания.

Список литературы

1. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // Успехи химии. – 2006. – Т. 75, № 3. – С. 203–215.
2. Механическое легирование / Ю.В. Кузьмич, И.Т. Колесникова, В.И. Серб, Б.М. Фрейдин. – М.: Наука, 2005. – 213 с.
3. Production of porous β -type Ti–40Nb alloy for biomedical applications: comparison of selective laser melting and hot pressing / K. Zhuravleva, M. Bönisch, K.G. Prashanth, U. Hempel, A. Helth, T. Gemming, M. Calin, S. Scudino, L. Schultz, J. Eckert, A. Gebert // Materials. – 2013. – Vol. 6, iss. 12. – P. 5700–5712. – doi: 10.3390/ma6125700.
4. Porous low modulus Ti40Nb compacts with electrodeposited hydroxyapatite coating for biomedical applications / K. Zhuravleva, A. Chivu, A. Teresiak, S. Scudino, M. Calin, L. Schultz, J. Eckert, A. Gebert // Materials Science and Engineering: C. – 2013. – Vol. 33, iss. 4. – P. 2280–2287. – doi: 10.1016/j.msec.2013.01.049.
5. Comparison of activation technologies powder ECP-1 for the synthesis of products using SLS / E.V. Babakova, A.V. Gradoboev, A.A. Saprykin, E.A. Ibragimov, V.I. Yakovlev, A.V. Sobachkin // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 756. – P. 220–224. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.220.
6. Saprykin A.A., Ibragimov E.A., Yakovlev V.I. Influence of mechanical activation of powder on SLS process // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 143–147. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.143.
7. Sintering behavior and mechanical properties of a metal injection molded Ti–Nb binary alloy as biomaterial / D. Zhao, K. Chang, T. Ebel, H. Nie, R. Willumeit, F. Pyczak // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – Vol. 640. – P. 393–400. – doi: 10.1016/j.jallcom.2015.04.039.
8. 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 // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2013. – Vol. 77, iss. 2. – P. 120–122. – doi: 10.3103/S1062873813020275.

9. Динамический тепловой взрыв в механически активированных порошковых смесях / В.В. Евстигнеев, Е.В. Смирнов, А.В. Афанасьев, В.Ю. Филимонов, В.И. Яковлев, М.В. Логинова // Ползуновский вестник. – 2007. – № 4. – С. 162–167.

10. Nouri A., Hodgson P.D., Wen C. Effect of ball-milling time on the structural characteristics of biomedical porous Ti–Sn–Nb alloy // Materials Science and Engineering: C. – 2011. – Vol. 31, iss. 5. – P. 921–928. – doi: 10.1016/j.msec.2011.02.011.

11. Huang H.S., Lin Y.C., Hwang K.S. Effect of lubricant addition on the powder properties and compacting performance of spray-dried molybdenum powders // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. – 2002. – Vol. 20, iss. 3. – P. 175–180. – doi: 10.1016/S0263-4368(01)00062-2.

12. Рахманкулов М.М. Металлургия стратегических металлов и сплавов. – М.: Теплотехник, 2008. – 504 с. – ISBN 5-9845707-4-2.

13. Константинов В.И. Электролитическое получение тантала, ниобия и их сплавов. – М.: Металлургия, 1977. – 240 с.

14. Носова Г.И. Фазовые превращения в сплавах титана. – М.: Металлургия, 1968. – 180 с.

15. Mechanical alloying of β -type Ti–Nb for biomedical applications / K. Zhuravleva, S. Scudino, M.S. Khoshkhoo, A. Gebert, M. Calin, L. Schultz // Advanced Engineering Materials. – 2013. – Vol. 15, iss. 4. – P. 262–268. – doi: 10.1002/adem.201200117.

16. Phase transformations in ball-milled Ti–40Nb and Ti–45Nb powders upon quenching from the β -phase region / K. Zhuravleva, M. Bönisch, S. Scudino, M. Calin, L. Schultz, J. Eckert, A. Gebert // Powder Technology. – 2014. – Vol. 253. – P. 166–171. – doi: 10.1016/j.powtec.2013.11.002.

17. Сметкин А.А. Исследование эволюции порошковой интерметаллической системы «титан–алюминий» при механическом легировании и консолидации // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2010. – Т. 12, № 2. – С. 22–30.

18. Исследование взаимодействия серпентина с железом при формировании покрытий на поверхности стальных деталей / Ж.Г. Ковалевская, П.В. Уваркин, С.В. Веселов, А.И. Толмачев, М.А. Химич // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3 (56). – С. 120–123.

19. Шишковский И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. – М.: Физматлит, 2009. – 417 с. – ISBN 978-5-9221-1122-5.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (70), January – March 2016, Pages 42–51

Investigation of the structure and phase composition of Ti and Nb powders after mechanical activation

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

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

Khimich M.A.^{3,1}, Ph.D. student, Engineer, e-mail: makhimich@gmail.com

Ibragimov E.A.⁴, Senior Lecturer, e-mail: egor83@lisy.ru

Saprykin A.A.⁴, Ph.D. (Engineering), Head of department, e-mail: sapraa@tpu.ru

Yakovlev V.I.⁵, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: anicpt@rambler.ru

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

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, 2/4 Akademicheskoy ave., Tomsk, 634021, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

³ National Research Tomsk State University, 36 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

⁴ Yurga Institute of Technology, TPU Affiliate, 26 Leningradskaya st., Yurga, 652055, Russian Federation

⁵ I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

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

Abstract

Features of structure and phase composition of the powders of Ti and Nb after mechanical activation are investigated by the methods of X-ray diffraction, scanning electron microscopy and energy-dispersive microanalysis. The powders were mixed in mass ratio 60 % Ti and 40 % Nb in planetary mill AGO-2C during 10, 15 and 20 minutes. Water-cooled camera was used to reduce the temperature of the process. It is shown that during the process of mechanical activation the powder of two-component composition is obtained. During the process of severe plastic deformation and mixing particles of Ti and Nb are combined into larger objects. The agglomerates with scale structure are formed. The size distribution of powder particles is characterized by bimodal type. Most particles have a size from 10 to microns. A smaller part of formed particles has a size of about 100 microns. As a result of treatment time increasing the scatter of the powder granulometric composition is reduced with shifting to lower values. It was observed that during activation time increase the content of Nb saluted in Ti increases and reaches composition Ti₃₇Nb at 20 minutes of activation. Ti and Nb are equilibrium distributed inside the particles. Herewith the main β -phase forms from phases of initial components. β -phase is the substitutional solid solution of Ti and Nb. The β -phase quantity increases with the activation time increasing. The phase of initial α -Ti is retained in the alloy throughout the treatment time. Increasing of treatment time or using of additive factors which enhance the effect of mechanical activation is necessary to complete the process of monophase alloy formation. It is shown in conclusion that the form and granulometric composition of obtained Ti-Nb alloy powder, its phase composition with equilibrium distribution of components allow use it in additive technology of selective laser sintering.

Keywords:

titanium, niobium, mechanical activation, powder mixture, agglomeration, mechanical alloying, phase composition, Ti-40Nb alloy.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-42-51

References

1. Boldyrev V.V. Mekhanokhimiya i mekhanicheskaya aktivatsiya tverdykh veshchestv [Mechanochemistry and mechanical activation of solids]. *Uspekhi khimii – Russian Chemical Reviews*, 2006, vol. 75, no. 3, pp. 203–215. (In Russian)
2. Kuz'mich Yu.V., Kolesnikova I.T., Serba V.I., Freidin B.M. *Mekhanicheskoe legirovanie* [Mechanical alloying]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 213 p.
3. Zhuravleva K., Bönisch M., Prashanth K.G., Hempel U., Helth A., Gemming T., Calin M., Scudino S., Schultz L., Eckert J., Gebert A. Production of porous β -type Ti–40Nb alloy for biomedical applications: comparison of selective laser melting and hot pressing. *Materials*, 2013, vol. 6, iss. 12, pp. 5700–5712. doi: 10.3390/ma6125700
4. Zhuravleva K., Chivu A., Teresiak A., Scudino S., Calin M., Schultz L., Eckert J., Gebert A. Porous low modulus Ti40Nb compacts with electrodeposited hydroxyapatite coating for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 2013, vol. 33, iss. 4, pp. 2280–2287. doi: 10.1016/j.msec.2013.01.049
5. Babakova E.V., Gradoboev A.V., Saprykin A.A., Ibragimov E.A., Yakovlev V.I., Sobachkin A.V. Comparison of activation technologies powder ECP-1 for the synthesis of products using SLS. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 756, pp. 220–224. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.220
6. Saprykin A.A., Ibragimov E.A., Yakovlev V.I. Influence of mechanical activation of powder on SLS process. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 143–147. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.143
7. Zhao D., Chang K., Ebel T., Nie H., Willumeit R., Pyczak F. Sintering behavior and mechanical properties of a metal injection molded Ti–Nb binary alloy as biomaterial. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 640, pp. 393–400. doi: 10.1016/j.jallcom.2015.04.039
8. Popova A.A., Sobachkin A.V., Nazarov I.V., Yakovlev V.I., Loginova M.V., Sitnikov A.A. Dynamic diffraction 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
9. Evstigneev V.V., Smirnov E.V., Afanas'ev A.V., Filimonov V.Yu., Yakovlev V.I., Loginova M.V. Dinamicheskii teplovoi vzryv v mekhanicheski aktivirovannykh poroshkovykh smesyakh [Dynamic thermal explosion in mechanically activated powder mixtures]. *Polzunovskii vestnik – Polzunov Bulletin*, 2007, no. 4, pp. 162–167.
10. Nouri A., Hodgson P.D., Wen C. Effect of ball-milling time on the structural characteristics of biomedical porous Ti–Sn–Nb alloy. *Materials Science and Engineering: C*, 2011, vol. 31, iss. 5, pp. 921–928. doi: 10.1016/j.msec.2011.02.011

11. Huang H.S., Lin Y.C., Hwang K.S. Effect of lubricant addition on the powder properties and compacting performance of spray-dried molybdenum powders. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2002, vol. 20, iss. 3, pp. 175–180. doi: 10.1016/S0263-4368(01)00062-2
12. Rakhmankulov M.M. *Metallurgiya strategicheskikh metallov i splavov* [Metallurgy of strategic metals and alloys]. Moscow, Teplotekhnika Publ., 2008. 504 p. ISBN 5-9845707-4-2
13. Konstantinov V.I. *Elektroliticheskoe poluchenie tantala, niobiya i ikh splavov* [The electrolytic production of tantalum, niobium and their alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 240 p.
14. Nosova G.I. *Fazovye prevrashcheniya v splavakh titana* [Phase transformations in titanium alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1968. 180 p.
15. Zhuravleva K., Scudino S., Khoshkhoo M.S., Gebert A., Calin M., Schultz L. Mechanical alloying of β -type Ti-Nb for biomedical applications. *Advanced Engineering Materials*, 2013, vol. 15, iss. 4, pp. 262–268. doi: 10.1002/adem.201200117
16. Zhuravleva K., Bönisch M., Scudino S., Calin M., Schultz L., Eckert J., Gebert A. Phase transformations in ball-milled Ti-40Nb and Ti-45Nb powders upon quenching from the β -phase region. *Powder Technology*, 2014, vol. 253, pp. 166–171. doi: 10.1016/j.powtec.2013.11.002
17. Smetkin A.A. Issledovanie evolyutsii poroshkovoi intermetallicheskoi sistemy “titan-alyuminii” pri mekhanicheskom legirovanii i konsolidatsii [The investigation of the evolution of intermetallic system “titanium-aluminum” under mechanical alloying and consolidation]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie – PNIPU Bulletin. The mechanical engineering, materials science*, 2010, vol. 12, no. 2, pp. 22–30.
18. Kovalevskaya Zh.G., Uvarin P.V., Veselov S.V., Tolmachov A.I., Himich M.A. Issledovanie vzaimodeistviya serpentina s zhelezom pri formirovanii pokrytii na poverkhnosti stal'nykh detalei [Investigation of interaction of serpentine with iron at forming a coating on the surface of steel parts]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2012, no. 3 (56), pp. 120–123.
19. Shishkovskii I.V. *Lazernyi sintez funktsional'no-gradientnykh mezostruktur i ob'emnykh izdelii* [Laser synthesis of functionally graded mesostructures and bulk products]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 424 p. ISBN 978-5-9221-1122-5

Funding

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

Article history:

Received 16 November 2015

Revised 11 January 2016

Accepted 11 February 2016

УДК 620.17; 620.18; 621.73; 621.77

ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ МЕГАПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ 09Г2С*

*С.П. ЯКОВЛЕВА, доктор техн. наук, профессор
С.Н. МАХАРОВА, канд. техн. наук
П.Г. МОРДОВСКОЙ, канд. техн. наук
(Институт физико-технических проблем
Севера СО РАН, г. Якутск)*

Поступила 1 ноября 2015
Рецензирование 11 января 2016
Принята к печати 11 февраля 2016

Мордовской П.Г. – 677891, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1,
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
e-mail: mordov@yandex.ru

Проведено исследование влияния комбинированной мегапластической деформации методами равноканального углового прессования (РКУП) при 450 °С и всестороннейковки (ВК) с суммарной степенью деформации 60 % на структуру и механические свойства ферритно-перлитной стали 09Г2С. Показано, что комбинированная мегапластическая деформация обусловила получение ультрамелкозернистой структуры со средним размером зерен феррита 3,8 мкм, перлита 2,8 мкм с пластинчато-зернистой морфологией перлитных колоний со средней толщиной пластинок цементита и свободных карбидов менее первых десятков нанометров. Полученная структура обусловила повышение предела текучести по сравнению с исходной крупнозернистой структурой на 44 %, предела прочности – на 32 %. Наблюдается рост пластичности в 3,5 раза по сравнению со значением, полученным для стали в состоянии после РКУП. Результаты показывают возможность применения комбинированной обработки РКУП+ВК в качестве технологии изготовления заготовок сложной формы с повышенными прочностными свойствами и достаточным сохранением пластичности за счет создания ультрамелкозернистой структуры с наноразмерными карбидами.

Ключевые слова: сталь, равноканальное угловое прессование, всесторонняяковка, наноструктурирование, структура, механические свойства.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-52-59

Введение

Конструкционную прочность сталей определяют следующие структурные факторы: размер зерна и состояние границ зерен, дефектность структуры и напряженное состояние, морфология основных и вторичных фаз. Повышения прочности стали можно добиться способом применения различных термических, химических,

деформационных и комбинированных обработок. В последние десятилетия в связи с ростом стоимости легирующих элементов все больший интерес вызывают комбинированные термометформационные обработки, которые позволяют в низколегированных конструкционных сталях получать значения прочности, характерные для средне- и высоколегированных сталей. Существует ряд работ по исследованию комби-

* Финансирование: Программа фундаментальных исследований Президиума РАН № 8, проект 8.22. «Формирование нано-, субмикронной структуры при объемных и поверхностных термосиловых воздействиях после мегапластической деформации как основа для разработки конструкционных сталей с высоким уровнем свойств и адаптивным поведением при эксплуатации» (№ гос. рег. 01201257844).

нированных технологий, включающих в себя наноструктурирование методом РКУП с последующим деформированием сжатием (ковка, штамповка) для пластичных материалов, таких как алюминиевые и магниевые сплавы [1–6]. В настоящей работе исследованы структура и механические свойства конструкционной стали 09Г2С после комбинированной мегапластической деформации, состоящей из равноканального углового прессования (РКУП) и всестороннейковки (ВК). Как известно, при реализации РКУП заготовка неоднократно продавливается в специальной оснастке через два канала с одинаковыми поперечными сечениями, пересекающимися под углом Φ [7–10]. К недостаткам РКУП в качестве технологии получения высокопрочных материалов помимо снижения пластичности можно отнести ограничение заготовок по размерам и форме. Данный недостаток можно устранить последующей ВК, в процессе которой заготовка подвергается многократному повторению операций свободнойковки. Дополнительная обработка ВК открывает новые перспективы применения технологии РКУП, так как существенно расширяется номенклатура изделий, обладающих наносубмикронной структурой с уникальными свойствами, полученными после наноструктурирования [11–19].

Целью работы является исследование структуры и механических свойств стали 09Г2С, обработанной комбинированной мегапластической деформацией методами равноканального углового прессования и свободной всестороннейковки, что должно обеспечить получение заготовок сложной формы с повышенными прочностными свойствами.

Материал и методы исследования

Исследования проведены на низколегированной конструкционной стали 09Г2С (Fe–1.34Mn–0.64Si–0.14Cr–0.09Ni–0.09C, мас. %). Форма заготовок цилиндрическая, диаметр 20 мм, длина 100 мм. РКУП проведено по маршруту «Вс» (поворот на 90° после каждого цикла прессования) на установке с углом пересечения каналов 120° , температура прессования 450°C , число циклов прессования – 4. Для снятия избыточных внутренних напряжений после мегапластической деформации провели отпуск при температуре

350°C в течение одного часа с последующим охлаждением в печи. Для дальнейшего формоизменения заготовки была проведена ВК, которую выполнили с помощью пневматического молота МА4128 до степеней обжатия 60 % при температуре началаковки 1000°C и концаковки 800°C с последующим охлаждением на воздухе.

Химический состав стали определен на спектрометре «FOUNDRY MASTER UVR WAS AG». Микроструктуру исследовали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) «JEOL-7800F» с ускоряющим напряжением 5,0 кВ. Количественный металлографический анализ выполнен на оптическом микроскопе «Neophot-32» методом секущих.

Для определения механических свойств материала в различных состояниях изготовлены образцы для испытаний на растяжение типа I по ГОСТ 1497–84. Испытания на растяжение проводились на универсальной электромеханической испытательной машине «ZWICK/ROELL Z600» при скорости деформирования 1 мм/мин и величине предельной нагрузки 1 т.

Результаты и обсуждение

Структура стали 09Г2С после комбинированной мегапластической деформации

Структура стали 09Г2С в исходном состоянии ферритно-перлитная (рис. 1, а), средний размер зерен феррита составляет 12,8 мкм, зерен перлита 10,5 мкм. Фазовый анализ показал $\approx 75,0\%$ содержание зерен феррита и $\approx 25,0\%$ перлитных областей. Перлитные колонии имеют пластинчатую структуру с толщиной пластинок цементита менее 1 мкм (рис. 1, б).

РКУП с четырьмя циклами прессования обуславливает измельчение зерен феррита до 6,1 мкм, зерен перлита до 6,5 мкм (рис. 1, в). При мегапластической деформации ферритно-перлитной стали формирование субструктуры, фрагментирование и разрушение цементита обладают сильным взаимным влиянием [11, 20]. Дислокации проникают в цементит и разрезают его на части. Углерод из цементита выносится перерезающими его дислокациями и равномерно распределяется по всему объему ультрамелкозернистой ферритной матрицы. Морфология перлитных колоний претерпевает существен-

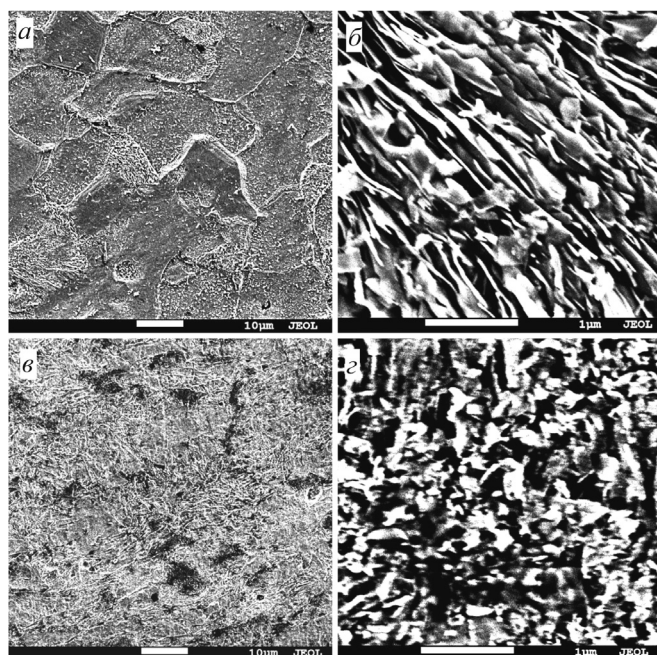


Рис. 1. Микроструктура и морфология перлита стали 09Г2С:

а, б – в исходном крупнозернистом состоянии;
в, з – после РКУП

ные изменения, заключающиеся в утонении и дроблении цементитных пластинок, их сфероидизации и рассредоточении, т. е. происходит переход от пластинчатого перлита к зернистому. Толщина пластинок на участках с частично сохранившимся пластинчатым перлитом – первые сотни нанометров. Размерность других карбидных образований (в том числе сфероидизированного карбида) – также первые сотни нанометров и менее 100 нм (рис. 1, *з*).

После ВК стали с исходной крупнозернистой структурой происходит измельчение структурных элементов: средний размер зерен феррита составляет 6,7 мкм, перлита 5,5 мкм; объемная доля перлитных колоний снизилась до 18 % (рис. 2, *а*). Перлит крупнозернистой стали послековки сохраняет пластинчатость, но заметны дробление и переориентация цементитных пластинок (рис. 2, *б*). Пластины цементита имеют различную толщину по длине пластины и заостренные рваные концы, что является свидетельством высокой дефектности колоний перлита, морфология перлита преимущественно пластинчатая.

После РКУП и ВК получена УМЗ-структура со средним размером зерен феррита 3,8 мкм, перлита 2,8 мкм (рис. 2, *в*); перлитные колонии

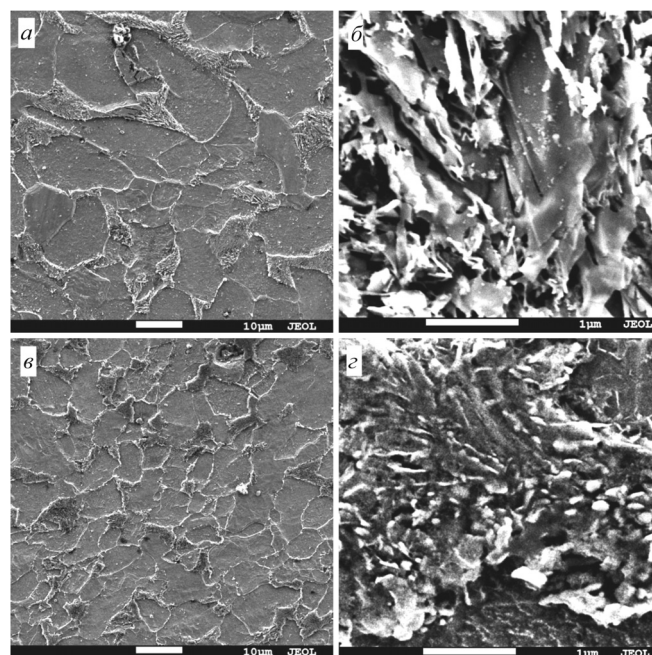


Рис. 2. Микроструктура и морфология перлита стали 09Г2С, подвергнутой ВК в исходном крупнозернистом состоянии (*а, б*) и после предварительного РКУП (*в, з*), СЭМ

растворились до объемной доли 15 %. Образовавшийся при воздействии деформационных нагрузок и высоких температур цементит внутри зерна перлита фрагментирован, имеет разнонаправленную ориентацию и более выраженную пластинчато-зернистую структуру, средняя толщина пластинок цементита и свободных карбидов менее первых десятков нанометров (рис. 2, *з*). Таким образом, в результате комбинированной обработки РКУП+ВК получена ультрамелкозернистая структура с наноразмерными частицами карбида.

Механические свойства стали 09Г2С после комбинированной мегапластической деформации

В таблице представлены результаты механических испытаний образцов исследуемой стали в различных структурных состояниях, а также приведены усредненные параметры ферритных и перлитных зерен, причем в составе перлита содержатся пластинчатые частицы карбида наноразмерной толщины и сфероидные нанокарбида. Пределы текучести и прочности стали 09Г2С после РКУП увеличились более чем в два раза, т. е. сталь по этим характеристикам

**Параметры микроструктуры и механические характеристики стали 09Г2С
в различных состояниях**

Образцы	$d_{\text{ср.феррита}}, \text{ мкм}$	$d_{\text{ср.перлита}}, \text{ мкм}$	Морфология перлита	$\sigma_{\text{т}}, \text{ МПа}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{ МПа}$	$\delta, \%$
Исходное	12,8	10,5	Пластинчатая	350	480	32
РКУП	6,1	6,5	Зернистая	1005	1010	4,9
ВК	6,7	5,5	Пластинчатая	460	565	17
РКУП и ВК	3,8	2,8	Пластинчато-зернистая	503	633	17

приближается к высокопрочным, но увеличение прочности сопровождается многократным снижением относительного удлинения – более чем в шесть раз. Ковка УМЗ стали, полученной после РКУП, обусловила снижение значений пределов текучести и прочности стали на 50 и 47 % соответственно и повышение пластичности более чем в три раза. Тем не менее полученная прочность остается выше значений, чем в исходном крупнозернистом состоянии и после ВК.

Сопоставляя результаты исследования структуры и механических свойств, можно сделать заключение, что наибольшей прочностью и минимальной пластичностью обладает сталь после РКУП. Сталь после ковки также показала повышение пределов текучести и прочности до 460 и 565 МПа и снижение пластичности до 17 %. Наиболее мелкозернистая структура с пластинчато-зернистой морфологией перлита, содержащего наноразмерные карбиды, полученная после комбинированной мегапластической деформации, обусловила достижение пределов текучести и прочности 503 и 633 МПа соответственно, а пластичности 17 %, что является наилучшим сочетанием прочностных и пластичных свойств стали 09Г2С, полученных после примененных видов обработки.

Выводы

1. Применение обработки всесторонней ковкой со степенью обжатия 60 % при температуре начала ковки 1000 °С позволило сохранить наноразмерные элементы структуры, полученные в стали 09Г2С после наноструктурирования методом РКУП. В результате комбинированной мегапластической деформации методами РКУП и ВК образовалась ультрамелкозернистая струк-

тура с пластинчато-зернистой морфологией перлитных колоний, в составе которых содержатся пластинки цементита с толщиной менее 100 нм и наноразмерные частицы сфероидизированного цементита.

2. Обработка ВК позволила провести формоизменение заготовки низколегированной стали с цилиндрической на брусок после упрочнения методом РКУП при существенном повышении прочностных свойств по сравнению с исходным крупнозернистым состоянием (предел текучести повысился на 44 %, предел прочности – на 32 %) и при многократном улучшении пластичности по сравнению с состоянием после РКУП (относительное удлинение увеличилось в 3,5 раза).

Таким образом, результаты исследований показывают возможность использования всесторонней ковки в качестве технологии формоизменения заготовок, обеспечивающей определенный уровень сохранения структуры и свойств низколегированных сталей, полученных ими при объемном наноструктурировании методом РКУП.

Список литературы

1. Isothermal upset forging of AA5083 after severe plastic deformation by ECAE / I. Puertas, C.J. Luis-Pérez, D. Salcedo, J. León, R. Luri, J.P. Fuertes // *Procedia CIRP*. – 2013. – Vol. 12. – P. 288–293. – doi: 10.1016/j.procir.2013.09.050.
2. Luis Pérez C.J., Salcedo Pérez D., Puertas Arbizu I. Design and mechanical property analysis of ultrafine grained gears from AA5083 previously processed by equal channel angular pressing and isothermal forging // *Materials & Design*. – 2014. – Vol. 63. – P. 126–135. – doi: 10.1016/j.matdes.2014.05.048.
3. Plastic forming of the equal-channel angular pressing processed 6061 aluminum alloy / W.J. Kim,

Y.K. Sa, H.K. Kim, U.S. Yoon // *Materials Science and Engineering: A*. – 2008. – Vol. 487, iss. 1/2. – P. 360–368. – doi: 10.1016/j.msea.2007.10.069.

4. Shi B.Q., Chen R.S., Ke W. Effects of forging processing on the texture and tensile properties of ECAEed AZ80 magnesium alloy // *Materials Science and Engineering: A*. – 2012. – Vol. 546. – P. 323–327. – doi: 10.1016/j.msea.2012.03.036.

5. Структура и свойства магниевового сплава Mg-0,3%Ca после мультисековой деформации и равноканального углового прессования / С.В. Добаткин, Л.Л. Рохлин, Г.А. Салищев, В.И. Копылов, В.Н. Серебряный, Н.Д. Степанов, И.Е. Тарытина, И.С. Курошев, Н.С. Мартыненко // *Металлы*. – 2014. – № 6. – С. 70–79.

6. Ефимова Ю.Ю., Концева Н.В., Никитенко О.А. Исследование состояния карбидной фазы после наноструктурирования и последующего волочения низкоуглеродистой стали // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. – 2009. – № 3. – С. 45–48.

7. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: Академкнига, 2007. – 398 с. – ISBN 978-5-946282-17-8.

8. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // *Acta Materialia*. – 2000. – Vol. 48, iss. 1. – P. 1–29. – doi: 10.1016/S1359-6454(99)00285-2.

9. Пластическая обработка металлов простым сдвигом / В.М. Сегал, В.И. Резников, А.С. Дробышевский, В.И. Копылов // *Известия АН СССР. Металлы*. – 1981. – № 1. – С. 115–123.

10. Valiev R.Z., Korznikov A.V., Mulyukov R.R. Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation // *Materials Science and Engineering: A*. – 1993. – Vol. 168, iss. 2. – P. 141–148. – doi: 10.1016/0921-5093(93)90717-S.

11. Структура и свойства стали Ст3 после тепло-го равноканального углового прессования / С.В. Добаткин, Р.З. Валиев, Н.А. Красильников, Г.И. Рааб, В.Н. Коненкова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2000. – № 9. – С. 31–35.

12. Влияние режимов равноканального углового прессования на механические и магнитные свойства стали 09Г2С / Э.С. Горкунов, С.М. Задворкин, Л.С. Горулева, Е.А. Туева, И.Н. Веселов, С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, П.Г. Мордовской // *Дефектоскопия*. – 2012. – № 10. – С. 18–27.

13. Влияние режимов объемного наноструктурирования мегапластической деформацией на свойства конструкционной стали / С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, П.Г. Мордовской, М.З. Борисова // *Перспективные материалы*. – 2011. – № 13. – С. 961–967.

14. Microstructural evolution in a commercial low carbon steel by equal channel angular pressing / D.H. Shin, B.C. Kim, Y.-S. Kim, K.-T. Park // *Acta Materialia*. – 2000. – Vol. 48, iss. 9. – P. 2247–2255. – doi: 10.1016/S1359-6454(00)00028-8.

15. Park K.-T., Shin D.H. Annealing behavior of sub-micrometer grained ferrite in a low carbon steel fabricated by severe plastic deformation // *Materials Science and Engineering: A*. – 2002. – Vol. 334, iss. 1/2. – P. 79–86. – doi: 10.1016/S0921-5093(01)01796-8.

16. Dynamic deformation behavior of ultrafine-grained low-carbon steels fabricated by equal-channel angular pressing / B.C. Hwang, H.S. Lee, Y.G. Kim, S. Lee, B.D. Ahn, D.H. Shin, C.G. Lee // *Metallurgical and materials transaction: A*. – 2005. – Vol. 36, iss. 2. – P. 389–397. – doi: 10.1007/s11661-005-0310-1.

17. Ultrafine grained dual phase steel fabricated by equal channel angular pressing and subsequent intercritical annealing / K.-T. Park, S.Y. Han, B.D. Ahn, D.H. Shin, Y.K. Lee, K.K. Um // *Scripta Materialia*. – 2004. – Vol. 51, iss. 9. – P. 909–913. – doi: 10.1016/j.scriptamat.2004.06.017.

18. 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.

19. Structure, mechanical characteristics, and deformation and fractures of quenched structural steel under static and cyclic loading after combined strain-heat nanostructuring treatment / A.V. Makarov, R.A. Savrai, E.S. Gorkunov, A.S. Yurovskikh, I.Yu. Malygina, N.A. Davydova // *Physical Mesomechanics*. – 2015. – Vol. 18, iss. 1. – P. 43–57. – doi: 10.1134/S1029959915010063.

20. Целлермаер В.Я. Субструктурно-фазовые превращения при интенсивной пластической деформации металлов // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1999. – № 12. – С. 44–49.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (70), January – March 2016, Pages 52–59

Structure and mechanical properties of the low-carbon steel after severe plastic deformation and forging

Yakovleva S.P., D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Material Science Department, e-mail: spyakovleva@yandex.ru

Makharova S.N., Ph.D. (Engineering), Leading researcher, e-mail: snmachar@yandex.ru

Mordovskoi P.G., Ph.D. (Engineering), Junior researcher, e-mail: mordov@yandex.ru

Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS, 1 Oktyabrskaya str., Yakutsk, 677891, Russian Federation

Abstract

The effect of the hot forming obtained by multi-directional forging on the structure and mechanical properties of the ferrite-pearlite dual phase steel 09Mg2Si after equal channel angular pressing (ECAP) is studied. Four passes of ECAP were conducted using a route of “Bc” (90-deg rotation after each pass) adjusted to 120° internal angle of channels, 450 °C pressing temperature. Subsequent multi-directional forging (MDF) was performed with accumulated strain of deformation of 60 and 80%. To remove the excess of internal stress after severe plastic deformation (SPD) billets were annealed at 350 °C for 1 hour with following furnace cooling. Thermo mechanical processing by MDF affects not only the shape and structure, but, respectively, the mechanical properties of the billets too, due to the processes of deformation and recrystallization of metal. After ECAP and MDF more fine-grained structure was expected to ensure the best strength characteristics, but there was decrease in values compared to steel, which was processed only by ECAP. Nevertheless its yield point after combined processing by SPD and forging exceeds the initial values by 40-80%, the ultimate tensile strength - by 32-45%. Subsequent MDF also resulted in increase of ductility of the ultrafine grained (UFG) steel 2–3 times in comparison with steel after ECAP. After ECAP and MDF with accumulated strain of deformation 80% ferrite and pearlite grains of the steel were significantly refined to 3.8 and 2.5 μm respectively, that is 2 times less than after ECAP. Research results show the applicability of combined treatment which consists of the ECAP and MDF as manufacturing technology of work pieces with shaped form with sufficient preservation of structural and mechanical conditions obtained after ECAP.

Keywords:

steel, equal-channel angular pressing, multi-directional forging, nanostructuring, structure, mechanical properties.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-52-59

References

1. Puertas I., Luis-Pérez C.J., Salcedo D., León J., Luri R., Fuertes J.P. Isothermal upset forging of AA5083 after severe plastic deformation by ECAE. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 12, pp. 288–293. doi: 10.1016/j.procir.2013.09.050
2. Luis Pérez C.J., Salcedo Pérez D., Puertas Arbizu I. Design and mechanical property analysis of ultrafine grained gears from AA5083 previously processed by equal channel angular pressing and isothermal forging. *Materials & Design*, 2014, vol. 63, pp. 126–135. doi: 10.1016/j.matdes.2014.05.048
3. Kim W.J., Sa Y.K., Kim H.K., Yoon U.S. Plastic forming of the equal-channel angular pressing processed 6061 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 487, iss. 1–2, pp. 360–368. doi: 10.1016/j.msea.2007.10.069
4. Shi B.Q., Chen R.S., Ke W. Effects of forging processing on the texture and tensile properties of ECAEed AZ80 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, vol. 546, pp. 323–327. doi: 10.1016/j.msea.2012.03.036
5. Dobatkin S.V., Rokhlin L.L., Salishchev G.A., Kopylov V.I., Serebryanyi V.N., Stepanov N.D., Tarytina I.E., Kuroshv I.S., Martynenko N.S. Struktura i svoistva magnievogo splava Mg-0,3%Ca posle mul'tiosevoi deformat-

sii i ravnokanal'nogo uglovogo pressovaniya [Structure and properties of an Mg-0.3% Ca magnesium alloy after multiaxial deformation and equal-channel angular pressing]. *Metally – Russian metallurgy (Metally)*, 2014, no. 6, pp. 70–79. (In Russian)

6. Efimova Yu.Yu., Koptseva N.V., Nikitenko O.A. Issledovanie sostoyaniya karbidnoi fazy posle nanostrukturirovaniya i posleduyushchego volocheniya nizkouglerodistoi stali [Research of a condition of the carbide phase after the nanostructuring and the subsequent drawing of low carbon steel]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova – Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2009, no. 3, pp. 45–48. (In Russian)

7. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Ob"emnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svoystva* [Bulk nanostructured metal materials: development, structure and properties]. Moscow, Akademkniga Publ., 2007. 398 p. ISBN 978-5-946282-17-8

8. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, iss. 1, pp. 1–29. doi: 10.1016/S1359-6454(99)00285-2

9. Segal V.M., Reznikov V.I., Drobyshevskii A.I., Kopylov V.I. Plasticheskaya obrabotka metallov prostym sdvigom [Plastic metal processing by simple shear]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Metally – Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Metals*, 1981, no. 1, pp. 115–123.

10. Valiev R.Z., Korznikov A.V., Mulyukov R.R. Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: A*, 1993, vol. 168, iss. 2, pp. 141–148. doi: 10.1016/0921-5093(93)90717-S

11. Dobatkin S.V., Valiev R.Z., Krasil'nikov N.A., Raab G.I., Konenkova V.N. Struktura i svoystva stali St3 posle teplogo ravnokanal'nogo uglovogo pressovaniya [Structure and properties of steel St3 after hot equal-channel angular pressing]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 2000, no. 9, pp. 31–35. (In Russian)

12. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Goruleva L.S., Tueva E.A., Veselov I.N., Yakovleva S.P., Makharova S.N., Mordovskoi P.G. The effect of equal channel angular pressing on the mechanical and magnetic properties of 09Г2С steel. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2012, vol. 48, iss. 10, pp. 568–575. doi: 10.1134/S1061830912100051. Translated from *Defektoskopiya*, 2012, no. 10, pp. 18–27.

13. Yakovleva S.P., Makharova S.N., Mordovskoi P.G., Borisova M.Z. Vliyanie rezhimov ob"emnogo nanostrukturirovaniya megaplasticheskoi deformatsiei na svoystva konstruksionnoi stali [Influence of modes of bulk nanostructuring by megaplastic deformation on the properties of constructional steel]. *Perspektivnye materialy – Journal of Advanced Materials*, 2011, no. 13, pp. 961–967. (In Russian)

14. Shin D.H., Kim B.C., Kim Y.-S., Park K.-T. Microstructural evolution in a commercial low carbon steel by equal channel angular pressing. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, iss. 9, pp. 2247–2255. doi: 10.1016/S1359-6454(00)00028-8

15. Park K.-T., Shin D.H. Annealing behavior of submicrometer grained ferrite in a low carbon steel fabricated by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, vol. 334, iss. 1–2, pp. 79–86. doi: 10.1016/S0921-5093(01)01796-8

16. Hwang B.C., Lee H.S., Kim Y.G., Lee S., Ahn B.D., Shin D.H., Lee C.G. Dynamic deformation behavior of ultrafine-grained low-carbon steels fabricated by equal-channel angular pressing. *Metallurgical and Materials Transaction: A*, 2005, vol. 36, iss. 2, pp. 389–397. doi: 10.1007/s11661-005-0310-1

17. Park K.-T., Han S.Y., Ahn B.D., Shin D.H., Lee Y.K., Um K.K. Ultrafine grained dual phase steel fabricated by equal channel angular pressing and subsequent intercritical annealing. *Scripta Materialia*, 2004, vol. 51, iss. 9, pp. 909–913. doi: 10.1016/j.scriptamat.2004.06.017

18. 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

19. Makarov A.V., Savrai R.A., Gorkunov E.S., Yurovskikh A.S., Malygina I.Yu., Davydova N.A. Structure, mechanical characteristics, and deformation and fractures of quenched structural steel under static and cyclic loading after combined strain-heat nanostructuring treatment. *Physical Mesomechanics*, 2015, vol. 18, iss. 1, pp. 43–57. doi: 10.1134/S1029959915010063

20. Tsellermaer V.Ya. Substructural and phase transformations during intense plastic deformation of metals. *Steel in Translation*, 1999, vol. 29, no. 12, pp. 75–81. Translated from *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya*, 1999, no. 12, pp. 44–49.

Funding

Program of the fundamental research of the Presidium of RAS N8, the project 8.22. "The formation of nano-, submicron structures under the volume and surface thermal-effects influence after megaplastic deformation as the basis for the development of structural steels with a high level of properties and adaptive behavior during operation» (state registration number 01201257844).

Article history:

Received 1 November 2015

Revised 11 January 2016

Accepted 11 February 2016

ВЛИЯНИЕ НОРМАЛИЗАЦИИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНОТЕРМИТНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕЛЬСОВ

Л.Б. ТИХОМИРОВА, канд. техн. наук, профессор
А.С. ИЛЬИНЫХ, доктор техн. наук, доцент
М.С. ГАЛАЙ, канд. техн. наук
Э.С. СИДОРОВ, аспирант
(СГУПС, Новосибирск)

Поступила 25 декабря 2015
Рецензирование 15 января 2016
Принята к печати 15 февраля 2016

Галай М.С. – 630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191,
Сибирский государственный университет путей сообщения,
e-mail: galayms@mail.ru, sesnsk@mail.ru

Рассматриваются вопросы повышения качества сварных соединений рельсов, полученных алюминотермитной сваркой. Приведен анализ причин выхода из строя алюминотермитных сварных соединений рельсов. Изложены результаты экспериментального исследования влияния нормализации на твердость и структуру металла головки сварных соединений рельсов. Установлено, что без термической обработки сварных швов рельсов в зоне сплавления сварного шва и металла рельса наблюдается резкое увеличение твердости с 24 до 38 HRC, что подтверждается микроструктурным анализом разницы в зернистости металла в зонах сварного шва и термического влияния. В зоне сварного шва металл имеет игольчатую дендритную структуру, в зоне термического влияния – крупнозернистую структуру. Вследствие неоднородности структуры сварного соединения вероятность возникновения трещин на границе сплавления сварного шва и металла очень высока.

Установлено, что нормализация алюминотермитных сварных соединений головки рельсов при температурах 850...900 °С обеспечивает формирование ферритно-перлитной структуры в зоне сварного шва. В зоне термического влияния (за границей сплавления) образуется мелкозернистая структура металла с твердостью, близкой к твердости основного рельса, что является следствием устранения вредного влияния перегрева металла при сварке. Отмечено, что термообработка сварных соединений головки рельсов мало изменяет механические свойства, в частности твердость, в зоне сварного шва. Но при этом в зоне термического влияния наблюдается значительное уменьшение твердости на 8...10 HRC после проведения нормализации. Обосновано применение нормализации алюминотермитных сварных соединений рельсов для уменьшения вероятности появления хрупкого разрушения в зоне термического влияния при эксплуатации бесстыкового пути.

Ключевые слова: рельсы, алюминотермитная сварка, термическая обработка, микроструктура, твердость, сварной шов.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-60-66

Введение

Постоянное повышение грузонапряженности железнодорожных линий и скоростей движения поездов приводит к увеличению нагрузок на сварные рельсовые соединения. Поэтому в настоящее время повышение надежности свар-

ных рельсовых соединений является актуальной задачей.

При соединении рельсов применяются разные способы сварки рельсовых стыков, в основном используются контактный и алюминотермитный способы сварки. Одним из достоинств соединения рельсов с помощью сварки является

отсутствие зазора между соединяемыми рельсами. В результате при перекачивании колеса с отдающего конца рельса на принимающий отсутствует удар колеса о край головки принимающего рельса. При этом снижается уровень динамических нагрузок не только на рельсы в местах их соединения, но и на ходовую часть подвижного состава. Отсутствие удара в сварном соединении рельсов существенно снижает вероятность возникновения таких дефектов, как смятие, расслаивание и выкрашивание металла рельса, а также снижается вероятность образования усталостных трещин [1–4]. В отличие от контактного способа сварки алюминотермитная сварка позволяет сваривать рельсы в зоне стрелочных переводов, на мостах, в тоннелях и кривых малого радиуса. Следует отметить, что наряду со сварными соединениями, полученными контактной сваркой, алюминотермитные сварные соединения являются недостаточно изученными.

В процессе эксплуатации рельсов, сваренных алюминотермитной сваркой, было обнаружено, что в зоне сварных швов образуются седловины. В работах [5, 6] было установлено, что причина возникновения данного дефекта в понижении твердости металла сварного шва. Вторым наблюдаемым дефектом выхода из строя алюминотермитных сварных швов является появление трещин на границе сплавления сварного шва и основного металла рельса.

Известно, что сварка создает разнородную структуру в зонах сварного шва и термического влияния. Сварные соединения без термической обработки имеют крупнозернистое строение. В зоне термического влияния присутствует перегрев металла, что значительно понижает пластичность и ударную вязкость, а также может приводить к образованию хрупкого разрушения сварных швов [7]. Измельчение структуры металла сварного соединения может быть достигнуто несколькими способами: за счет модифицирования литейного компонента [8], за счет поверхностного пластического деформирования [9, 10], за счет проведения термической обработки (нормализации) [11, 12]. В настоящее время для улучшения эксплуатационных свойств алюминотермитных сварных соединений рельсов после проведения алюминотермитной сварки допускается проведение нормализации металла

в подошве рельса в зоне стыка, при этом головка и шейка рельса не подвергаются термической обработке [13].

Цель исследований, описываемых в данной статье, – анализ механических свойств и структуры металла сварного шва и зоны термического влияния алюминотермитного сварного соединения головки рельса после проведения нормализации.

Материал и методы исследований

Материалами исследования служили темплеты, вырезанные из головки алюминотермитного сварного соединения рельса с помощью горизонтального полуавтоматического ленточного станка UE – 350 SA. Поверхность катания головки рельса была сформирована с помощью гратоснимателя после сварки, и последующее шлифование не проводилось. Нормализацию образцов проводили по следующим режимам: 1) выдержка образцов в печи при температуре 850...900 °С, время выдержки – 25...30 мин; 2) охлаждение образцов на воздухе [14]. После удаления обезуглероженного слоя металла и проведения соответствующей подготовки поверхностей была измерена твердость в зоне сварного шва и зоне термического влияния. Измерение твердости металла осуществляли по методу Роквелла с помощью универсального твердомера HBRV-187.5 в соответствии с ГОСТ 9013–59. На рис. 1 показано расположение поверхностей и места нанесения отпечатков при измерении твердости:

- поверхность А, расположенная перпендикулярно оси симметрии профиля рельса на глубине 20 мм от поверхности катания рельса;
- поверхности Б, расположенная в поперечном профиле головки рельса на расстоянии 40 мм от центра сварного шва;
- поверхность В, расположенная в поперечном профиле головки рельса в середине сварного шва.

Расстояния между полученными после измерения твердости отпечатками были определены с помощью цифрового микроскопа Levenhuk DTX 90. Среднее расстояние между отпечатками составило 2 мм, а расстояния между полученными дорожками отпечатков 5 мм. Обработка данных, полученных в результате измерения твердости,

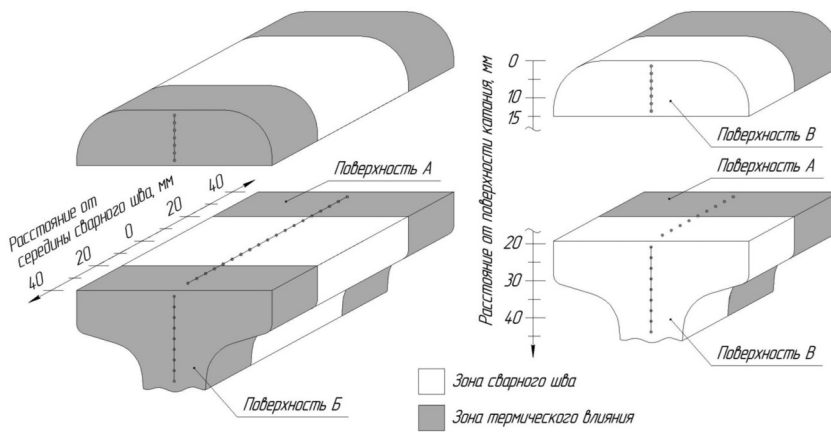


Рис. 1. Схема расположения поверхностей и мест нанесения отпечатков при измерении твердости головки рельса алюминотермитного сварного соединения

осуществлялась с использованием программы STATISTICA [15]. Микроструктурный анализ проводился на шлифах с применением оптического микроскопа МИМ – 8М при увеличениях 100... 400 крат. Для выявления микроструктуры поверхность шлифов подвергали травлению в 5 %-м спиртовом растворе азотной кислоты.

Результаты и обсуждение

Результаты измерения твердости поверхностей А и В до и после проведения нормализации представлены на рис. 2 и 3. На первом этапе проведена оценка твердости образцов сварных соединений рельсов в исходном состоянии (без

термической обработки). Ширина сварного шва составляет порядка 40 мм. В качестве точки отсчета выбрана середина сварного шва. Твердость металла в зоне сварного шва находится в диапазоне 24...26 HRC. Вблизи границы сплавления металла сварного шва с металлом рельса твердость возрастает до 32 HRC. На расстоянии 26...28 мм от середины сварного шва наблюдается увеличение твердости металла до 37...38 HRC. При дальнейшем удалении от середины сварного шва твердость снижается, и на расстоянии 32...38 мм составляет в среднем 32 HRC. Твердость металла рельса по мере удаления от поверхности катания головки рельса (поверхность В, зона термического влияния) изменяется в небольших пределах и составляет порядка 32...33 HRC.

До проведения нормализации твердость металла сварного шва от поверхности катания до 38 мм по глубине (поверхность В) изменяется незначительно и составляет порядка 25...26 HRC. На глубине 38...44 мм от поверхности катания головки рельса наблюдается постепенное повышение твердости металла сварного шва до 30 HRC, что связано с увеличением скорости охлаждения в области шейки рельса.

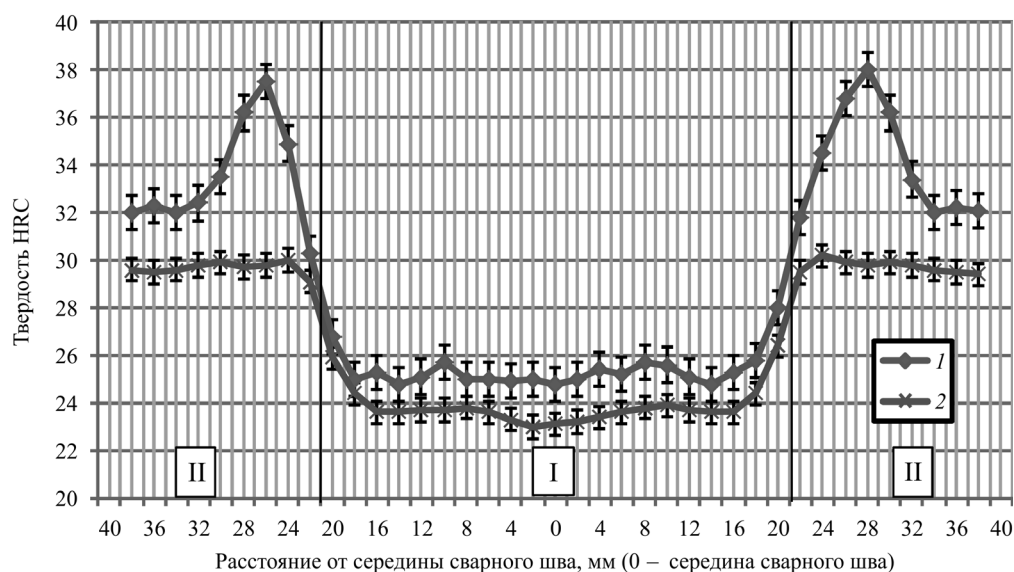


Рис. 2. Твердость металла поверхности А до и после нормализации:

I – зона сварного шва; II – зона термического влияния; 1 – до нормализации; 2 – после нормализации

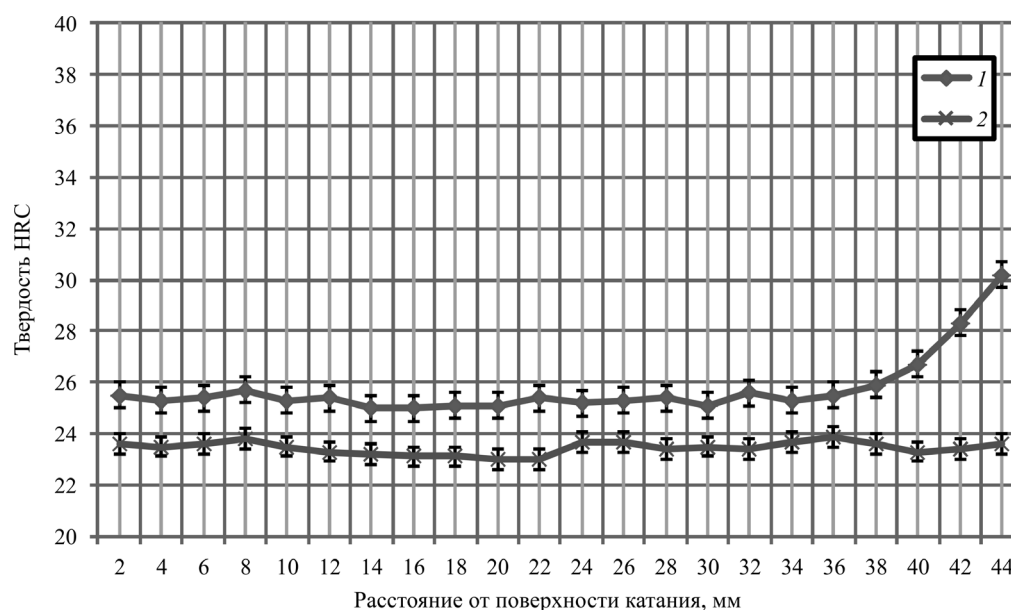


Рис. 3. Твердость металла поверхности В до и после нормализации:

1 – до нормализации; 2 – после нормализации

Анализ результатов измерения твердости сварных соединений после нормализации показал, что твердость металла в зоне сварного шва (поверхность А) составляет 23...24 HRC. Вблизи границы сплавления металла сварного шва с металлом рельса твердость возрастает до 26...30 HRC. На расстоянии 22...38 мм от середины сварного шва твердость металла рельса изменяется незначительно и составляет 29...30 HRC. Твердость металла рельса в зоне термического влияния по глубине изменяется в небольших пределах и составляет порядка 29...30 HRC (поверхность Б). Твердость металла сварного шва по глубине (поверхность В) составляет порядка 23...24 HRC.

Металлографический анализ структуры металла сварного шва и зоны термического влияния до проведения нормализации показал, что металл в зоне сварного шва имеет литую структуру (рис. 4, а), представляющую собой игольчатую α -фазу с выраженным строением в виде дендритов. В зоне сплавления металла сварного шва и металла рельса (рис. 4, б) видна ярко выраженная неровная граница перехода от литой структуры металла сварного шва к крупнозернистой структуре перлита с ферритными прослойками. На расстоянии 36...38 мм структура металла представляет собой смесь феррита и цементита (рис. 4, в).

Микроструктура зоны сварного шва после проведения нормализации представлена на рис. 4, г. Металл имеет мелкозернистую ферритно-перлитную структуру, размеры дендритов уменьшены. В зоне сплавления металла сварного шва и металла рельса (рис. 4, д) отсутствует четкая граница перехода от одной структуры к другой. Кроме того, отчетливо видно отсутствие крупных зерен со стороны основного металла, что свидетельствует об устранении последствий перегрева. Структура металла рельса в зоне термического влияния (рис. 4, е) представляет собой перлит с небольшими участками феррита.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что металл сварного шва и металл рельса имеют неоднородную структуру и, как следствие, обладают различными механическими свойствами. Повышение твердости металла в зоне термического влияния до 38 HRC связано с перегревом металла этого участка рельса, в результате которого образовалась крупнозернистая структура. Это, в свою очередь, приводит к снижению пластичности и увеличению склонности к хрупким разрушениям.

Выводы

1. Проведенные исследования показали, что причиной образования седловин в зоне головки

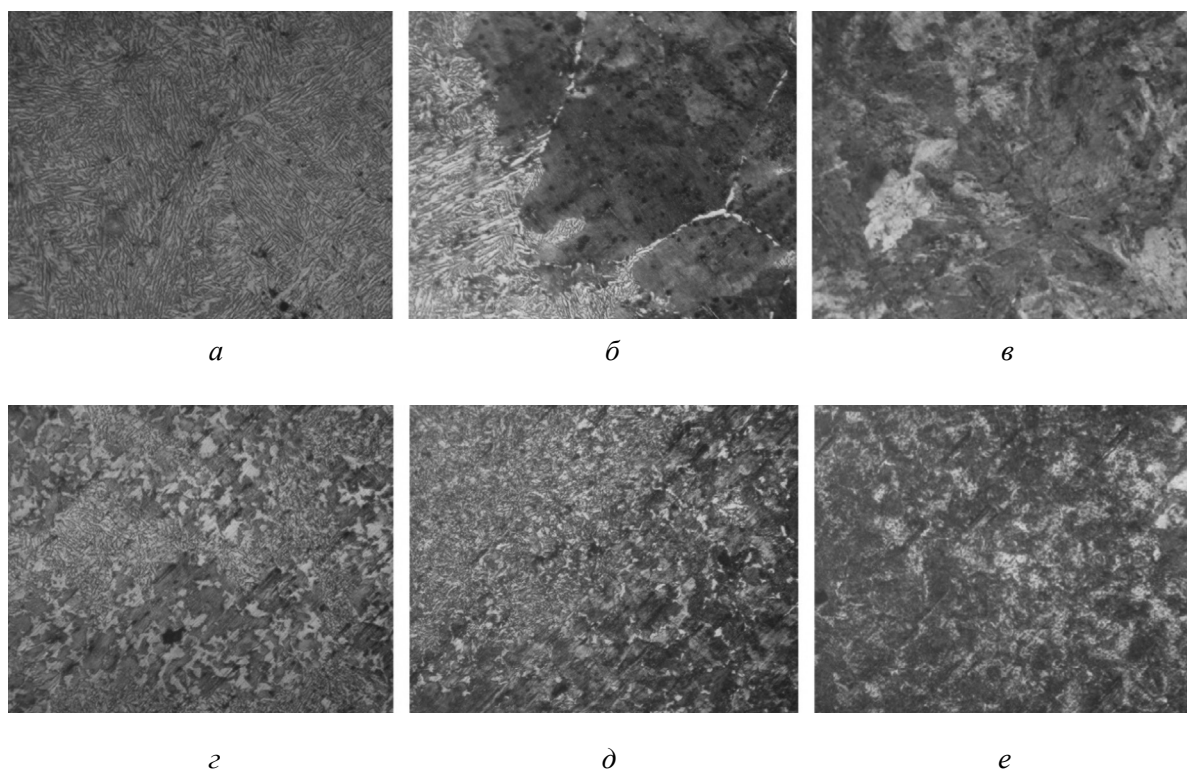


Рис. 4. Микроструктура металла рельса, сваренного алюминотермитным способом сварки до и после проведения нормализации, $\times 300$:

а – зона сварного шва до нормализации; *б* – зона сплавления до нормализации; *в* – зона термического влияния (за зоной сплавления) до нормализации; *г* – зона сварного шва после нормализации; *д* – зона сплавления после нормализации; *е* – зона термического влияния (за зоной сплавления) после нормализации

алюминотермитных сварных соединений рельсов в процессе эксплуатации является пониженное значение твердости в зоне сварного шва. Причина возникновения данного дефекта не может быть устранена нормализацией, так как после ее проведения твердость сварного шва и рельса снижается на 1...2 HRC.

2. Склонность к хрупкому разрушению в зоне термического влияния сразу за зоной сплавления объясняется наличием крупнозернистости.

За счет проведения нормализации головки алюминотермитных сварных соединений устранено вредное влияние перегрева металла в зоне термического влияния. После нормализации в зоне термического влияния сварных швов наблюдается мелкозернистая структура и снижение твердости с 38 до 30 HRC, в результате чего устраняется опасность хрупкости.

3. Необходимость введения операции нормализации алюминотермитных сварных соединений рельсов в технологический процесс послесварочной обработки подтверждается результатами измерений твердости и металлографическими исследованиями.

Список литературы

1. Пасько С.В., Тихомирова Л.Б., Болотова О.В. Алюминотермитная сварка рельсов методом промежуточного литья по технологии фирмы «СНАГА»: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2010. – 99 с. – ISBN 5-93461-418-5.
2. Виногоров Н.П. Бесстыковой путь на дорогах Сибири и Дальнего Востока // Путь и путевое хозяйство. – 2004. – № 7. – С. 23–27.
3. Технология алюминотермитной сварки рельсов: учебное пособие / Н.Н. Воронин, В.В. Засыпкин, В.И. Коненков, Э.В. Воробьев, О.Н. Трынкова; под ред. Н.Н. Воронина. – М.: МИИТ, 2008. – 117 с.
4. Гудков А.В., Лыков А.М., Кярамян К.А. Расчет процесса алюминотермитной сварки рельсов // Вестник ВНИИЖТ. – 2013. – № 2. – С. 50–54.
5. Алехин А.Л. Параметры твердости стыков, сваренных алюминотермитной сваркой // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 2. – С. 51–56.
6. Каргин В.А., Тихомирова Л.Б., Галай М.С. Упрочнение сварных соединений рельсов методом поверхностного пластического деформирования // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 3 (48). – С. 17–18.

7. Берлин В.И., Захаров Б.В., Мельниченко П.А. Транспортное материаловедение: учебник для вузов железнодорожного транспорта. – М.: Транспорт, 1982. – 287 с.

8. Способы повышения качества алюминотермитных сварных соединений рельсов / Д.С. Насонов, А.В. Гудков, А.И. Борц, А.И. Николин // Развитие железнодорожного транспорта в условиях реформирования: сборник статей ученых и аспирантов. – М., 2006. – С. 189–194.

9. Improving service properties of welded joints produced by aluminothermic welding / V.A. Kargin, L.B. Tikhomirova, M.S. Galay, Y.S. Kuznetsova // Welding International. – 2015. – Vol. 29, iss. 2. – P. 155–157. – doi: 10.1080/09507116.2014.897809.

10. Тихомирова Л.Б., Галай М.С. Повышение твердости алюминотермитных сварных соединений рельсов поверхностным пластическим деформированием // Политранспортные системы: материалы VIII международной научно-технической конференции. – Новосибирск, 2015. – С. 564–567.

11. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. – М.: Альянс, 2009. – 527 с. – ISBN 978-5-903034-54-3.

12. Технология термической обработки стали / пер. с нем. В.В. Левина; под ред. М.Л. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1981. – 608 с.

13. ТУ 0921-127-01124323–2005. Сварка рельсов алюминотермитная методом промежуточного литья. Технические условия. – Введ. 01.04.2005. – М.: ФГУП ВНИИЖТ, 2005. – 27 с.

14. Журавлев В.Н., Николаева О.И. Машиностроительные стали: справочник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с. – ISBN 5-217-01306-0.

15. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: учебное пособие для металлургических специальностей вузов / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, А.Р. Бондин, В.В. Лобанов; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. – 260 с.

ОБРАБОТКА METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (70), January – March 2016, Pages 60–66

The effect of normalization on the structure and mechanical properties of rails aluminotermic welded joints

Tikhomirova L.B., Ph.D. (Engineering), Professor, e-mail: ter@stu.ru

Ilinykh A.S., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: asi@stu.ru

Galay M.S., Ph.D. (Engineering), e-mail: galayms@mail.ru,

Sidorov Je.S., Ph.D. student, e-mail: sesnsk@mail.ru

Siberian Transport University, 191 Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

Abstract

The article is devoted to improving the quality of rail aluminotermic welded joints. The analysis of the causes of rail aluminotermic welded joints failure is given. The results of an experimental research of the effect of normalization on the hardness and structure of metal rail welded joints are studied. It is shown that without heat treatment the hardness of rail welded joints increases from 24 HRC to 38 HRC in the fusion zone of the weld metal and rail metal. The hardness is confirmed by microstructural analysis. Microstructural analysis showed the differences in the grains sizes of metal welded zone and heat affected zone. The structure of welded metal is acicular dendritic. Owing to a difference between structures of the welded joint zones the probability of occurrence of cracks on the boundary of fusion weld and metal is increased.

It is found that the normalization of rail top aluminotermic welded joints at temperature 850...900 °C provides the formation of ferrite-pearlite structure in the welded zone. The normalization formed fine-grained metal structure with a hardness, which approximate to the hardness of rail in the heat affected zone (along the fusion line). The normalization eliminates the harmful effects of overheating of the metal during welding. It is noted that heat treatment of rail aluminotermic welded joints slightly changes mechanical properties, such as hardness, in the welded zone. But, hardness decreased by 8..10 HRC in the heat affected zone.

This investigation has shown that the normalization of rail aluminothermic welded joints reduces the probability of occurrence of brittle destruction in the heat affected zone during the operation of continuous welded rail.

Keywords:

rails, aluminothermic welding, heat treatment, microstructure, hardness, rails joints.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-60-66

References

1. Pas'ko S.V., Tikhomirova L.B., Bolotova O.V. *Alyuminotermittnaya svarka rel'sov metodom promezhutochnogo lit'ya po tekhnologii firmy "SNAGA"* [Aluminothermic Rail Welding by Intermediate Casting Method As Developed by the SNAGA Co.]. Novosibirsk, SGUPS Publ., 2010. 99 p. ISBN 5-93461-418-5
2. Vinogorov N.P. Besstykovoi put' na dorogakh Sibiri i Dal'nego Vostoka [Continuous track sections of Siberia and the Far East]. *Put' i putevoe khozyaistvo – Railway Track and Facilities*, 2004, no. 7, pp. 23–27. (In Russian)
3. Voronin N.N., Zasytkin V.V., Konenkov V.I., Vorob'ev E.V., Trynkova O.N. *Tekhnologiya alyuminotermittnoi svarki rel'sov* [The technology of aluminothermic rail welding]. Moscow, MIIT Publ., 2008. 117 p.
4. Gudkov A.V., Lykov A.M., Kyaramyan K.A. Raschet protsessa alyuminotermittnoi svarki rel'sov [Calculation of aluminothermic rail welding process]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Vestnik of the Railway Research Institute*, 2013, no. 2, pp. 50–54. (In Russian)
5. Alekhin A.L. Parametry tverdsti stykov, svarenykh alyuminotermittnoi svarkoi [Hardness parameters of rail joints welded by alumothermic welding]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya – Proceedings of Petersburg Transport University*, 2010, no. 2, pp. 51–56.
6. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Galai M.S. Uprochnenie svarnykh soedinenii rel'sov metodom poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya [Strengthening of butt rail neck by the surface plastic deformation]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2010, no. 3 (48), pp.17–18.
7. Berlin V.I., Zakharov B.V., Mel'nicenko P.A. *Transportnoe materialovedenie* [Transport materials science]. Moscow, Transport Publ., 1982. 287 p.
8. Nasonov D.S., Gudkov A.V., Borts A.I., Nikolin A.I. [Ways to improve the quality of aluminothermic welded joints of rails]. *Razvitie zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh reformirovaniya: sbornik statei uchenykh i aspirantov* [Proceedings of Scientists and Ph.D. students "The development of railway transport in the conditions of reforming"]. Moscow, 2006, pp. 189–194. (In Russian)
9. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Galay M.S., Kuznetsova Y.S. Improving service properties of welded joints produced by aluminothermic welding. *Welding International*, 2015, vol. 29, iss. 2, pp. 155–157. doi: 10.1080/09507116.2014.897809
10. Tikhomirova L.B., Galay M.S. [Increasing the hardness of aluminothermic welded joints of rail surface plastic deformation]. *Materialy VIII mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Politransportnye sistemy"* [Proceedings of the VIII International Scientific Conference "Polytransport systems"]. Novosibirsk, 2015, pp. 564–567.
11. Lakhtin Yu.M., Leont'eva V.P. *Materialovedenie* [Material science]. 4th ed. Moscow, Al'yans Publ., 2009. 527 p. ISBN 978-5-903034-54-3
12. Eckstein H.-J., hrsg. *Technologie der wärmebehandlung von stahl* [Heat treatment technology of steel]. Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1976. 577 p. (Russ. ed.: *Tekhnologiya termicheskoi obrabotki stali*. Translated from German by V.V. Levin, ed. by M.L. Bernshtein. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 608 p.).
13. TU 0921-127-01124323–2005. *Svarka rel'sov alyuminotermittnaya metodom promezhutochnogo lit'ya. Tekhnicheskie usloviya* [Specifications 0921-127-01124323–2005. The aluminothermic rail welding methods-house of the intermediate casting]. Moscow, VNIIZhT Publ., 2005. 27 p.
14. Zhuravlev V.N., Nikolaeva O.I. *Mashinostroitel'nye stali: spravochnik* [Constructional steel]. 4th ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 480 p. ISBN 5-217-01306-0
15. Spirin N.A., Lavrov V.V., Bondin A.R., Lobanov V.V. *Metody planirovaniya i obrabotki rezul'tatov inzhener-nogo eksperimenta* [Planning methods and processing results of the engineering experiment]. Ekaterinburg, UGTU-UI Publ., 2003. 260 p.

Article history:

Received 25 December 2015

Revised 15 January 2016

Accepted 15 February 2016

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

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

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

1. Общие комментарии

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

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

Избегайте:

- неряшливости, например, многочисленных опечаток, небрежного стиля, маленьких иллюстраций, уравнений с ошибками и др.;

- длинного текста (абзаца), содержащего избыточные высказывания.

Научная статья должна иметь определенную структуру, которая описана ниже.

2. Заглавие и сведения об авторах

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

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

3. Аннотация (реферат)

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

4. Ключевые слова

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

5. Введение

Раздел «Введение» должен быть использован для того, чтобы определить место вашей работы (подхода, данных или анализа). Подразумевается, что существует нерешенная или новая научная проблема, которая рассматривается в вашей работе. В связи с этим в данном разделе следует представить краткий, но достаточно информированный литературный обзор (до 2 стр.) по состоянию данной отрасли науки. Не следует пренебрегать книгами и статьями, которые были написаны, например, раньше, чем пять лет назад. В конце раздела «Введение» формулируются цели работы и описывается стратегия для их достижения.

6. Описание экспериментальной части и теоретической/вычислительной работы

6.1. Материал, испытываемые образцы и порядок проведения испытаний

Приводится обоснование выбора данного материала (или материалов) и методов описания материала (материалов) в данной работе.

При необходимости приводятся рисунки образцов с единицами измерения (единицы измерения только в системе СИ). При испытании стандартных образцов достаточно ссылки на стандарт. Для большой программы испытаний целесообразно использовать таблицу матричного типа. Если образцы взяты из слитков, заготовок или

компонентов, то описывается их ориентация и нахождение в исходном материале, используются стандартные обозначения по ГОСТу.

При проведении испытаний приводится следующая информация.

1. Тип и условия испытаний, например, температура испытаний, скорость нагружения, внешняя среда.
2. Описываются переменные параметры, измеряемые величины и методы их измерения с точностью, степенью погрешности, разрешением и т.д.; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

6.2. Результаты экспериментов

Результаты предпочтительно представлять в форме графиков и описывать их словесно. Не следует писать о том, что ясно видно по графику.

6.3. По теоретической/вычислительной работе

Вышеперечисленные рекомендации актуальны также и для теоретической, и вычислительной работы. В статьях, основанных на вычислительной работе, необходимо указать тип конечного элемента, граничные условия и входные параметры. Численный результат представляется с учетом ограничений (точности) в применяемых вычислительных методах.

В статьях, основанных на аналитической работе, при изложении длинного ряда формул необходимо давать поясняющий текст, чтобы была понятна суть содержания работы. Правильность вычислений необходимо подтверждать промежуточными вычислениями. Так же как и в случае с экспериментальной работой, простого описания числовых или аналитических преобразований без рассмотрения теоретической (физической) первопричины обычно недостаточно, для того чтобы сделать публикацию такой статьи оправданной. Простой отчет о числовых результатах в форме таблиц или в виде текста, как и бесконечные данные по экспериментальной работе, без попытки определить или выдвинуть гипотезу о том, почему были получены такие результаты, без попытки выявить причинно-следственные связи, не украшают работу.

Сравнение ваших числовых результатов с числовыми результатами, полученными кем-то другим, может быть информативным. Но оно ничего не ДОКАЗЫВАЕТ. Контроль при помощи сравнения с общеизвестными решениями и проверка при помощи сравнения с экспериментальными данными являются обязательными.

7. Обсуждение

Необходимо использовать этот раздел для того, чтобы в полном объеме объяснить значимость вашего подхода, данных или анализа и результатов. Настоящий раздел упорядочивает и интерпретирует результаты. Цель раздела – показать, какие знания были получены в результате вашей работы, а также перспективу полученных результатов, сравнив их с существующим положением в данной области, описанным в разделе «Введение». Большое количество графиков и цветных иллюстраций не дает научного результата, это не презентация в PowerPoint. Обязанностью автора является 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», «например», «в результате» и т. д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.), либо разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать один из другого;
- необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т. е. “The study tested”, но не “It was tested in this study” (частая ошибка российских аннотаций);
- стиль письма должен быть компактным (плотным), поэтому предложения, вероятнее всего, будут длиннее, чем обычно.

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

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

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

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

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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

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

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

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

При принятии рукописи к печати дополнительно на почтовый адрес редакции (630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 274, зам. гл. редактора Атапин В.Г., Скиба В.Ю.) высылаются оригиналы авторского лицензионного договора и экспертного заключения о возможности открытого опубликования статьи.

Все рукописи рецензируются.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РУКОПИСЕЙ

Текст набирается в русифицированном редакторе *Microsoft Word*. Формат оригиналов – **A4**. Шрифт – *Times New Roman*, размер шрифта основного текста – **14 пт**, параметры страницы – все поля **2 см**. Выравнивание по ширине. Межстрочный интервал **полуторный**. Абзацный отступ – **1,25 см**. Переносы включены. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть четкими и понятными, могут быть включены в текст статьи.

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

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

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

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

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

Научная публикация должна иметь следующую структуру

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

2. Аннотация:

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

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

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

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

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

6. Результаты и обсуждение.

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

8. Список литературы: 15–25 наименований источников (оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.05–2008 «Библиографическая ссылка»), не более 30 % собственных статей, не менее 50 % – литература за последние 10 лет, обязательно включайте иностранные источники (желательно не менее 50 %). Если работа была издана и на русском, и на английском (или других) языках, то в **Списке литературы** и в **References** лучше давать ссылку на переводную работу.

9. Англоязычный блок статьи подготавливается на следующей странице, сразу же после русскоязычного списка литературы. Правила оформления данного раздела работы представлены ниже.

10. Сведения для РИНЦ.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ АНГЛОЯЗЫЧНОГО БЛОКА СТАТЬИ

Обращаем особое внимание наших авторов, что в связи с планируемой подготовкой журнала к включению в международные базы данных библиографического описания и научного цитирования *Web of Science* и *Scopus* с 2014 г. существенно изменены правила оформления представляемых рукописей. Главная цель изменений состоит в том, чтобы сделать основные положения и выводы публикуемых в журнале статей доступными для широкой зарубежной аудитории, не владеющей русским языком. Особое значение теперь приобретают англоязычная аннотация к статье (**Abstract**) и список использованной автором литературы (**References**), поскольку именно они, а не текст самой статьи находят отражение в системах *Scopus* и *Web of Science*. По своему содержанию и информативности **Abstract** и **References** должны привлечь внимание зарубежных читателей к теме статьи. Соответственно в интересах автора со всей ответственностью подойти к подготовке этих блоков статьи и обеспечить их максимально высокое качество.

Англоязычная часть статьи должна включать в себя:

заголовок (Title), переведенный с русского языка. В переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме неперебиваемых названий собственных имен и других объектов, имеющих собственные названия; также не используется неперебиваемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это также касается авторских аннотаций и ключевых слов;

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

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

ключевые слова (Keywords);

список литературы (References). Ссылки на источники в англоязычном списке должны совпадать со ссылками, представленными в русскоязычном списке использованной литературы.

Список **всей** использованной в статье литературы дается на **латинице** (источники на англ., фр., нем. и других языках – в оригинале, русскоязычные источники необходимо транслитерировать и переводить (правила оформления см. ниже)). Для автоматической транслитерации в латиницу рекомендуется обращаться на сайт <http://translit.ru> (стандарт транслитерации – **BSI**; настройка перед транслитерацией).

Информация об источниках финансирования исследования (Funding) (гранты, если необходимо).

Внимание! Авторам запрещается предоставлять переводы заголовков статей, аннотаций, ключевых слов и информации об источниках финансирования, подготовленные с помощью электронных переводных систем (работы с ошибками и некорректным переводом будут отклонены).

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ В АНГЛОЯЗЫЧНОМ БЛОКЕ СТАТЬИ*

Списки литературы в российских журналах включают в себя большое разнообразие русскоязычных источников: журналы, материалы конференций, сборники, монографии, патенты, диссертации, отчеты, законы, постановления и пр. Поэтому постоянно возникают вопросы, как готовить для *References* описания этих публикаций.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ПРИМЕРЫ ССЫЛОК

Описание статьи из журналов:

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

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

Описание статьи из электронного журнала:

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

Если статья имеет DOI – обязательно указать его!

Описание статьи с DOI:

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

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

Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

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

Описание материалов конференций:

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

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

Sen'kin A.V. [Issues of vibration diagnostics of elastic spacecraft]. *Problemy teorii i praktiki v inzhernykh issledovaniyakh. Trudy 33 nauchnoi konferentsii RUDN* [Problems of the Theory and Practice of Engineering Research. Proc. Russ. Univ. People's Friendship 33rd Sci. Conf.]. Moscow, 1997, pp. 223–225. (In Russian)

Описание книги (монографии, сборники):

Nenashev M.F. *Poslednee pravitel'stvo SSSR* [Last government of the USSR]. Moscow, Krom Publ., 1993. 221 p.

Ot katastrofy k vrozozhdeniyu: prichiny i posledstviya razrusheniya SSSR [From disaster to rebirth: the causes and consequences of the destruction of the Soviet Union]. Moscow, HSE Publ., 1999. 381 p.

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

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

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

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

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

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

Описание переводной книги:

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

Кафедры:

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

Научная деятельность:

выполнение фундаментальных и прикладных исследований в области:

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

Производственная деятельность:

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

Образовательные услуги:

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

Центры, лаборатории:

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

Адрес:

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

Тел./факс: +7 (383) 346-51-92

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

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

Структура распространения:

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

Регионы распространения:

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

Структура читательской аудитории

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

Журнал представлен:

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

- электронная версия журнала доступна на платформе eLIBRARY.RU.

График выхода журнала в течение текущего года

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

Адрес редакции журнала:

630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 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



МЕРОПРИЯТИЯ

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 «ITE Сибирь» в рамках Международной выставки оборудования для металлообработки и сварки Mashex Siberia. По результатам конференции издается сборник материалов конференции.

Тематика работы конференции:

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

Официальный сайт конференции:

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



РЕКЛАМА. ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ

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.



МЕДИАКИТ