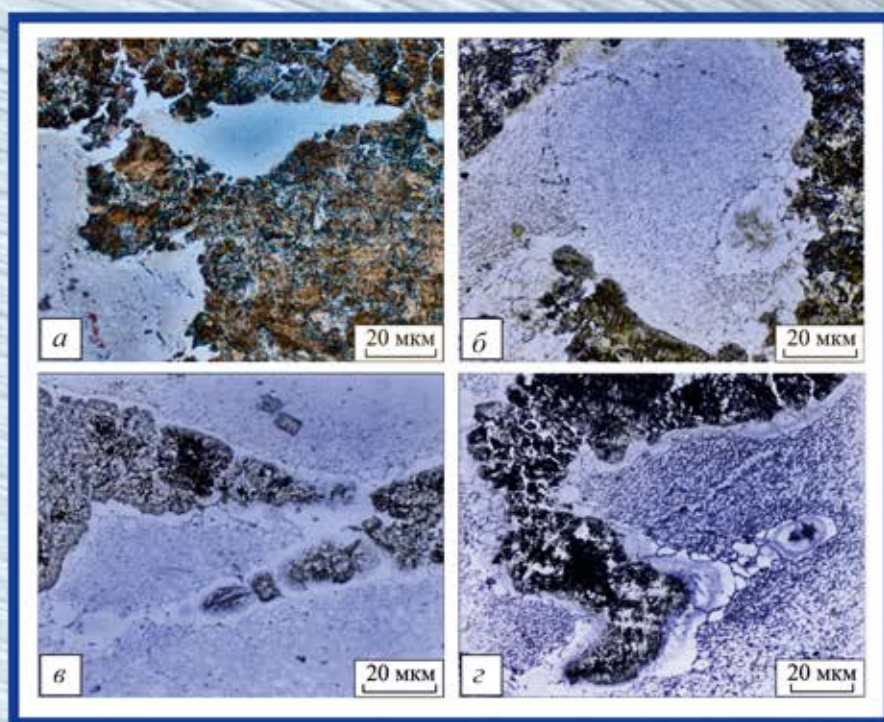


# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ISSN 1994-6309

ТЕХНОЛОГИЯ  
ОБОРУДОВАНИЕ  
ИНСТРУМЕНТЫ

№ 3 (72) ИЮЛЬ–СЕНТЯБРЬ 2016 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



Переходная зона, сформированная при спекании стружки сталей У8 и 12Х18Н10Т при режимах: *а* - 1000 °С, 5 мин; *б* - 1000 °С, 25 мин; *в* - 1100 °С, 5 мин; *г* - 1100 °С, 25 мин

НОВОСИБИРСК



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

Представляем коллекцию новых научных баз данных EBSCO.



Academic Search™ Ultimate



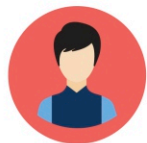
Applied Science & Technology  
Source™ Ultimate



Business Source® Ultimate



Humanities Source™ Ultimate



Sociology Source™ Ultimate

Предоставьте  
пользователям

• **БОЛЬШЕ** •

для максимально

успешной научной работы:

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

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

## ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309

№ 3 (72) ИЮЛЬ–СЕНТЯБРЬ 2016 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

#### Председатель совета

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

#### Члены совета

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

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

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

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

*Российская Федерация:* **Анисименко Г.Е.**, директор производственно-технической фирмы «Сигма-инструмент», г. Новосибирск, **Атапин В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Балков В.П.**, зам. ген.директора АО «ВНИИинструмент», канд. техн. наук, г. Москва, **Батаев В.А.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Буров В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Герасенко А.Н.**, директор ООО НПКФ «Машсервисприбор», г. Новосибирск, **Кирсанов С.В.**, доктор техн. наук, профессор, ТПУ, г. Томск, **Коротков А.Н.**, доктор техн. наук, профессор, академик РАН, 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, **Рахимянов 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 03.06.2016)

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

#### СОУЧРЕДИТЕЛИ

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

#### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

#### ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

**Иванцовский Владимир Владимирович** – доцент,  
доктор технических наук.

**Скиба Вадим Юрьевич** – доцент, кандидат технических наук

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

#### ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

#### ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

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

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

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

Индекс: **70590** («РОСПЕЧАТЬ»)

#### Адрес редакции:

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

Тел. (383) 346-17-79

Сайт журнала [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)

E-mail: [metal\\_working@mail.ru](mailto: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

|   |    |
|---|----|
| <b>Ерисов Я.А., Сурудин С.В., Тиабашвили А.Т., Гречников Ф.В.</b> Компьютерное моделирование влияния идеальных кристаллографических ориентировок на фестонообразование при вытяжке..... | 6  |
| <b>Гольшев А.А., Оришич А.М., Шулятьев В.Б.</b> Оптимальный выбор технологии лазерной резки толстых стальных листов.....  | 15 |
| <b>Рычков Д.А., Янюшкин А.С.</b> Способ повышения эффективности производства изделий из полимерных композитов.....  | 23 |

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| <b>Ложкина Е.А., Ложкин В.С., Мали В.И., Есиков М.А.</b> Влияние термической обработки на структуру и свойства металлических слоистых композиционных материалов, полученных сваркой взрывом тонких пластин разнородных сталей..... | 31 |
| <b>Иванцовский В.В., Батаев И.А., Мартынова Т.Г., Вахрушев Н.В., Ча Г.О.</b> Образование жидкой фазы в поверхностном слое стальных деталей в условиях закалки высокоэнергетическим нагревом токами высокой частоты.....            | 41 |
| <b>Никулина А.А.</b> Формирование неоднородной структуры железоуглеродистых сплавов спеканием частиц разнородных сталей.....   | 52 |
| Рекомендации по написанию научной статьи .....   | 62 |
| Подготовка аннотации .....   | 65 |
| Правила для авторов .....  | 68 |

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 02.09.2016. Выход в свет 15.09.2016. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
 Усл. печ.л. 9,5. Уч.-изд. л. 17,67. Изд. № 202. Заказ 1254. 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.3 (72) July–September 2016

### EDITORIAL BOARD

#### EDITOR-IN-CHIEF:

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

#### DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

#### Editor of the English translation:

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

The magazine is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year

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

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

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

Tel.: (383) 3461777

[http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)

E-mail: [metal\\_working@mail.ru](mailto:metal_working@mail.ru)

## EDITORIAL COUNCIL

## CHAIRMAN:

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

## MEMBERS:

*The Federative Republic of Brazil:*

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

*The Federal Republic of Germany:*

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

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

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

*The Republic of Belarus:*

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

*The Ukraine:*

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

*The Russian Federation:*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**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

|  |    |
|--|----|
| <b>Erisov Y.A., Surudin S.V., Tiabashvili A.T., Grechnikov F.V.</b> Computer simulation of crystallographic orientations influence on earing during drawing..... | 6  |
| <b>Golyshev A.A., Orishich A.M., Shulyatyev V.B.</b> Optimal choice of the technology of thick steel sheets laser cutting.....                                   | 15 |
| <b>Rychkov D.A., Yanyushkin A.S.</b> Method for improving the efficiency of products from polymer composites.....  | 23 |

### MATERIAL SCIENCE

|  |    |
|--|----|
| <b>Lozhkina E.A., Lozhkin V.S., Mali V.I., Esikov M.A.</b> The effect of heat treatment on the structure and properties of metallic layered composite materials formed by explosive welding of heterogeneous steels thin plates..... | 31 |
| <b>Ivancivsky V.V., Bataev I.A., Martynova T.G., Vakhrushev N.V., Cha G.O.</b> The formation of the liquid phase in the surface layer of steel components in the high-energy heat hardening by high frequency currents.....          | 41 |
| <b>Nikulina A.A.</b> Formation of heterogeneous iron-carbon alloys structure by sintering of dissimilar steels particles.....  | 52 |
| Guidelines for Writing a Scientific Paper .....  | 62 |
| Abstract requirements .....  | 65 |
| Rules for authors .....  | 68 |



# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ОРИЕНТИРОВОК НА ФЕСТОНООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ВЫТЯЖКЕ\*

*Я.А. ЕРИСОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ведущий инженер*

*С.В. СУРУДИН<sup>1</sup>, ассистент*

*А.Т. ТИАБАШВИЛИ<sup>1</sup>, студент*

*Ф.В. ГРЕЧНИКОВ<sup>1,2</sup>, доктор техн. наук,  
профессор, чл. корр. РАН*

*(<sup>1</sup>СГАУ им. ак. С.П. Королёва, г. Самара*

*<sup>2</sup>СамНЦ РАН, г. Самара)*

Поступила 6 мая 2016

Рецензирование 6 июля 2016

Принята к печати 15 августа 2016

**Ерисов Я.А.** – 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34,  
Самарский национальный исследовательский университет  
им. академика С.П. Королева,  
e-mail: yaroslav.erisov@mail.ru

На основании разработанной модели анизотропного материала методом конечных элементов исследовано влияние идеальных кристаллографических ориентировок на фестонообразование при вытяжке колпачков из алюминиевого сплава 8011А. Установлено, что ориентировка  $\{124\}\langle 123\rangle$  приводит к образованию четырех фестонов под углом  $45^\circ$  к направлению прокатки, а ориентировки  $\{230\}\langle 231\rangle$ ,  $\{135\}\langle 130\rangle$ ,  $\{100\}\langle 100\rangle$  также приводят к образованию четырех фестонов, но в направлении прокатки и поперечном направлении. Показано, что одним из вариантов сочетания идеальных кристаллографических ориентировок, при котором устраняются фестонообразование и разнотолщинность листов из сплава 8011А, является:  $\{124\}\langle 123\rangle$  – 43,9 %;  $\{135\}\langle 130\rangle$  – 29,2 %;  $\{230\}\langle 231\rangle$  – 25,6 %;  $\{100\}\langle 100\rangle$  – 1,3 %.

**Ключевые слова:** моделирование, вытяжка, фестонообразование, кристаллографическая ориентация, модель материала, LS-DYNA.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-6-14

## Введение

Современный уровень развития вычислительной техники и методов компьютерного моделирования позволяет значительную часть работ по оценке и анализу напряженно-деформированного состояния перенести в область численного эксперимента, получить большой объем информации, провести всестороннее исследование не только процессов формообразования, но и ха-

рактера поведения материала в этих процессах в зависимости от его структурного состояния, рассмотреть и сопоставить большее количество альтернативных вариантов [1–3].

Вместе с тем возможности наиболее популярных программных комплексов, основанных на методе конечных элементов, таких как LS-DYNA, PAM-STAMP 2G, AUTOFORM и другие, в большинстве случаев полностью не востребованы, так как используемые в них алгоритмы и

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-38-00495.

модели или предназначены для изотропных материалов, или основываются на теории пластичности анизотропных сред, в исходные уравнения которой не входят в явном виде параметры кристаллографической ориентации структуры и константы кристаллической решетки, являющиеся причиной возникновения анизотропии свойств [4–6]. Следовательно, нет и оснований для непосредственного анализа деформационных возможностей металла в конкретной операции, определения условий формирования и наиболее эффективного использования направленности свойств заготовок.

Анизотропия с практической точки зрения может быть как полезной, так и вредной. Классическим примером неблагоприятного проявления анизотропии является образование фестонов при вытяжке, величина которых определяется интенсивностью «кубической» текстуры (совместно с текстурой Госсса) и долей бестекстурной составляющей [7]. Аналогичные проблемы возникают при изготовлении деталей методами гибки, обтяжки, формовки и отбортовки [8].

Склонностью к формированию в листах при прокатке неблагоприятной кристаллографической ориентации структуры [9] объясняются и малые деформационные возможности большинства алюминиевых сплавов [10]. При последующем пластическом формообразовании деталей из таких материалов возникает неравномерное развитие деформаций по толщине листа. Вследствие этого происходит чрезмерное утонение заготовок в местах интенсивной деформации и разрушение [11–12].

Полезное влияние текстуры проявляется в улучшении технологической пластичности материала, уменьшении сопротивления деформации при обработке давлением, повышении механических свойств. Например, исследования, проведенные авторами [13], подтвердили возможность повышения предельного коэффициента обтяжки за счет формирования при прокатке листов из алюминиевого сплава В95 преимущественных ориентировок  $\{011\}\langle 100\rangle$  и  $\{023\}\langle 100\rangle$ .

В ряде работ также показано отрицательное влияние неблагоприятной текстуры на характеристики усталости материалов, в частности, на скорость роста усталостной трещины [14–16]. Так, например, текстура деформационного типа

в сравнении с рекристаллизационным типом способствует снижению скорости распространения усталостных трещин [15]. Многочисленные работы подтверждают преимущественный рост усталостных трещин по определенным кристаллографическим направлениям, например, в титановом сплаве Ti-6Al-4V наиболее легко развиваются трещины в плоскости (0002) [14], а в плитах из алюминий-литиевого сплава 8090 – в направлении  $\{110\}\langle 112\rangle$  [16]. В целом скорость распространения усталостных трещин меньше в материалах с ярко выраженной текстурой, чем в изотропных [16].

Как показано в работах [8, 17], рациональная анизотропия является серьезным фактором интенсификации процессов формообразования материалов и повышения эксплуатационных характеристик изделий в определенных направлениях. Поэтому необходимо разрабатывать модели для анализа пластического деформирования анизотропных высокотекстурированных материалов.

В данной статье на примере моделирования процесса вытяжки в программе LS-DYNA приведены результаты практической реализации пользовательской модели материала, учитывающей в явном виде параметры кристаллографической ориентации структуры и константы кристаллической решетки.

### Методика исследования

Для того чтобы в ходе компьютерного моделирования учесть кристаллографическую ориентацию структуры и сформулировать требования к ней, использовалась модель материала, состоящая из следующих элементов [18–19].

1. Критерий пластичности, учитывающий параметры кристаллографической ориентации и кристаллической решетки в явном виде [20]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\{\sigma\} [D]^p \{\sigma\}^T}, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $\{\sigma\}$  и  $\{\sigma\}^T$  – вектор-столбец и строка, содержащие компоненты тензора напряжений;  $[D]^p$  – материальный тензор:

$$[D]^p = \begin{bmatrix} \eta_{12} + \eta_{31} & -\eta_{12} & -\eta_{31} & 0 & 0 & 0 \\ -\eta_{12} & \eta_{12} + \eta_{23} & -\eta_{23} & 0 & 0 & 0 \\ -\eta_{31} & -\eta_{23} & \eta_{23} + \eta_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4\left(\frac{5}{2} - \eta_{23}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4\left(\frac{5}{2} - \eta_{31}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4\left(\frac{5}{2} - \eta_{12}\right) \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$\eta_{ij}$  – обобщенные показатели анизотропии:

$$\eta_{ij} = 1 - \frac{15(A' - 1)}{3 + 2A'} \left( \Delta_i + \Delta_j - \Delta_k - \frac{1}{5} \right); \quad (3)$$

$A'$  – параметр анизотропии кристаллической решетки:

$$A' = \frac{S'_{1111} - S'_{1122}}{2S'_{2323}}; \quad (4)$$

$S'_{ijkl}$  – константы кристаллической решетки;  $\Delta_i$  – ориентационные факторы кристаллографической ориентировки:

$$\Delta_i = \frac{h_i^2 k_i^2 + k_i^2 l_i^2 + l_i^2 h_i^2}{(h_i^2 + k_i^2 + l_i^2)^2}; \quad (5)$$

$h_i, k_i, l_i$  – индексы Миллера, определяющие  $i$ -е направление в кристалле относительно системы координат, связанной с образцом.

Критерий (1) выведен на основе энергетического подхода путем приравнивания потенциальной энергии формоизменения ортотропного тела соответствующей энергии изотропного материала [20].

2. Линейная изотропная модель упрочнения [21]:

$$\bar{\sigma} = H \varepsilon_i, \quad (6)$$

где  $H$  – постоянная упрочнения;  $\bar{\sigma}$  – предел текучести материала;  $\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций.

3. Уравнение расчета напряжений при упруго-пластической деформации, базирующееся на

линеаризации критерия пластичности методом касательных [18]:

$$\{\sigma\}_{n+1} = \{\sigma\}_n - \frac{f_n^{(i)} [D]^e \{a\}_n^{(i)}}{H + \{a\}_n^{(i)T} [D]^e \{a\}_n^{(i)}}, \quad (7)$$

где  $f = \sigma_i - \bar{\sigma}$  – функция текучести;

$\{a\} = \left\{ \frac{\partial f(\{\sigma\})}{\partial \sigma} \right\}$  – нормаль к поверхности пла-

стичности;  $[D]^e$  – тензор упругих постоянных;  $n$  – номер шага расчета;  $i$  – номер итерации.

Для реализации приведенной модели в программе LS-DYNA создан пользовательский материал UMAT 47 на языке программирования Fortran [22]. С использованием данной модели выполнено моделирование процесса вытяжки колпачков из алюминиевого сплава 8011А. При моделировании задавались следующие свойства материала заготовки: предел прочности – 140 МПа; предел текучести – 130 МПа; относительное удлинение – 3 %; модуль Юнга – 70 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,3. С целью оценки влияния идеальных кристаллографических ориентировок на фестонообразование и разнотолщинность при вытяжке принималось, что текстура состоит только из одной ориентировки. Наиболее характерные ориентировки алюминиевого сплава 8011А [23] и рассчитанные для них по формулам (3) и (5) параметры (при  $A' = 1,75$ ) приведены в таблице.

Схема операции со всеми характерными размерами представлена на рис. 1. С целью сокращения количества конечных элементов моделировалось  $\frac{1}{4}$  объема, заключенного между координатными плоскостями  $YOX$  и  $YOZ$ . Ось  $Z$  совпадает с направлением прокатки. Тип конечных элементов для всех частей модели – четырехузловые оболочечные элементы SHELL163 с пятью и тремя точками интегрирования по тол-

### Кристаллографические ориентировки и их параметры для сплава 8011А

| Идеальная ориентировка | Ориентационные факторы |            |            | Обобщенный показатель анизотропии |             |             |
|------------------------|------------------------|------------|------------|-----------------------------------|-------------|-------------|
|                        | $\Delta_1$             | $\Delta_2$ | $\Delta_3$ | $\eta_{12}$                       | $\eta_{23}$ | $\eta_{31}$ |
| {230}<231>             | 0,250                  | 0,067      | 0,213      | 1,256                             | 1,453       | 0,477       |
| {135}<130>             | 0,090                  | 0,250      | 0,211      | 1,189                             | 0,544       | 1,397       |
| {100}<100>             | 0                      | 0          | 0          | 1,533                             | 1,533       | 1,533       |
| {124}<123>             | 0,250                  | 0,250      | 0,191      | 0,709                             | 1,024       | 1,024       |



щине заготовки и инструмента соответственно. Длина ребра конечно-элементной сетки заготовки составляет 0,35 мм, инструмента – 0,7 мм.

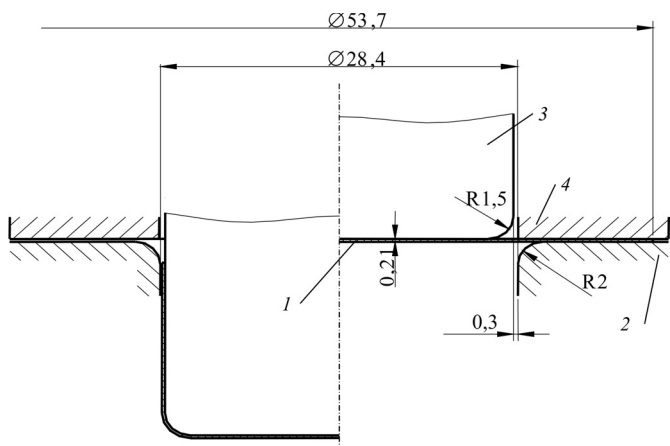


Рис. 1. Схема вытяжки:

1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – пуансон; 4 – прижим

К прижиму в направлении оси  $Y$  приложено постоянное усилие, равное 1,2 кН. Пуансон перемещается с постоянной скоростью 2 м/с по направлению оси  $Y$ , матрица – неподвижна. Деформирующий инструмент принимался абсолютно жестким. Коэффициент трения принят равным 0,08 (по закону Кулона).

### Результаты и обсуждение

Напряженно-деформированное состояние анизотропной заготовки при осесимметричной вытяжке изменяется и в радиальном, и в тангенциальном направлениях (рис. 2, 3). В направлении минимальных значений радиальных растягивающих деформаций утолщение заготовки происходит более интенсивно, вследствие чего значительная часть металла фланца перемеща-

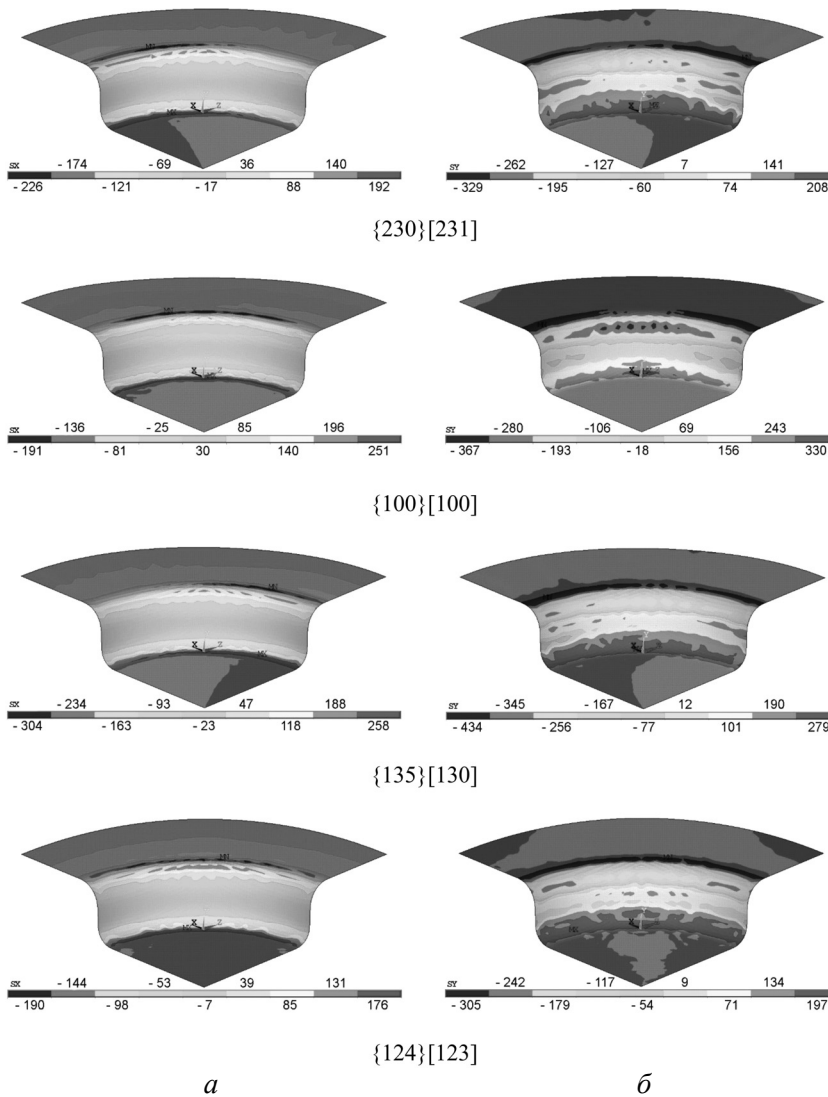


Рис. 2. Распределение напряжений (МПа) на стадии установившегося процесса вытяжки:

$a$  – радиальные;  $b$  – тангенциальные

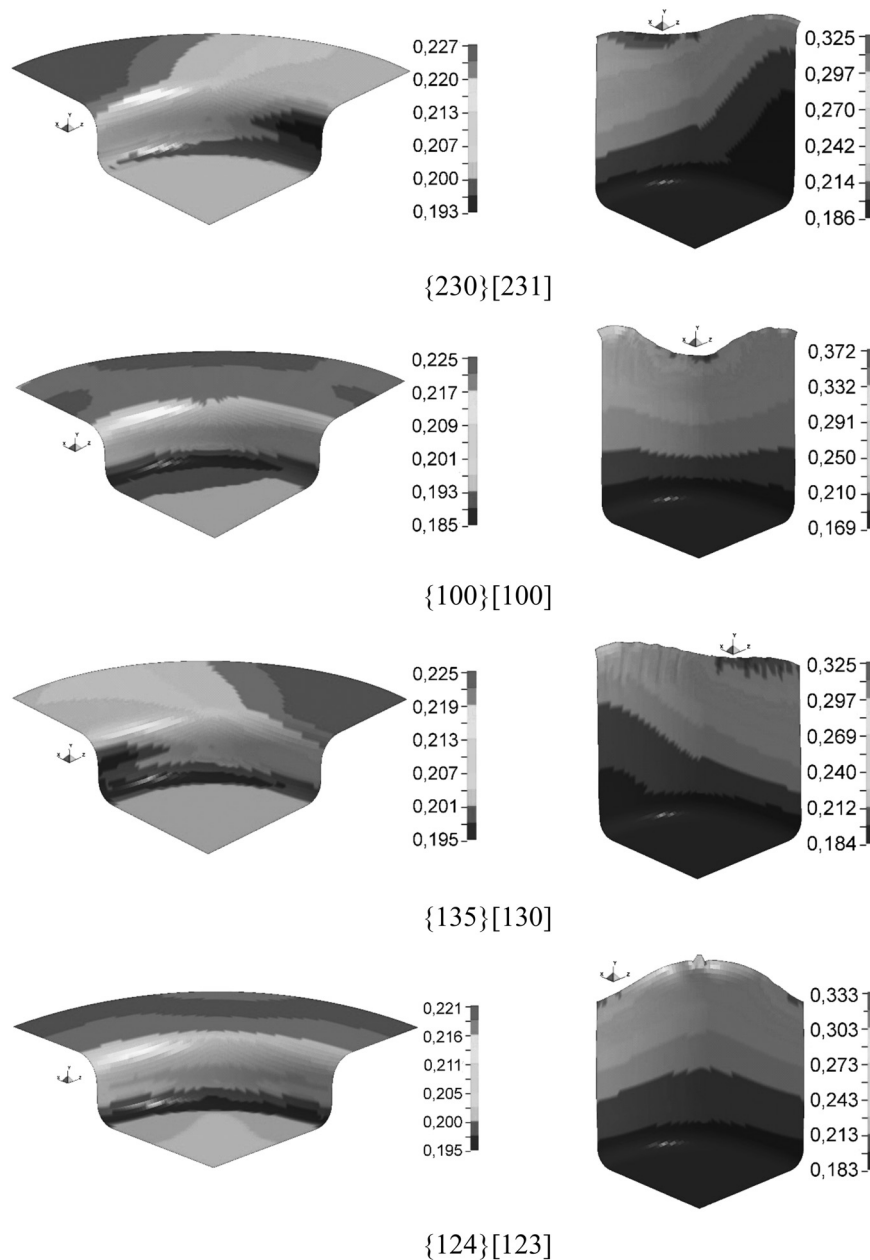

*a*
*б*

Рис. 3. Распределение толщин (мм):

*a* – установившийся процесс; *б* – готовое изделие

ется в толщину, приводя к образованию впадин. В местах же с максимальными значениями радиальной деформации утолщение фланца значительно меньше, а значит, металл идет на увеличение высоты стенки изделия, образуя фестоны. Таким образом, в тех участках фланца, в которых утолщение идет более интенсивно формируется в итоге впадина.

Рассмотренный характер течения металла заготовки в очаге деформаций приводит к формированию при вытяжке неодинаковой толщины стенки изделия по периметру и образующей, что обуславливает, в свою очередь, появление

фестонов. В итоге идеальные кристаллографические ориентировки  $\{230\}\langle 231\rangle$ ,  $\{135\}\langle 130\rangle$ ,  $\{100\}\langle 100\rangle$  приводят к образованию четырех фестонов в направлении прокатки и поперечном направлении. При этом для ориентировки  $\{230\}\langle 231\rangle$  фестоны в направлении прокатки больше фестонов в поперечном направлении, а для ориентировки  $\{135\}\langle 130\rangle$  – наоборот. Колпачок с ориентировкой  $\{124\}\langle 123\rangle$  характеризуется наличием четырех фестонов под углом  $45^\circ$  к направлению прокатки.

Очевидно, что для устранения явлений фестонообразования и разнотолщинности необ-

ходимо устранить плоскостную анизотропию. Этого можно достичь путем формирования в листах при прокатке кристаллографической ориентации структуры со следующими параметрами:  $\Delta_1 = \Delta_2 = (3\Delta_3 + 1) / 8$  (трансверсально-изотропный лист) или  $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 1 / 5$  (изотропный лист) [24]. Используя правило смесей, согласно которому вклад компонента пропорционален его объёмной доле, можно рассчитать состав текстуры листов из сплава 8011А, обеспечивающий выполнение первого условия:  $\{124\}\langle 123\rangle$  – 43,9 %;  $\{135\}\langle 130\rangle$  – 29,2 %;  $\{230\}\langle 231\rangle$  – 25,6 %;  $\{100\}\langle 100\rangle$  – 1,3 %. Необходимо отметить, что приведенные весовые доли идеальных ориентировок представляют собой только один из множества возможных вариантов.

Кроме анализа напряженно-деформированного состояния при вытяжке анизотропных заготовок проведено исследование влияния идеальных кристаллографических ориентировок на силовые характеристики процесса. Как видно из рис. 4, усилие вытяжки заготовок с различными ориентировками может отличаться более чем на 20 %.

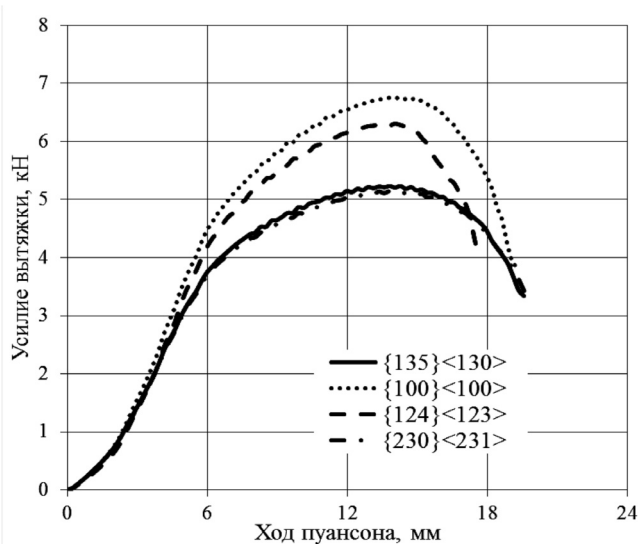


Рис. 4. Изменение усилия вытяжки в зависимости от кристаллографических ориентировок

## Выводы

1. Выполненный на основе разработанной математической модели анализ процесса вытяжки позволил установить влияние идеальных кристаллографических ориентировок на возникновение неравномерного утолщения фланца заготовки по периметру, приводящее к разно-

толщинности стенки изделия и фестонообразованию.

2. На примере алюминиевого сплава 8011А показано, что колпачок с ориентировкой  $\{124\}\langle 123\rangle$  характеризуется наличием четырех фестонов под углом  $45^\circ$  к направлению прокатки. В свою очередь, ориентировки  $\{230\}\langle 231\rangle$ ,  $\{135\}\langle 130\rangle$ ,  $\{100\}\langle 100\rangle$  приводят к образованию четырех фестонов в направлении прокатки и поперечном направлении.

3. Одним из вариантов сочетания идеальных кристаллографических ориентировок, при котором устраняются фестонообразование и разнотолщинность листов из сплава 8011А, является:  $\{124\}\langle 123\rangle$  – 43,9 %;  $\{135\}\langle 130\rangle$  – 29,2 %;  $\{230\}\langle 231\rangle$  – 25,6 %;  $\{100\}\langle 100\rangle$  – 1,3 %.

4. Кристаллографическая ориентация оказывает значительное влияние на силовые характеристики процесса вытяжки.

## Список литературы

1. Continuum scale simulation of engineering materials: fundamentals, microstructures, process applications / ed. by D. Raabe, F. Roters, F. Barlat, L.Q. Chen. – Berlin: Wiley, 2004. – 885 p. – ISBN 978-3-527-30760-9. – doi: 10.1002/3527603786.
2. Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. – М.: Наука, 2004. – 644 с. – ISBN 5-02-025040-6.
3. Owen D.R.J., Hinton E. Finite elements in plasticity: theory and practice. – London: Pineridge Press, 1980. – 450 p. – ISBN-10: 0906674050. – ISBN-13: 978-0906674055.
4. Neto E.A. de Souza, Perić D., Owen D.R.J. Computational methods for plasticity: theory and applications. – Chichester, West Sussex, UK: Wiley, 2008. – 814 p. – ISBN-10: 0470694521. – ISBN-13: 978-0470694527.
5. Dunne F., Petrinic N. Introduction to computational plasticity. – Oxford: Oxford University Press, 2005. – 258 p. – ISBN-10: 0198568266. – ISBN-13: 978-0198568261.
6. Han W., Reddy B.D. Plasticity: mathematical theory and numerical analysis. – Berlin; New York: Springer-Verlag, 2013. – 424 p. – ISBN 978-1-4614-5939-2. – doi: 10.1007/978-1-4614-5940-8.
7. Hutchinson W.B., Oscarsson A., Karlsson A. Control of microstructure and earing behaviour in aluminium alloy AA 3004 hot bands // Materials Science and Technology. – 1989. – Vol. 5, iss. 11. – P. 1118–1127. – doi: 10.1179/mst.1989.5.11.1118.



8. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов: резервы интенсификации. – М.: Машиностроение, 1998. – 446 с. – ISBN 5-217-02892-0.
9. Engler O., Hirsch J. Texture control by thermo-mechanical processing of AA6xxx Al-Mg-Si sheet alloys for automotive applications – a review // *Materials Science and Engineering: A*. – 2002. – Vol. 336, iss. 1–2. – P. 249–262. – doi: 10.1016/S0921-5093(01)01968-2.
10. Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits / D. Banabic, H.J. Bunge, K. Pohlandt, A.E. Tekkaya. – Berlin: Springer, 2000. – 334 p. – ISBN 978-3-540-67906-6. – doi: 10.1007/978-3-662-04013-3.
11. Tóth L.S., Hirsch J., Houtte P. van. On the role of texture development in the forming limits of sheet metals // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 1996. – Vol. 38, iss. 10. – P. 1117–1126. – doi: 10.1016/0020-7403(95)00110-7.
12. Barlat F. Crystallographic texture, anisotropic yield surfaces and forming limits of sheet metals // *Materials Science and Engineering*. – 1987. – Vol. 91. – P. 55–72. – doi: 10.1016/0025-5416(87)90283-7.
13. A manufacturability improvement of glass fiber reinforced aluminum laminate by forming an effective crystallographic texture in V95 alloy sheets / F.V. Grechnikov, V.V. Antipov, Y.A. Erisov, A.F. Grechnikova // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2015. – Vol. 56, iss. 1. – P. 39–43. – doi: 10.3103/S1067821215010095.
14. Peters M., Gysler A., Lotjering G. Influence of texture on fatigue properties of Ti-6Al-4V // *Metallurgical Transactions: A*. – 1984. – Vol. 15, iss. 8. – P. 1597–1605. – doi: 10.1007/BF02657799.
15. A comparison of fatigue-crack propagation behavior in sheet and plate aluminum-lithium alloys / K.T.V. Rao, R.J. Bucci, K.V. Jata, R.O. Ritchie // *Materials Science and Engineering: A*. – 1991. – Vol. 141, iss. 1. – P. 39–48. – doi: 10.1016/0921-5093(91)90705-R.
16. The orientation dependence of fatigue-crack growth in 8090 Al-Li plate / X.J. Wu, W. Wallace, M.D. Raizenne, A.K. Koul // *Metallurgical and Materials Transactions: A*. – 1994. – Vol. 25, iss. 3. – P. 575–588. – doi: 10.1007/BF02651599.
17. Advances in anisotropy and formability / D. Banabic, F. Barlat, O. Cazacu, T. Kuwabara // *International Journal of Material Forming*. – 2010. – Vol. 3, iss. 3. – P. 165–189. – doi: 10.1007/s12289-010-0992-9.
18. Гречников Ф.В., Ерисов Я.А. Математическая модель анизотропного упругопластического материала // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2011. – № 6 (30). – С. 73–80.
19. Grechnikov F.V., Erisov Y.A. Virtual material model with the given crystallographic orientation of the structure // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 684. – P. 134–142. – doi: 10.4028/www.scientific.net/КЕМ.684.134.
20. Гречников Ф.В., Ерисов Я.А. Разработка критерия пластичности для расчетов формообразования высокотекстурированных анизотропных заготовок // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2012. – № 1 (32). – С. 94–99.
21. Chakrabarty J. Applied plasticity. – 2<sup>nd</sup> ed. – Berlin: Springer, 2010. – 758 p. – ISBN 978-0-387-77673-6. – doi: 10.1007/978-0-387-77674-3.
22. Ерисов Я.А., Гречников Ф.В., Сурудин С.В. УМАТ47 (программа для ЭВМ): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014662658. – Заявл. 15.10.2014; опубл. 20.01.2015, Бюл. № 1.
23. Гречников Ф.В., Арышенский Е.В., Ерисов Я.А. Проектирование технологических режимов прокатки листов и лент для вытяжки изделий с минимальным фестонобразованием // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2011. – № 2 (26). – С. 158–167.
24. Адамеску Р.А., Гельд П.В., Митюшин Е.А. Анизотропия физических свойств металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 137 с.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3 (72), July – September 2016, Pages 6–14

### Computer simulation of crystallographic orientations influence on earing during drawing

Erisov Y.A.<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Senior engineer, e-mail: yaroslav.erisov@mail.ru

Surudin S.V.<sup>1</sup>, Assistant, e-mail: innosam63@gmail.com

Tiabashvili A.T.<sup>1</sup>, Student, e-mail: tiabashvili94@mail.ru

Grechnikov F.V.<sup>1,2</sup>, D.Sc. (Engineering), Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, e-mail: gretch@ssau.ru

<sup>1</sup> Samara State Aerospace University (National Research University), 34 Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation

<sup>2</sup> Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 3A Studencheskiy per., Samara, 443001, Russian Federation

### Abstract

The practical implementation of the user material model, which takes into account the ideal crystallographic orientations, is illustrated in terms of drawing process simulation.

The material model consists of the following elements: yield criterion, which takes into account explicitly the parameters of crystallographic orientation and the crystal lattice constants; linear isotropic hardening model; the tangent cutting plane algorithm for updating stresses. The model is implemented on the FORTRAN programming language as user material UMAT 47 for the software LS-DYNA.

The drawing of caps made of 8011A aluminum alloy is simulated using the model. The blank texture consists only of one ideal crystallographic orientation:  $\{124\}\langle 123\rangle$ ,  $\{230\}\langle 231\rangle$ ,  $\{135\}\langle 130\rangle$  and  $\{100\}\langle 100\rangle$ .

It is found that the stress-strain state of anisotropic axisymmetric blank during drawing changes both in the radial and tangential directions. In the direction of the minimum values of tensile radial strains the blank thickening occurs more intensively. Whereby a significant portion of the flange metal moves in the thickness and leads to the formation of cavities. In the places with maximum values of the radial strains the flange thickening is significantly less. Hence, the metal goes on increase of the cap height, forming an ear.

It is determined that ideal crystallographic orientation  $\{124\}\langle 123\rangle$  causes formation of 4 ears at angle  $45^\circ$  to rolling direction, while orientations  $\{230\}\langle 231\rangle$ ,  $\{135\}\langle 130\rangle$ ,  $\{100\}\langle 100\rangle$  causes ears at rolling and transverse directions. Also it is shown that one possible combination of ideal crystallographic orientations, which eliminates earing and non-uniform thickness of cap, is the following:  $\{124\}\langle 123\rangle$  – 43,9 %;  $\{135\}\langle 130\rangle$  – 29,2 %;  $\{230\}\langle 231\rangle$  – 25,6 %;  $\{100\}\langle 100\rangle$  – 1,3 %.

In addition, the influence of the ideal crystallographic orientations on the drawing force is studied. It is found that the drawing force of blanks with different orientations changes by more than 20 % ( $\{100\}\langle 100\rangle$  – maximum force;  $\{230\}\langle 231\rangle$ ,  $\{135\}\langle 130\rangle$  – minimum force).

### Keywords

simulation, drawing, earing, crystallographic orientation, material model, LS-DYNA.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-6-14

### References

1. Raabe D., Roters F., Barlat F., Chen L.Q., eds. *Continuum scale simulation of engineering materials: fundamentals, microstructures, process applications*. 1<sup>st</sup> ed. Berlin, Wiley, 2004. 885 p. ISBN 978-3-527-30760-9. doi: 10.1002/3527603786
2. Rybin Yu.I., Rudskoi A.I., Zolotov A.M. *Matematicheskoe modelirovanie i proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem* [Mathematical modelling and designing of metal forming processes]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 644 p. ISBN 5-02-025040-6
3. Owen D.R.J., Hinton E. *Finite elements in plasticity: theory and practice*. 1<sup>st</sup> ed. London, Pineridge Press, 1980. 450 p. ISBN-10: 0906674050. ISBN-13: 978-0906674055
4. Neto E.A. de Souza, Perić D., Owen D.R.J. *Computational methods for plasticity: theory and applications*. 1<sup>st</sup> ed. Chichester, West Sussex, UK, Wiley Publ., 2008. 814 p. ISBN-10: 0470694521. ISBN-13: 978-0470694527
5. Dunne F., Petrinic N. *Introduction to computational plasticity*. Oxford, Oxford University Press, 2005. 258 p. ISBN-10: 0198568266. ISBN-13: 978-0198568261
6. Han W., Reddy B.D. *Plasticity: mathematical theory and numerical analysis*. Berlin, New York, Springer-Verlag, 2013. 424 p. ISBN 978-1-4614-5939-2. doi: 10.1007/978-1-4614-5940-8
7. Hutchinson W.B., Oscarsson A., Karlsson A. Control of microstructure and earing behaviour in aluminium alloy AA 3004 hot bands. *Materials Science and Technology*, 1989, vol. 5, iss. 11, pp. 1118–1127. doi: 10.1179/mst.1989.5.11.1118
8. Grechnikov F.V. *Deformirovanie anizotropnykh materialov: rezervy intensivatsii* [Deformation of anisotropic materials: intensification reserves]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1998. 446 p. ISBN 5-217-02892-0

9. Engler O., Hirsch J. Texture control by thermomechanical processing of AA6xxx Al-Mg-Si sheet alloys for automotive applications. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, vol. 336, iss. 1–2, pp. 249–262. doi: 10.1016/S0921-5093(01)01968-2
10. Banabic D., Bunge H.J., Pohlandt K., Tekkaya A.E. eds. *Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits*. Berlin, Springer, 2000. 334 p. doi: 10.1007/978-3-662-04013-3. ISBN 978-3-540-67906-6
11. Tóth L.S., Hirsch J., Houtte P. van. On the role of texture development in the forming limits of sheet metals. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1996, vol. 38, iss. 10, pp. 1117–1126. doi: 10.1016/0020-7403(95)00110-7
12. Barlat F. Crystallographic texture, anisotropic yield surfaces and forming limits of sheet metals. *Materials Science and Engineering*, 1987, vol. 91, pp. 55–72. doi: 10.1016/0025-5416(87)90283-7
13. Grechnikov F.V., Antipov V.V., Erisov Y.A., Grechnikova A.F. A manufacturability improvement of glass fiber reinforced aluminum laminate by forming an effective crystallographic texture in V95 alloy sheets. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2015, vol. 56, iss. 1, pp. 39–43. doi: 10.3103/S1067821215010095
14. Peters M., Gysler A., Lotjering G. Influence of texture on fatigue properties of Ti-6Al-4V. *Metallurgical Transactions: A*, 1984, vol. 15, iss. 8, pp. 1597–1605. doi: 10.1007/BF02657799
15. Rao K.T.V., Bucci R.J., Jata K.V., Ritchie R.O. A comparison of fatigue-crack propagation behavior in sheet and plate aluminum-lithium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 1991, vol. 141, iss. 1, pp. 39–48. doi: 10.1016/0921-5093(91)90705-R
16. Wu X.J., Wallace W., Raizenne M.D., Koul A.K. The orientation dependence of fatigue-crack growth in 8090 Al-Li plate. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 1994, vol. 25, iss. 3, pp. 575–588. doi: 10.1007/BF02651599
17. Banabic D., Barlat F., Cazacu O., Kuwabara T. Advances in anisotropy and formability. *International Journal of Material Forming*, 2010, vol. 3, iss. 3, pp. 165–189. doi: 10.1007/s12289-010-0992-9
18. Grechnikov F.V., Erisov Ya.A. Matematicheskaya model' anizotropnogo uprugoplasticheskogo materiala [Mathematical model of anisotropic elastic-plastic material]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta – Vestnik of the Samara State Aerospace University*, 2011, no. 6 (30), pp. 73–80.
19. Grechnikov F.V., Erisov Y.A. Virtual material model with the given crystallographic orientation of the structure. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 684, pp. 134–142. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.684.134
20. Grechnikov F.V., Erisov Ya.A. Razrabotka kriteriya plastichnosti dlya raschetov formoizmeneniya vysokoteksturirovannykh anizotropnykh zagotovok [Development of yield criteria for the calculation of forming high-textured anisotropic blanks]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta – Vestnik of the Samara State Aerospace University*, 2012, no. 1 (32), pp. 94–99.
21. Chakrabarty J. *Applied plasticity*. 2<sup>nd</sup> ed. Berlin, Springer, 2010. 758 p. ISBN 978-0-387-77673-6. doi: 10.1007/978-0-387-77674-3
22. Erisov Ya.A., Grechnikov F.V., Surudin S.V. *UMAT47 (programma dlya EVM)* [UMAT47 (software)]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2014662658, 2015. (In Russian)
23. Grechnikov F.V., Aryshenskii E.V., Erisov Ya.A. Proektirovanie tekhnologicheskikh rezhimov prokatki listov i lent dlya vytyazhki izdelii s minimal'nym festonoobrazovaniem [Design of sheet and strip rolling modes for drawing articles with minimal earing]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta – Vestnik of the Samara State Aerospace University*, 2011, no. 2 (26), pp. 158–167.
24. Adamesku R.A., Gel'd P.V., Mityushin E.A. *Anizotropiya fizicheskikh svoystv metallov* [Anisotropy of physical properties of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 137 p.

## Funding

The reported study is funded by RFBR according to the research project №16-38-00495.

## Article history

Received 6 May 2016

Revised 6 July 2016

Accepted 15 August 2016

# ОПТИМАЛЬНЫЙ ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ ТОЛСТЫХ СТАЛЬНЫХ ЛИСТОВ

*А.А. ГОЛЫШЕВ, аспирант, м.н.с.*

*А.М. ОРИШИЧ, доктор физ.-мат. наук,  
профессор, зав. лаб.*

*В.Б. ШУЛЯТЬЕВ, доктор техн. наук, с.н.с.  
(ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск)*

Поступила 5 мая 2016

Рецензирование 5 июля 2016

Принята к печати 15 августа 2016

**Шулятьев В.Б** – 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1,  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
e-mail: shulyat@rambler.ru

Сформулирован критерий и определена граничная толщина листа, при превышении которой целесообразно использовать кислородную резку с поддержкой лазерным лучом (кислородно-лазерная резка) вместо лазерной резки с продувкой канала реза кислородом (лазерно-кислородная резка). Предельная для качественной лазерно-кислородной резки толщина находится из условия равенства оптимальной скорости резки, при которой шероховатость поверхности реза минимальна, и критической скорости, ниже которой процесс резки становится неуправляемым. Экспериментально определена критическая скорость 0,4...0,5 м/мин и соответствующая ей предельная толщина качественной лазерно-кислородной резки 40...50 мм. Проведено сравнение качественных показателей двух видов резки в переходной области. Показано, что при переходе на кислородно-лазерную резку при толщине листа 30...40 мм не происходит ухудшения качества поверхности реза по сравнению с лазерно-кислородной резкой, если параметры процесса выбраны оптимальным образом.

**Ключевые слова:** лазерная резка, CO<sub>2</sub>-лазер, кислородная резка, шероховатость поверхности, толщина листа.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-15-22

## Введение

Лазерная резка широко применяется в промышленности как разделительная – в заготовительном производстве и для разрезания крупных изделий при их утилизации и как качественная – при производстве готовых деталей. Основным критерием качества в большинстве применений лазерной резки является шероховатость поверхности реза, которая должна быть по возможности минимальной.

Самым распространенным материалом для лазерной резки является углеродистая или низколегированная сталь, при разрезании которой в качестве вспомогательного газа чаще всего ис-

пользуется кислород [1]. Лазерная резка стали с кислородом в качестве вспомогательного газа возможна в двух вариантах – лазерно-кислородная резка и кислородно-лазерная резка [2]. Лазерно-кислородная резка представляет собой вынужденное горение железа в кислороде [3, 4]. В этом случае лазерное излучение и экзотермическая реакция окисления дают приблизительно равный вклад в баланс энергии [2, 5]. Кислородно-лазерная резка принципиально не отличается от традиционной кислородной резки, лазерный луч здесь только инициирует реакцию горения, которая обеспечивает практически весь вклад энергии. При лазерно-кислородной резке ширина реза привязана к диаметру лазерного луча и

составляет десятые доли миллиметра [1, 2], при кислородно-лазерной резке ширина реза определяется диаметром струи кислорода.

Лазерно-кислородная резка наиболее эффективна при резке тонких листов, но она применяется также и при толщине листов более 10 мм. Кислородно-лазерная резка больше подходит для резки толстых листов. К настоящему времени не разработаны научно-обоснованные критерии выбора способа резки для данной толщины листа при условии качественного реза с малой шероховатостью. Это связано прежде всего с тем, что механизмы формирования рельефа поверхности реза к настоящему времени полностью не изучены. Известные теоретические модели лазерной резки не позволяют по исходным параметрам резки (мощность лазера, скорость резки, расход технологического газа, условия фокусировки лазерного излучения) определить шероховатость поверхности реза при разной толщине листа и выбрать оптимальный способ резки [6–8]. В настоящей работе задача решается экспериментальным методом.

Целью работы является исследование «переходной области» между двумя способами резки и поиск критерия, позволяющего при условии качественного реза определить предельную для лазерно-кислородной резки толщину листа, при превышении которой целесообразно применять кислородно-лазерную резку.

### Методика эксперимента

При лазерно-кислородной резке одной только энергии реакции окисления железа недостаточно для плавления материала и распространения фронта реза. Поэтому ширина канала реза не может существенно превышать поперечный размер сфокусированного лазерного пучка, который и определяет ширину реза. Стабильный режим вынужденного горения может существовать в ограниченном диапазоне скоростей резки. Нижняя граница этого диапазона  $V_c$  определяется переходом к неуправляемому самопроизвольному горению. При понижении скорости резки возрастает температура материала в окрестности фронта реза и становится возможным горение железа и распространение фронта плавления уже без поддержки лазерного излучения только за счёт энергии реакции окисления. При

скорости ниже  $V_c$ , когда резка происходит в «автогенном» режиме, ширина канала реза уже не определяется лазерным лучом, и канал реза может уширяться в боковом направлении в пределах струи кислорода до размеров газового сопла, которое в случае толстых листов может иметь диаметр 2...3 мм. Струя кислорода при лазерно-кислородной резке не оптимизирована для формирования канала реза, распространение фронта разрушения материала происходит нерегулярным образом, процесс становится неуправляемым. Как следствие, поверхность реза имеет высокую шероховатость.

Определив скорости  $V_q$  качественной резки и критическую скорости  $V_c$  перехода в неуправляемый режим и их зависимость от толщины разрезаемого листа, из условия  $V_q = V_c$  можно определить предельную толщину  $t_m$ , при превышении которой становится невозможным получение качественного реза.

Эксперименты по резке проводились на созданном в ИТПМ СО РАН лазерном технологическом комплексе на основе непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера [9] мощностью до 8 кВт с параметром качества пучка BPP (Beam Parameter Product, произведение радиуса пучка в ближней зоне на угловой радиус пучка в дальней зоне), равном 4,7 мм·мрад. Резка производилась излучением с круговой поляризацией по традиционной схеме. Излучение фокусировалось одиночной ZnSe линзой. Соосно с лазерным пучком в зону реза подавалась струя технологического газа (кислород) чистотой 99,999 %. Разрезались листы низкоуглеродистой стали обыкновенного качества СтЗпс толщиной от 5 до 25 мм. Экспериментальные исследования зависимости шероховатости от параметров резки представлены в статье [10], настоящая работа является продолжением этих научных рассуждений.

Высокое качество поверхности реза с малой шероховатостью при резке низкоуглеродистой стали большой толщины может быть достигнуто при кислородно-лазерной резке [11, 12], когда канал реза формируется не лазерным лучом, а специально сформированной струей кислорода. В этом случае лазерный луч только нагревает материал до температуры горения, а вся необходимая для образования реза энергия выделяется в результате экзотермической реакции окисления

железа. О перспективности такого способа резки впервые сообщалось в работе [11]. В статье [12] сказано, что для обеспечения в узком канале ( $\sim 1$  мм) безотрывного, безвихревого струйного течения режущего газа нужно использовать сверхзвуковое сопло. Также найдены параметры сопел, которые создают остронаправленные газовые струи и совместимы с оптической системой лазерного резака.

Схема кислородно-лазерной резки показана на рис. 1. В экспериментах по кислородно-лазерной резке также использовался  $\text{CO}_2$ -лазер [9]. Сопло с выходным диаметром 3 мм формирует сверхзвуковую струю кислорода. Лазерное излучение фокусируется линзой таким образом, что размер пятна на поверхности листа равен 4...4,5 мм. Металл в окрестности струи нагревается до температуры горения, при перемещении резака образуется рез, ширина которого равна диаметру струи. Резка проводилась при мощности излучения 1,5 кВт, так как при меньшей мощности происходит ухудшение качества реза, при большей мощности качество стабилизируется.

### Результаты и их обсуждение

Неуправляемый режим лазерно-кислородной резки [2, 13] возникает с понижением скорости резки, когда линейная скорость горения начинает превышать скорость движения лазерного луча

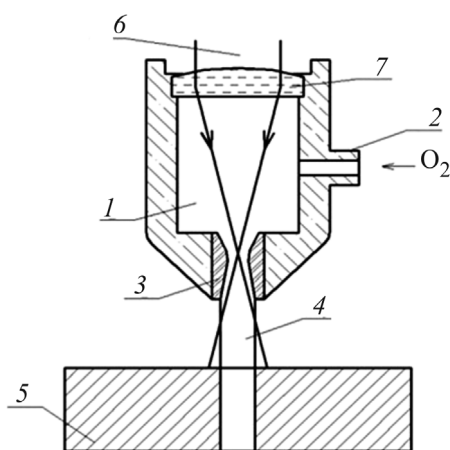
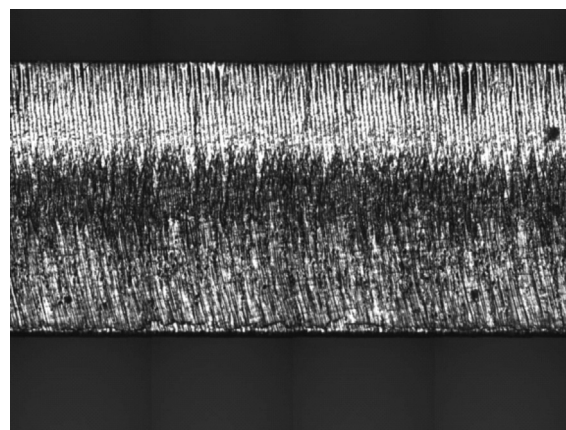


Рис. 1. Схема кислородно-лазерной резки:

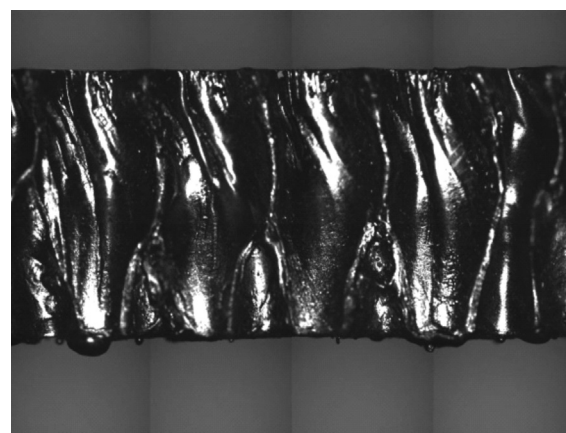
1 – форкамера резака; 2 – патрубок для подачи кислорода; 3 – сверхзвуковое сопло; 4 – струя кислорода; 5 – разрезаемый лист; 6 – лазерный луч; 7 – фокусирующая линза

[2]. Задаваемыми параметрами при лазерной резке являются мощность  $W$  лазерного излучения, скорость  $V$  резки, давление  $P$  технологического газа в камере лазерного резака, положение фокуса луча относительно поверхности листа. На рис. 2, а и б показаны фотографии поверхности реза соответственно в управляемом и неуправляемом режиме при толщине листа 5 мм. В работе [2] сообщается о скорости горения железа в кислороде в условиях лазерной резки 10...15 мм/с, но нет описания методики определения, и эти данные следует рассматривать как оценочные.

В экспериментах определялась зависимость критической скорости  $V_c$  перехода в неуправляемый режим от давления кислорода. Разрезались листы толщиной 5, 10, 16, 20 мм. Делались прямолинейные резы длиной 70 мм с шагом по скорости 0,83 мм/с. Критическая скорость определялась как скорость, при которой неуправляемый режим возникает не менее чем на половине



а



б

Рис. 2. Фото поверхности реза при лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали,  $t = 5$  мм,  $W = 1$  кВт,  $P = 0,05$  МПа:

а –  $V = 25$  мм/с; б –  $V = 6,7$  мм/с



длины реза. Положение фокуса выбиралось из условия минимума шероховатости поверхности реза. Результаты показаны на рис. 3.

Критическая скорость слабо зависит от толщины листа и мощности излучения в области качественных резов и растет с ростом давления кислорода. Зависимость шероховатости поверхности от давления является немонотонной – минимум шероховатости достигается при давлении 0,05 МПа при толщине листа 5 и 10 мм и 0,04 МПа при толщине листа 16 и 20 мм. Оптимальный диапазон давлений  $\Delta P_{\text{opt}}$  отмечен на рис. 3, ему соответствует величина  $V_c = 6,7 \dots 8,3$  мм/с.

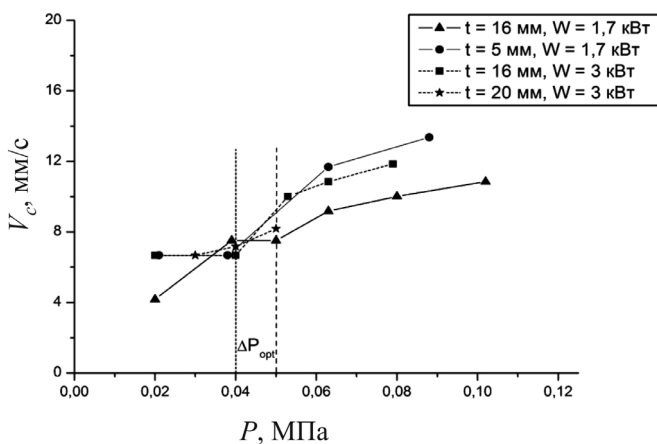


Рис. 3. Критическая скорость  $V_c$  перехода в неуправляемый режим в зависимости от давления кислорода в камере лазерного резака

Результаты исследований по экспериментальной оптимизации лазерно-кислородной резки толстых стальных листов изложены в работе [10]. Изменялись зависимости шероховатости поверхности реза от параметров резки – мощности лазерного излучения, скорости резки, положения фокуса относительно поверхности листа (ширины реза). При обработке большого объема экспериментальных данных использованы обобщенные безразмерные переменные – число Пекле  $Pe = \frac{Vb}{a}$  и безразмерная мощность  $Q = \frac{W}{\lambda e T_m}$ ,

где  $b$  – ширина реза;  $a = \frac{\lambda}{C\rho}$  – температуропро-

водность материала;  $\lambda$ ,  $C$ ,  $\rho$  – соответственно теплопроводность, удельная теплоёмкость и плотность материала;  $W$  – мощность лазерного излучения;  $T_m$  – температура плавления материала. Оптимальные значения входящих в  $Pe$  и  $Q$

размерных переменных  $V_q$ ,  $b_q$ ,  $W_q$ , при которых шероховатость поверхности минимальна, определялись экспериментально. В результате найдены условия получения реза с минимальной шероховатостью:  $V_q b_q = 11$  мм<sup>2</sup>/с,  $W_q/t = 200$  Вт/мм. Также в статье [10] определена зависимость оптимальной ширины реза  $b_q$  от толщины, листа:  $b_q[\text{мм}] = 0,35 + 0,02t$ . Отсюда скорость качественного реза связана с толщиной листа следующим образом:

$$V_q = \frac{11}{0,35 + 0,022t}.$$

Условие  $V_q = V_c$  в графическом виде показано на рис. 4. При  $V_c = 6,7 \dots 8,3$  мм/с и слабой зависимости  $V_q(t)$  в области  $V_c \approx V_q$  имеется достаточно широкая зона неопределённости в определении максимальной толщины,  $t_m = 48 \dots 65$  мм. Поскольку решается задача определения максимальной толщины качественного реза, когда шероховатость поверхности должна быть минимальной, величину  $t_m$  следует определять по нижней границе диапазона. Тогда с учетом погрешности  $\pm 10\%$  в определении величины  $V_q$  имеем  $t_m = 44 \dots 53$  мм. Округляя, можно принять  $t_m = 40 \dots 50$  мм. Эта величина и даёт оценку максимальной толщины листа, при которой возможна стабильная лазерно-кислородная резка низкоуглеродистой стали с малой шероховатостью поверхности.

Найденная величина  $t_m$  обусловлена физическими факторами. При практическом использовании лазерной резки в производственных условиях, когда действуют ещё и технические факторы, достигнутые результаты могут отличаться от результатов, полученных при лабораторных исследованиях. С учетом этого полученный результат хорошо согласуется с практикой лазерной резки – максимальная толщина качественной лазерно-кислородной резки стальных листов излучением  $\text{CO}_2$ -лазера не превышает 25...30 мм [14].

Это ограничение не связано с недостатком энергии – резка листов этих толщин производится при мощности 5...6 кВт. Близкие значения мощности даются и найденным экспериментально в [10] соотношением  $W_q/t = 200$  Вт/мм, соответствующая зависимость показана на рис. 4. В то же время современные промышленные технологические лазеры имеют мощность до 8 кВт.

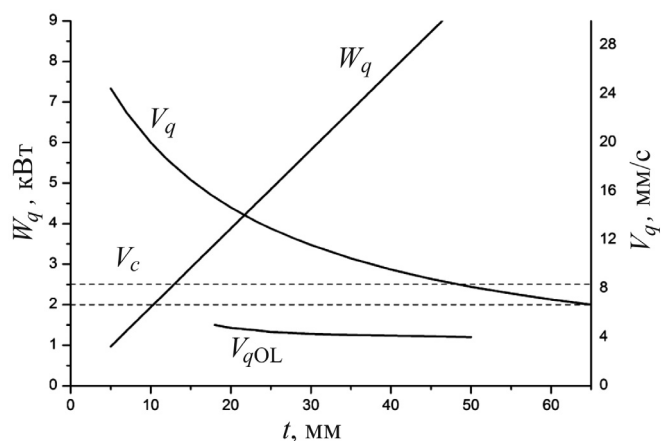


Рис. 4. Оптимальная скорость  $V_q$  и оптимальная мощность лазерно-кислородной резки, критическая скорость  $V_c$  перехода в неуправляемый режим и оптимальная скорость  $V_{qOL}$  кислородно-лазерной резки в зависимости от толщины разрезаемого листа

При помощи кислородно-лазерной резки разрезались листы стали обыкновенного качества Ст3пс толщиной 18, 40 и 50 мм. Кроме того, разрезался лист толщиной 32 мм из высококачественной стали 10ХСНД, которая применяется для изготовления мостовых конструкций и является возможным разрезаемым материалом при практическом использовании кислородно-лазерной резки. Стали Ст3пс и 10ХСНД близки по оптимальным режимам резки и характеристикам реза. С учетом того, что в работе ставится цель не детального исследования зависимости шероховатости от свойств разрезаемого материала, а только оценки характерной величины шероховатости, составление такого ряда толщин и марок сталей можно считать оправданным.

Качественный рез достигается при давлении кислорода в форкамере 0,6...0,8 МПа и зазоре между соплом и листом 4...5 мм. При этом диаметр пятна излучения на поверхности листа равен 4...4,5 мм, ширина реза – 3,4 мм. Фотографии поверхности реза при толщине листа 40 мм и различном давлении кислорода показаны на рис. 5. Видно ухудшение качества поверхности и появление выраженной бороздчатой структуры при давлении 0,4 и 0,95 МПа ниже и выше оптимального. Оптимальная скорость резки, соответствующая минимуму шероховатости, слабо зависит от толщины в диапазоне 18...50 мм и равна 3,8...5 мм/с. Возможна резка и при большей скорости, листы толщиной 18 мм разрезались на скорости до 11,7 мм/с, но при этом существенно

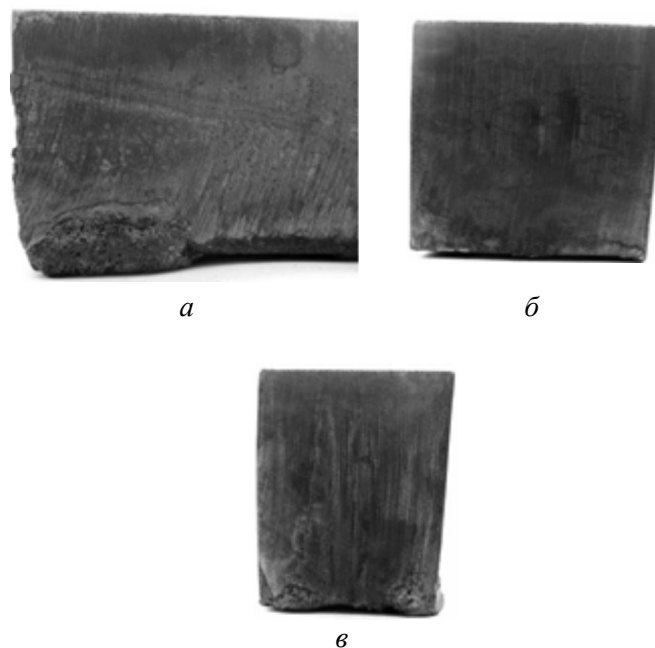


Рис. 5. Поверхность реза при кислородно-лазерной резке стальных пластин толщиной 40 мм; давление кислорода:

$a$  – 0,4 МПа;  $b$  – 0,65 МПа;  $v$  – 0,95 МПа

возрастала шероховатость и появлялся металлический грат на нижней кромке листа. Шероховатость  $R_z$  при резке в оптимальном режиме, измеренная на половине толщины, равна 15 мкм при толщине листа 32 и 23 мм при толщине 40 мм. Шероховатость поверхности при лазерной резке металлов растет с толщиной листа [1, 2]. В работах [10, 15] получена эмпирическая зависимость шероховатости поверхности от толщины листа при лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали  $CO_2$ -лазером в оптимальном режиме –  $R_z[\text{мкм}] = 1,15t[\text{мм}] + 6,5$ . Таким образом, кислородно-лазерная резка обеспечивает при близкой к предельной для лазерно-кислородной резки толщине 30...40 мм достаточно высокое качество реза – шероховатость поверхности соответствует шероховатости при вдвое меньшей толщине в случае лазерно-кислородной резки.

## Выводы

Предложен критерий определения предельной толщины листа при качественной лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали излучением  $CO_2$ -лазера. Предельная толщина определяется из условия равенства оптимальной скорости резки, при которой шероховатость

поверхности минимальна, и критической скорости, ниже которой процесс резки становится неуправляемым. Экспериментально определена критическая скорость и определена максимальная толщина листа, при которой возможна качественная резка – 40...50 мм.

При больших толщинах для резки углеродистых и низколегированных сталей может использоваться кислородно-лазерная резка. Измерена оптимальная (соответствующая минимуму шероховатости) скорость кислородно-лазерной резки в диапазоне толщин листов 18...50 мм. При оптимальном режиме кислородно-лазерной резки и толщине листов 32 и 40 мм шероховатость поверхности реза не превышает шероховатости при лазерно-кислородной резке. Таким образом, переход на кислородно-лазерную резку в области предельных для лазерно-кислородной резки толщин может быть осуществлен без ухудшения качества реза.

#### Список литературы

1. LIA handbook of laser materials processing / eds.: J.F. Ready, D.F. Farson, T. Feeley. – 1<sup>st</sup> ed. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. – 715 p. – ISBN 978-3-540-41770-5.
2. Steen W.M., Mazumder J. Laser material processing. – 4<sup>th</sup> ed. – London: Springer-Verlag, 2010. – 558 p. – ISBN 978-1-84996-061-8. – doi: 10.1007/978-1-84996-062-5.
3. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А.М. Прохоров, В.И. Конов, И. Урсу, И.Н. Михайлеску. – М.: Наука, 1988. – 538 с.
4. Laser-oxygen cutting of mild steel: the thermodynamics of the oxidation reaction / J. Powell, D. Petring, R.V. Kumar, S.O. Al-Mashikhi, A.F.H. Kaplan, K.T. Voisey // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2009. – Vol. 42. – P. 015504. – doi: 10.1088/0022-3727/42/1/015504.
5. The theory of laser material processing / ed.: J. Dowden. – Dordrecht: Springer, 2009. – 381 p. – ISBN-13 978-1-4020-9339-5. – doi: 10.1007/978-1-4020-9340-1.
6. Rajpurohit S.R., Patel D.M. Striation mechanism in laser cutting – the review // International Journal of Engineering Research and Applications. – 2012. – Vol. 2, iss. 2. – P. 457–461.
7. Diagnostics, modeling and simulation: three keys towards mastering the cutting process with fiber, disk and diode lasers / D. Petring, T. Molitor, F. Schneider, N. Wolf // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 39. – P. 186–196. – doi: 10.1016/j.phpro.2012.10.029.
8. Fundamental study of CO<sub>2</sub>- and fiber laser cutting of steel plates with high speed visualization technique / G.V. Ermolaev, P.V. Yudin, F. Briand, A.V. Zaitsev, O.B. Kovalev // Journal of Laser Applications. – 2014. – Vol. 26. – P. 042004. – doi: 10.2351/1.4895563.
9. High-quality beam generation in a 8 kW cw CO<sub>2</sub> 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.
10. Experimental study of laser-oxygen cutting of low-carbon steel using fibre and CO<sub>2</sub> 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.
11. O'Neill W., Gabzdyl J.T. New developments in laser-assisted oxygen cutting // Optics and Lasers in Engineering. – 2000. – Vol. 34, iss. 4–6. – P. 355–367. – doi: 10.1016/S0143-8166(00)00070-1.
12. Газодинамика лазерной резки толстых стальных пластин непрерывным CO<sub>2</sub>-лазером / А.В. Зайцев, О.Б. Ковалев, А.М. Оришич, В.М. Фомин, В.Б. Шулятьев // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11, спец. вып., ч. 1. – С. 74–83.
13. Gladush G.G., Smurov I. Physics of laser material processing. – Berlin: Springer-Verlag, 2011. – 534 p. – ISBN 978-3-642-19242-5. – doi: 10.1007/978-3-642-19831-1.
14. Powell J. LIA guide to laser cutting. – 2<sup>nd</sup> ed. – Orlando: LIA Publ., 2008. – 104 p. – ISBN 978-0-912035-16-1.
15. Гольшиев А.А. Стандартизации лазерно-кислородной резки по критерию шероховатости поверхности // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 1 (70). – С. 16–21. – doi: 10.17212/1994-6309-2016-1-16-21.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3 (72), July – September 2016, Pages 15–22

### Optimal choice of the technology of thick steel sheets laser cutting

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

**Orishich A.M.**, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of Laboratory, e-mail: orishich@itam.nsc.ru

**Shulyatyev V.B.**, D.Sc. (Engineering), Senior researcher, e-mail: shulyat@rambler.ru

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

#### Abstract

Laser cutting of steel when oxygen is used as a process gas can be done by two methods. The first one is the laser-oxygen cutting, which presents the forced combustion of iron in oxygen. In this case, the laser radiation and exothermic reaction of oxidation make roughly equal contribution in the energy balance. The second method is the oxy-laser cutting when the laser beam just initiates the combustion reaction, which provides almost all energy needed for the cutting. This method is used for thick sheets.

As of today, there are no scientifically proven criteria of the choice of the cutting method for a certain sheet thickness providing the qualitative cut with the low roughness. Above all it results from the insufficient information about the mechanisms of the cut surface shape formation. Available theoretical models of the laser cutting cannot be a reliable tool to choose the optimal cutting method regarding the sheet thickness. In this paper, the problem is solved experimentally.

Generalization of a large body of experimental data enables to have the empirical dependence of the optimal cutting speed  $V_q$ , at which the roughness is minimal, on the cut sheet thickness:  $V_q = \frac{11}{0,35 + 0,02t}$ . The criterion is

proposed, the maximal sheet thickness  $t_m$  is found; above it, the high-quality laser-oxygen cutting is impossible. The value  $t_m$  is found from the condition  $V_q = V_c$ , where the critical speed  $V_c$ , at which the uncontrolled side burning begins, the cutting roughness increases, and the high-quality cutting is impossible. The measured value  $V_c$  is equal to 0,4...0,5 m/min, which correlates to  $t_m = 40...50$  mm.

The oxygen-assisted laser cutting of low-carbon and low-alloyed steels is advisable starting from the thickness of 30...40 mm. The tests of the laser-oxygen cutting of sheets of 18...50 mm showed that at the thickness of 30 and 40 mm, the oxygen-assisted laser cutting provides the cut quality not worse than the laser-oxygen cutting if the process parameters are optimal.

#### Keywords

laser cutting, CO<sub>2</sub>-laser, oxygen cutting, surface roughness, sheet thickness.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-15-22

#### References

1. Ready J.F., Farson D.F., Feeley T., eds. *LIA handbook of laser materials processing*. 1<sup>st</sup> ed. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2001. 715 p. ISBN 978-3-540-41770-5
2. Steen W.M., Mazumder J. *Laser material processing*. 4<sup>th</sup> ed. London, Springer-Verlag, 2010. 558 p. ISBN 978-1-84996-061-8. doi: 10.1007/978-1-84996-062-5
3. Prokhorov A.M., Konov V.I., Ursu I., Mikhailets I.H. *Vzaimodeistvie lazernogo izlucheniya s metallami* [Lasers-metal interactions]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 538 p.
4. Powell J., Petring D., Kumar R.V., Al-Mashikhi S.O., Kaplan A.F.H., Voisey K.T. Laser-oxygen cutting of mild steel: the thermodynamics of the oxidation reaction. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009. vol. 42, p. 015504. doi: 10.1088/0022-3727/42/1/015504
5. Dowden J., ed. *The theory of laser material processing*. 1<sup>st</sup> ed. Dordrecht, Springer Netherlands Publ., 2009. 390 p. ISBN 978-1-4020-9339-5. doi: 10.1007/978-1-4020-9340-1

6. Rajpurohit S.R., Patel D.M. Striation mechanism in laser cutting – the review. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012, vol. 2, iss. 2, pp. 457–461.
7. Petring D., Molitor T., Schneider F., Wolf N. Diagnostics, modeling and simulation: three keys towards mastering the cutting process with fiber, disk and diode lasers. *Physics Procedia*, 2012, vol. 39, pp. 186–196. doi: 10.1016/j.phpro.2012.10.029
8. Ermolaev G.V., Yudin P.V., Briand F., Zaitsev A.V., Kovalev O.B. Fundamental study of CO<sub>2</sub>- and fiber laser cutting of steel plates with high speed visualization technique. *Journal of Laser Applications*, 2014, vol. 26, p. 042004. doi: 10.2351/1.4895563
9. 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 CO<sub>2</sub> laser. *Quantum electronics*, 2004, vol. 34, no. 4, pp. 307–309. doi: 10.1070/QE2004v034n04ABEH002671
10. 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 CO<sub>2</sub> lasers under conditions of minimal roughness. *Quantum Electronics*, 2014, vol. 44, no. 10, pp. 970–974. doi: 10.1070/QE2014v044n10ABEH015412
11. O'Neill W., Gabzdyl J.T. New developments in laser-assisted oxygen cutting. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, vol. 34, iss. 4–6, pp. 355–367. doi: 10.1016/S0143-8166(00)00070-1
12. Zaitsev A.V., Kovalev O.B., Orishich A.M., Fomin V.M., Shulyat'ev V.B. Gazodinamika lazernoi rezki tol'stykh stal'nykh plastin nepreryvnym CO<sub>2</sub> lazerom [Gas dynamics of laser cutting of thick metal sheets using the CO<sub>2</sub>-laser]. *Vychislitel'nye tekhnologii – Computational Technologies*, 2006, vol. 11, special issue, pt. 1, pp. 74–83. (In Russian)
13. Gladush G.G., Smurov I. *Physics of laser material processing*. Berlin, Springer-Verlag, 2011. 534 p. ISBN 978-3-642-19242-5. doi: 10.1007/978-3-642-19831-1
14. Powell J. *LIA guide to laser cutting*. 2<sup>nd</sup> ed. Orlando, LIA Publ., 2008. 104 p. ISBN 978-0-912035-16-1
15. Golyshev A.A. Standartizatsii lazerno-kislородnoi rezki po kriteriyu sherokhovatosti poverkhnosti [Standardization of oxygen-assisted laser cutting by the surface roughness criterion]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2016, no. 1 (70), pp. 16–21. doi: 10.17212/1994-6309-2016-1-16-21

#### Article history

Received 5 May 2016

Revised 5 July 2016

Accepted 15 August 2016

# СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

*Д.А. РЫЧКОВ, канд. техн. наук, доцент  
А.С. ЯНЮШКИН, доктор техн. наук, профессор  
(БрГУ, г. Братск)*

Поступила 21 июня 2016  
Рецензирование 15 июля 2016  
Принята к печати 15 августа 2016

**Рычков Д.А.** – 665709, г. Братск, ул. Макаренко 40,  
Братский государственный университет,  
e-mail: dielektrik84@mail.ru

Экономическая эффективность является одним из основных критериев при проектировании производственного процесса. Этот критерий определяется затратами производства, включающими стоимость режущего инструмента и его подготовку к работе, затраты на заработную плату, энергию, материалы и т.п. Для различных параметров технологического процесса определяются приведенные затраты. Параметрами технологического процесса являются режимы резания, конструктивные и технологические характеристики режущего инструмента, а также свойства обрабатываемого материала. На основе расчетных данных и результатов экспериментальных исследований проведена рационализация технологических параметров с целью повышения экономической эффективности механической обработки полимерных композиционных материалов на примере фрезерования стеклотекстолита. Исследования показывают, что зависимость приведенных затрат от режимов резания имеет экстремальный характер, а положение точки минимума зависит от серийности производства. По результатам исследований разработаны рекомендации по назначению характеристик, обеспечивающих минимальные затраты производства.

**Ключевые слова:** эффективность производства, приведенные затраты, композиционный материал, режущий инструмент.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30

## Введение

Создание новых конструкционных материалов для изготовления деталей различного технического назначения является неотъемлемой частью современной промышленности, поскольку требования к изделиям в основном направлены на снижение их массы, увеличение прочности, сохранение свойств при воздействии агрессивных сред и температуры без привлечения дополнительных затрат на производство. Этим требованиям удовлетворяют полимерные композиционные материалы с наполнителями из высокопрочных волокон или тканей. Изделия из упрочненных полимеров получают пропиткой волокон или тканей полимерным связую-

щим с последующим прессованием, что требует дополнительной обработки резанием [1–6]. Однако в процессе резания инструмент быстро изнашивается и не способен обеспечить высокую эффективность обработки. Это связано с особенностями структуры и свойств полимеров с высокопрочными наполнителями, которые могут изменяться в процессе механической обработки и влиять на работоспособность режущего инструмента, производительность обработки и качество обработанной поверхности [7–14]. При этом качество обработанных поверхностей оказывается неприемлемым.

Повышение качества обработки возможно путем подбора рациональных параметров тех-



нологического процесса механической обработки и конструктивных характеристик режущего инструмента. Это требует проведения многочисленных лабораторных и теоретических исследований, которые часто экономически не выгодны для производства. Существующие рекомендации в области обработки полимеров, армированных высокопрочными компонентами, сводятся к необходимости применения в качестве режущей части твердых сплавов и сверхтвердых материалов [4, 8, 16, 17]. Однако следует учитывать специфическую геометрию инструмента, которая предполагает наличие увеличенных углов резания: переднего и заднего. Возникает проблема получения такой геометрии у режущих элементов, выполненных из высокопрочных инструментальных материалов. При затачивании инструмента с малым углом заострения традиционными методами невозможно обеспечить требуемое качество режущей кромки [15]. Одной из прогрессивных технологий обработки высокопрочных материалов является алмазное шлифование с одновременным травлением детали и правкой круга на металлической связке [18–21]. Способ позволяет добиться высокого качества режущих поверхностей и кромок инструмента, что необходимо для обеспечения эффективности производства изделий из полимерных армированных композиционных материалов.

Существующие мероприятия по рационализации параметров технологического процесса не учитывают затрат, определяющих экономическую эффективность производства [22–27]. Таким образом, актуальной проблемой является повышение эффективности технологического процесса лезвийной обработки композиционных материалов. Для решения этой проблемы необходимо разработать методику оценки приведенных затрат, учитывающую особенности конструкции инструмента, его работоспособность и режимы резания, что позволит оптимизировать производственный процесс.

### Теоретическая часть исследования

Эффективность технологического процесса обработки представлена различными критериями: качества, производительности, надежности, стабильности, экономичности и т. п. В настоя-

щем исследовании рассматривается экономическая эффективность как основной критерий при проектировании технологического процесса. При определении этого критерия необходимо выявить затраты производства. Они включают в себя затраты на режущий инструмент, основные материалы, оборудование, заработную плату рабочих, энергозатраты и прочие расходы. Значительную часть составляют затраты на режущий инструмент и его обслуживание за весь период эксплуатации. Стоит отметить, что экономически эффективно применение сборных конструкций инструментов, поскольку это повышает варьированность инструментальных материалов, а при полном износе режущих элементов достаточно заменить их новыми. При этом корпус сборного инструмента имеет определенный срок эксплуатации, который регламентируется заводом-изготовителем.

Акцентируя внимание на режущем инструменте, можно выделить затраты на обработку деталей за период от начала эксплуатации одного сборного режущего инструмента до полной его выработки:

- 1) стоимость сборного инструмента;
- 2) суммарные затраты на смену режущих элементов;
- 3) затраты на затачивание инструмента;
- 4) основная заработная плата станочника;
- 5) затраты на электроэнергию;
- 6) затраты на основной материал.

Таким образом, для каждой технологической операции изготовления детали можно рассчитать затраты производства:

$$Z = C_{\text{и}} + Z_{\text{с.э}} + Z_{\text{з.и}} + O_{\text{з.п}} + \Theta + M, \quad (1)$$

где  $C_{\text{и}}$  – стоимость инструмента, руб.;  $Z$  – суммарные затраты на обработку одним режущим инструментом, руб.;  $Z_{\text{с.э}}$  – суммарные затраты на смену режущих элементов, руб.;  $Z_{\text{з.и}}$  – затраты на затачивание режущего инструмента, руб.;  $O_{\text{з.п}}$  – основная заработная плата станочника, руб.;  $\Theta$  – затраты на электроэнергию, руб.;  $M$  – затраты на обрабатываемый материал, руб.

$$Z_{\text{с.э}} = n_{\text{р}} C_{\text{р.э}} z, \quad (2)$$

где  $n_{\text{р}}$  – число смен режущих элементов, допускаемое конструкцией корпуса сборного инстру-

мента;  $C_{p,э}$  – цена одного режущего элемента, руб.;  $z$  – число режущих элементов.

$$Z_{3,и} = t_{3,п} z \frac{C_q}{60} i n_p, \quad (3)$$

где  $t_{3,п}$  – время на заточку одного режущего элемента, мин;  $C_q$  – часовая ставка станочника, руб/ч;  $i$  – допустимое число переточек режущих элементов.

$$O_{3,п} = P \frac{C_q}{60}, \quad (4)$$

где  $P$  – ресурс режущего инструмента, мин.

В настоящем исследовании ресурс определяется временем работы режущего инструмента от начала его эксплуатации до полной выработки:

$$P = Tin_p, \quad (5)$$

где  $T$  – период технологической стойкости режущего инструмента, мин.

Затраты на электроэнергию рассчитываются исходя из энергозатрат за весь ресурс режущего инструмента, причем средняя мощность резания рассчитывается эмпирически на основе трех и более испытаний при обработке детали на исследуемом оборудовании.

$$\Xi = NPC_э, \quad (6)$$

где  $N$  – средняя мощность резания при обработке исследуемым инструментом, кВт;  $C_э$  – стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч.

$$M = Q_p \cdot C_m \cdot 10^{-9}, \quad (7)$$

где  $Q$  – объем материала, снятый за ресурс режущего инструмента, мм<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $C_m$  – стоимость одного килограмма обрабатываемого материала, руб/кг.

Подставив выражения (2)–(7) в формулу (1) получим:

$$Z = C_{и} + n_p C_{p,э} z + t_{3,п} z C_q i n_p / 60 + Tin_p C_q / 60 + N Tin_p C_э + Q_p \cdot C_m \cdot 10^{-9}. \quad (8)$$

Для оптимизации технологического процесса используется удельная величина затрат производства, приведенная к объему материала, снятого за ресурс режущего инструмента:

$$ПЗ = \frac{Z}{Q}; \quad (9)$$

$$Q = RP = Tin_p П, \quad (10)$$

где  $П$  – производительность непрерывной обработки, мм<sup>3</sup>/мин.

Подставив выражения (8), (10) в формулу (9), получим:

$$ПЗ = \frac{C_{и} + n_p C_{p,э} z + t_{3,п} z C_q i n_p / 60}{Tin_p П} + \frac{C_q / 60 + NC_э}{П} + \rho C_m \cdot 10^{-9}. \quad (11)$$

Первое слагаемое в формуле характеризует затраты на режущий инструмент, второе – стоимость труда рабочего и энергозатрат, а третье – стоимость основных материалов.

В формуле (11) зависимость приведенных затрат от режимов резания выражена неявно. Для установления функциональной связи в явном виде выразим производительность непрерывной обработки и период стойкости режущего инструмента через режимы резания.

Производительность непрерывной обработки при фрезеровании определяется по формуле

$$П = \frac{ltb}{T + t_b} = \frac{TS_z z ntb}{T + t_b}, \quad (12)$$

где  $l$  – длина пути, пройденного режущим инструментом за период стойкости, мм;  $t$  – глубина фрезерования, мм;  $b$  – ширина фрезерования, мм;  $t_b$  – вспомогательное время, затрачиваемое на смену изношенного режущего инструмента и подналадку станка, мин;  $S_z$  – подача на зуб фрезы, мм/зуб;  $z$  – число зубьев фрезы;  $n$  – частота вращения шпинделя станка, мин<sup>-1</sup>.

С увеличением серийности производства применяются различные приспособления и средства автоматизации, сокращающие вспомогательное время. Так, для единичного производства время  $t_b$  будет максимальным, а для массового производства – минимальным.

Период стойкости режущего инструмента  $T$  определяется некоторой функцией, которая может быть получена в результате экспериментальных исследований.

При варьировании параметров технологического процесса изменяется расчетное значение приведенных затрат, которое должно быть минимальным для оптимальных условий производства.

## Результаты и обсуждение

Для рационализации режимов резания композиционных материалов с целью повышения экономической эффективности производства проведены лабораторные исследования технологического периода стойкости при фрезеровании стеклотекстолита разными инструментальными материалами. В результате были получены математические модели:

для ВК8:

$$T = 0,82 \cdot S_z^{4,75+2,94 \ln S_z + 2,38 \ln t} \cdot t^{0,46+1,13 \ln t}; \quad (13)$$

для ВК15:

$$T = 0,66 \cdot S_z^{2,08+1,11 \ln S_z + 3,02 \ln t} \cdot t^{2,54+0,65 \ln t}; \quad (14)$$

для ВК3М:

$$T = 0,64 \cdot S_z^{3,49+2,42 \ln S_z + 3,44 \ln t} \cdot t^{2,05+1,04 \ln t}. \quad (15)$$

На основе расчетных и экспериментальных данных получены графики зависимости при-

веденных затрат от режимов резания (рис. 1, 2). Увеличение подачи на зуб при постоянной глубине резания (рис. 1) приводит к равномерному росту приведенных затрат до подачи на зуб порядка 0,25 мм/зуб с последующим резким увеличением. С увеличением серийности производства зависимости принимают более равномерный характер.

В то же время зависимость приведенных затрат от глубины резания имеет экстремальный характер (рис. 2). При повышении серийности производства точка минимума приведенных затрат смещается в сторону увеличения глубины резания. Кроме того, положение точки минимума смещается в зависимости от применяемого инструментального материала. Так, при единичном производстве для твердого сплава ВК3М приведенные затраты будут минимальными при глубине резания 1,5 мм, для сплава ВК8 – 1,2 мм, для сплава ВК15 – 1,0 мм.

Экстремальный характер зависимостей связан с уменьшением технологического периода

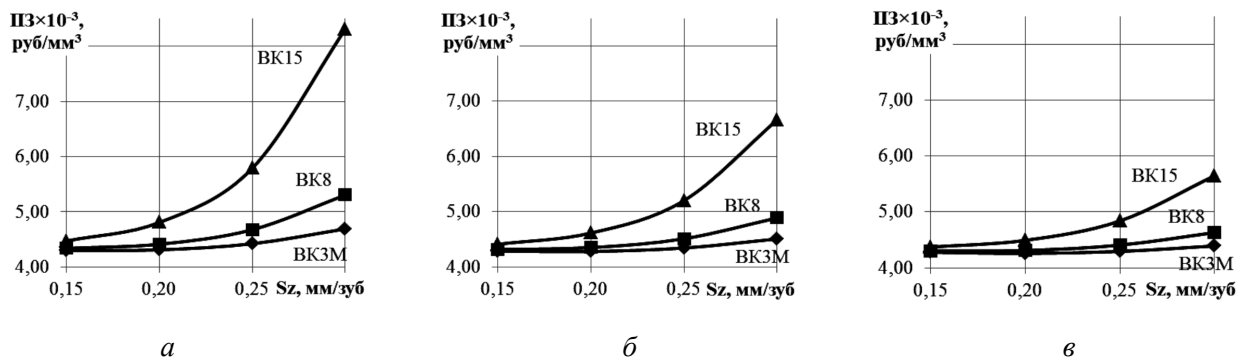


Рис. 1. Зависимость приведенных затрат от подачи на зуб  $S_z$  при глубине резания  $t = 1,0$  мм для типов производства:

*а* – единичного; *б* – серийного; *в* – массового

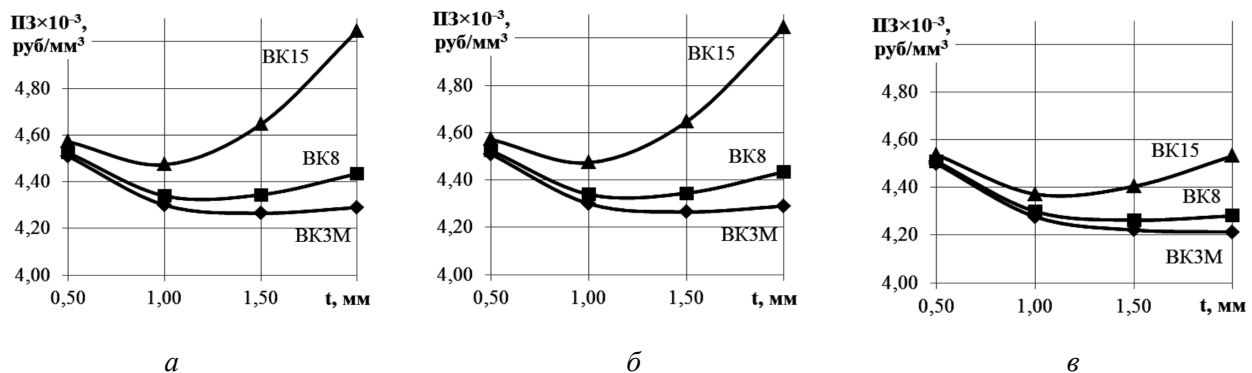


Рис. 2. Зависимость приведенных затрат от глубины резания  $t$  при подаче на зуб  $S_z = 0,15$  мм/зуб для типов производства:

*а* – единичного; *б* – серийного; *в* – массового



стойкости режущего инструмента и увеличением частоты его смены при интенсификации режимов резания. При серийном и массовом типах производства увеличение подачи на зуб и глубины резания обеспечивает рост производительности непрерывной обработки и снижение приведенных затрат, поскольку сокращается время на смену режущего инструмента.

### Выводы

По результатам исследований можно сделать следующие выводы и рекомендации.

1. Разработана методика определения приведенных затрат, позволяющая оптимизировать технологические параметры процесса обработки композиционных материалов и повысить эффективность производства.

2. Получены математические зависимости периода стойкости режущего инструмента от режимов резания, позволяющие прогнозировать характер обработки композиционных материалов.

3. Для снижения затрат рекомендуется применять твердые сплавы с повышенной прочностью и твердостью, например, твердый сплав марки ВКЗМ либо ВК8.

4. Разработаны рекомендации по назначению режимов резания, обеспечивающих минимальные затраты для типов производства:

– единичного:

$$S_z = 0,15 \dots 0,16 \text{ мм/зуб}, t = 1,0 \dots 1,2 \text{ мм};$$

– серийного:

$$S_z = 0,17 \dots 0,20 \text{ мм/зуб}, t = 1,2 \dots 1,5 \text{ мм};$$

– массового:

$$S_z = 0,20 \dots 0,25 \text{ мм/зуб}, t = 1,4 \dots 2,0 \text{ мм}.$$

### Список литературы

1. *Matthews F.L., Rawlings R.D.* Composite materials: engineering and science. – Oxford: The Alden Press, 1999. – 480 p. – ISBN 978-1-8557-3473-9.

2. *Мордвин М.А., Якимов С.В., Баклушин С.М.* Рекомендации по механической обработке композиционных материалов // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2010. – № 2. – С. 26–29.

3. Composite materials based on wastes of flat glass processing / A.V. Gorokhovskiy, J.I. Escalante-Garcia, G.Yu. Gashnikova, L.P. Nikulina, S.E. Artemenko // Waste Management. – 2005. – Vol. 25, iss. 7. – P. 733–736. – doi: 10.1016/j.wasman.2004.11.007.

4. *Chung D.D.L.* Composite materials: functional materials for modern technologies. – London: Springer-Verlag, 2004. – 293 p. – ISBN 978-1-4471-3734-0. – doi: 10.1007/978-1-4471-3732-0.

5. *Grigoriev S.N., Krasnovskii A.N., Kvachev K.V.* Investigation of impregnation fibrous materials in pultrusion process of polymer composite materials // International Polymer Science and Technology. – 2014. – Vol. 41, iss. 7. – P. 59–62.

6. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites / V. Dhand, G. Mittal, K.Y. Rhee, S.-J. Park, D. Hui // Composites Part B: Engineering. – 2015. – Vol. 73. – P. 166–180. – doi: 10.1016/j.compositesb.2014.12.011.

7. *Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V.* Surface quality of the fiberglass composite material after milling // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 183–187. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.183.

8. *Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A.* Automation tool preparation in the conditions of production // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 770. – P. 739–743. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.739.

9. *Matis I.G.* Methods and means of inspecting the quality of composite materials // Russian Journal of Non-destructive Testing. – 1991. – Vol. 27, iss. 4. – P. 277–285.

10. Study of cutting fiber-reinforced composites by using abrasive water-jet with cutting head oscillation / E. Lemma, L. Chen, E. Siores, J. Wang // Composite Structures. – 2002. – Vol. 57, iss. 1–4. – P. 297–303. – doi: 10.1016/S0263-8223(02)00097-1.

11. *Zaykin Y.A., Koztaeva U.P.* Radiation-induced processes and internal friction in polymer-based composite materials // Radiation Physics and Chemistry. – 2000. – Vol. 58, iss. 4. – P. 387–395. – doi: 10.1016/S0969-806X(99)00517-4.

12. *Bakulin V.N., Larin A.A., Reznichenko V.I.* Improving the quality of manufacture of polymer-composite products using computed tomography as a non-destructive-testing method // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88, iss. 2. – P. 556–560. – doi: 10.1007/s10891-015-1221-7.

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

14. Perspective of high energy heating implementation for steel surface saturation with carbon / N.V. Plotnikova, A.A. Losinskaya, V.Yu. Skeebeba, E. Nikitenko // Applied Mechanics and Materials. – 2015. –

Vol. 698. – P. 351–354. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.351.

15. Формирование режущей кромки фрезерного инструмента для обработки слоистых композиционных материалов, армированных стеклянными волокнами / Д.А. Рычков, В.А. Скрипняк, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2 (22). – С. 42–46.

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

17. Экспериментальные исследования фрезерования композиционных материалов / А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.В. Гайст, С.А. Катаева // Инновации в машиностроении (ИнМаш–2015): VII Международная научно-практическая конференция: сборник трудов / Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева и др.; под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово, 2015. – С. 99–104.

18. Yanyushkin A.S., Saprykina N.A., Medvedeva O.I. Mechanism of protective membrane formation on the surface of metal-bonded diamond disks // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 327–331. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.327.

19. Contact processes in grinding / A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, V.V. Ivancivsky // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 17–21. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17.

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

21. Шлифовальный инструмент на основе силикокарбида титана / Г.И. Смагин, В.Н. Филимоненко,

Н.Д. Яковлев, М.А. Корчагин, В.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 1. – С. 27–30.

22. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Повышение производительности фрезерования на основе автоматизации проектирования сборного инструмента // Системы. Методы. Технологии. – 2011. – № 10. – С. 91–94.

23. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Зуб Н.П. Методика назначения режимов обработки, обеспечивающих рациональное распределение остаточных напряжений при поверхностной закалке ВЭН ТВЧ // Научный вестник НГТУ. – 2008. – № 3 (32). – С. 83–94.

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

25. Повышение эффективности обработки высокопрочных композиционных материалов / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, Н.П. Петров, Д.А. Рычков // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2013. – Т. 1. – С. 146–149.

26. Inverse algorithm for optimal processing of composite materials / J.L. Bailleul, V. Sobotka, D. Delaunay, Y. Jarny // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2003. – Vol. 34, iss. 8. – P. 695–708. – doi: 10.1016/S1359-835X(03)00141-6.

27. Fomin V.N., Malyukova E.B., Berlin A.I. Criteria for optimization of processing and fabrication of polymer composite materials // Doklady Chemistry. – 2004. – Vol. 394, iss. 4. – P. 39–41. – doi: 10.1023/B:DOCH.0000017274.33223.c8.

## OBRAHOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3 (72), July – September 2016, Pages 23–30

### Method for improving the efficiency of products from polymer composites

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

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

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

#### Abstract

Improving the quality of treatment is possible by selecting rational parameters of the process of machining and design characteristics of the cutting tool. However, this requires a lot of laboratory and theoretical studies, which

often is not of economic benefit to produce. An important problem is to increase the process efficiency of the blade machining of composite materials. To solve this problem, it is necessary to develop a methodology for performance measurement that takes into account design features of the instrument, its efficiency and cutting conditions that allow optimizing the production process. Economic efficiency is one of the main criteria in the design of a technological parts processing. To determine this criterion the main production expenses, including the cost of the cutting tool, the cost of its training, workers' wages, energy and materials costs are identified. The values of the resulted expenses for different parameters of the technological process are obtained. The parameters of the process are the cutting conditions, structural and technological characteristics of cutting tools, as well as the properties of the material being processed. On the basis of the calculated data and experimental research carried out rationalization of the process parameters in order to increase economic efficiency machining of polymeric composite materials on the example of milling fiberglass. Research found that the dependence of the resulted expenses of the cutting conditions is an extreme character, where the minimum point shifted upward cutting conditions by increasing production. According to the research the technique of determining the reduced costs, derived mathematical relations tool life of the cutting tool of the cutting conditions is developed and recommendations on the appointment process parameters, ensuring minimal production costs, are drawn up.

### Keywords

economic efficiency, resulted expenses, composite material, cutting tool.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30

### References

1. Matthews F.L., Rawlings R.D. *Composite materials: engineering and science*. 1<sup>st</sup> ed. Oxford, The Alden Press, 1999. 480 p. ISBN 978-1-8557-3473-9
2. Mordvin M.A., Yakimov S.V., Baklushin S.M. Rekomendatsii po mekhanicheskoi obrabotke kompozitsionnykh materialov [Recommendations for the machining of composite materials]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Izhevsk State Technical University*, 2010, no. 2, pp. 26–29.
3. Gorokhovskiy A.V., Escalante-Garcia J.I., Gashnikova G.Yu., Nikulina L.P., Artemenko S.E. Composite materials based on wastes of flat glass processing. *Waste Management*, 2005, vol. 25, iss. 7, pp. 733–736. doi: 10.1016/j.wasman.2004.11.007
4. Chung D.D.L. *Composite materials: functional materials for modern technologies*. 2<sup>nd</sup> ed. London, Springer-Verlag, 2004. 293 p. ISBN 978-1-4471-3734-0. doi: 10.1007/978-1-4471-3732-0
5. Grigoriev S.N., Krasnovskii A.N., Kvachev K.V. Investigation of impregnation fibrous materials in pultrusion process of polymer composite materials. *International Polymer Science and Technology*, 2014, vol. 41, iss. 7, pp. 59–62.
6. Dhand V., Mittal G., Rhee K.Y., Park S.-J., Hui D. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 2015, vol. 73, pp. 166–180. doi: 10.1016/j.compositesb.2014.12.011
7. Yuanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V. Surface quality of the fiberglass composite material after milling. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 183–187. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.183
8. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A. Automation tool preparation in the conditions of production. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 770, pp. 739–743. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.739
9. Matis I.G. Methods and means of inspecting the quality of composite materials. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1991, vol. 27, iss. 4, pp. 277–285.
10. Lemma E., Chen L., Siores E., Wang J. Study of cutting fiber-reinforced composites by using abrasive water-jet with cutting head oscillation. *Composite Structures*, 2002, vol. 57, iss. 1–4, pp. 297–303. doi: 10.1016/S0263-8223(02)00097-1
11. Zaykin Yu.A., Koztaeva U.P. Radiation-induced processes and internal friction in polymer-based composite materials. *Radiation Physics and Chemistry*, 2000, vol. 58, iss. 4, pp. 387–395. doi: 10.1016/S0969-806X(99)00517-4
12. Bakulin V.N., Larin A.A., Reznichenko V.I. Improving the quality of manufacture of polymer-composite products using computed tomography as a nondestructive-testing method. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, iss. 2, pp. 556–560. doi: 10.1007/s10891-015-1221-7
13. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Zhigulev A.K., Skeebe P.Yu. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “diamond smoothing”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 125, p. 012031. doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012031



14. Plotnikova N.V., Losinskaya A.A., Skeebe V.Yu., Nikitenko E. Perspective of high energy heating implementation for steel surface saturation with carbon. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 351–354. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.351
15. Rychkov D.A., Skripnyak V.A., Yanyushkin A.S., Lobanov D.V. Formirovanie rezhushchei kromki frezer-nogo instrumenta dlya obrabotki sloistyykh kompozitsionnykh materialov, armirovannykh steklyannymi voloknami [Formation of the cutting edge of the milling tool for machining laminated composite materials reinforced with glass fibers]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 2 (22), pp. 42–46.
16. Markov A.M. Tekhnologicheskie osobennosti mekhanicheskoi obrabotki detalei iz kompozitsionnykh materialov [Technological features of machining of parts from composite materials]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii – Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2014, no. 7 (37), pp. 3–8.
17. Markov A.M., Cherdantsev P.O., Gaist S.V., Kataeva S.A. [Experimental studies milling of composite materials]. *Innovatsii v mashinostroenii (InMash–2015): VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: sbornik trudov* [Innovations in mechanical engineering: VII International scientific and practical conference: Materials]. Kemerovo, 2015, pp. 99–104. (In Russian)
18. Yanyushkin A.S., Saprykina N.A., Medvedeva O.I. Mechanism of protective membrane formation on the surface of metal-bonded diamond disks. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 327–331. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.327
19. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Ivancivsky V.V. Contact processes in grinding. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 17–21. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17
20. Popov V.Y., Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., Skeebe V.Y. Kontaktnye protsessy pri almaznoi obrabotke instrumental'nykh materialov [Contact processes in diamond processing of tool materials]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 3 (23), pp. 68–74.
21. Smagin G.I., Filimonenko V.N., Yakovlev N.D., Korchagin M.A., Skeebe V.Yu. Shlifoval'nyi instrument na osnove silikokarbida titana [The grinding tool on the basis of silicon carbide, titanium]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 1, pp. 27–30.
22. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A. Povyschenie proizvoditel'nosti frezerovaniya na osnove avtomatizatsii proektirovaniya sbornogo instrumenta [Production efficiency in the process of modular milling tool automated design]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2011, no. 10, pp. 91–94.
23. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu., Zub N.P. Metodika naznacheniya rezhimov obrabotki, obespechivayushchikh ratsional'noe raspredelenie ostatochnykh napryazhenii pri poverkhnostnoi zakalke VEN TVCh [Designation of the treatment processing conditions methodology ensuring rational allocation of residual stresses at surface hardening by high-energy heating by currents of high frequency]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2008, no. 3 (32), pp. 83–94.
24. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Kutyskin A.V., Parts K.A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126, pp. 012016. doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016
25. Yanyushkin A.S., Popov V.Yu., Petrov N.P., Rychkov D.A. [Improved processing of high strength composite materials]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences], 2013, vol. 1. pp. 146–149. (In Russian)
26. Bailleul J.L., Sobotka V., Delaunay D., Jarny Y. Inverse algorithm for optimal processing of composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, vol. 34, iss. 8, pp. 695–708. doi: 10.1016/S1359-835X(03)00141-6
27. Fomin V.N., Malyukova E.B., Berlin A.I. Criteria for optimization of processing and fabrication of polymer composite materials. *Doklady Chemistry*, 2004, vol. 394, iss. 4, pp. 39–41. doi: 10.1023/B:DOCH.0000017274.33223.c8

#### Article history

Received 21 June 2016

Revised 15 July 2016

Accepted 15 August 2016

# ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ ТОНКИХ ПЛАСТИН РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ\*

*Е.А. ЛОЖКИНА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент  
В.С. ЛОЖКИН<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент  
В.И. МАЛИ<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук, в.н.с.  
М.А. ЕСИКОВ<sup>2</sup>, м.н.с.  
(<sup>1</sup>НГТУ, г. Новосибирск,  
<sup>2</sup> ИГиЛ СО РАН, г. Новосибирск)*

Поступила 1 июля 2016

Рецензирование 18 июля 2016

Принята к печати 15 августа 2016

**Ложкина Е.А.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: helens\_case@ngs.ru

Методом сварки взрывом получены три типа металлических слоистых композиционных материалов, состоящих из чередующихся пластин прочных и пластичных сталей. С целью повышения показателей конструктивной прочности полученных материалов была проведена термическая обработка сварных пакетов. Композиции, содержащие мартенситно-старееющую сталь Н18К9М5Т, были подвергнуты искусственному старению в течение трех часов при температуре 490 °С. Композиции, содержащие инструментальную штамповую сталь 5ХВ2С, были подвергнуты закалке в масло при 880 °С с последующим отпуском при 550 °С. Механические свойства материалов определяются их структурой. Проведенные статические и динамические механические испытания подтвердили положительное влияние термической обработки на свойства полученных в работе металлических слоистых композиционных материалов несмотря на формирование в структуре диффузионных зон.

**Ключевые слова:** мартенситно-старееющая сталь, углеродистая сталь, хромоникелевая нержавеющая сталь, сварка взрывом, слоистые материалы, термическая обработка.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-31-40

## Введение

Одной из актуальных задач современного материаловедения является повышение прочностных свойств материалов при сохранении их высокой надежности [1–2]. Наиболее распространенными способами повышения показателей конструктивной прочности металлических

материалов в промышленном производстве являются термическая (ТО) [3], термопластическая (ТПО) [4], химико-термическая (ХТО) [5] обработки. Постепенно эти традиционные технологии исчерпывают свой потенциал. Решить возникшую проблему может внедрение в производство композиционных материалов различного типа. Особое место среди них занимают

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

металлические слоистые композиционные материалы (МСКМ). Способы их получения весьма разнообразны: диффузионная сварка [6–7], реакционное спекание фольг [8–9], сварка прокаткой [10–11], сварка взрывом [12–13] и др. Основное требование к таким материалам – бездефектная структура на границе соединяемых материалов. Наименее исследованным, но наиболее перспективным способом получения МСКМ является сварка взрывом. Внешне она очень проста, а по своей физической сущности очень сложна и затрагивает многие фундаментальные понятия наук о материалах. Соединение при сварке взрывом происходит без расплавления металла, диффузионных процессов, а получаемые сварные соединения отличаются исключительно высокой прочностью даже при сварке «несовместимых» металлов. Способ позволяет получать равнопрочные соединения многих пар металлов и сплавов практически на неограниченных площадях [14–16].

В данной работе для получения слоистых композиций из разнородных сталей была использована технология сварки взрывом с последующей термической обработкой сварных пакетов.

### Материалы и методы исследования

Для изучения влияния термической обработки на свойства и структуру металлических слоистых композиционных материалов методом сварки взрывом из чередующихся металличе-

ских пластин были сформированы тринадцатислойные пакеты трех типов:

- 1) «сталь 12Х18Н10Т – сталь 5ХВ2С»;
- 2) «сталь 12Х18Н10Т – сталь Н18К9М5Т»;
- 3) «сталь Н18К9М5Т – сталь 20».

Исходными материалами послужили термически обработанные пластины из хромоникелевой аустенитной стали 12Х18Н10Т, инструментальной штамповой стали 5ХВ2С, конструкционной углеродистой стали 20 и мартенситно-старееющей стали Н18К9М5Т (табл. 1).

Предварительная термическая обработка (табл. 2) необходима для повышения пластичности материала исходных пластин путем формирования в нем однородной равновесной структуры.

При сварке разнородных материалов наиболее рациональными являются схемы с одним или двумя симметрично расположенными зарядами взрывчатых веществ. Симметричная схема имеет преимущества по сравнению с плоскопараллельной, поскольку в первом случае из технологического процесса исключаются дополнительные трудоемкие операции промежуточной правки заготовки и ее термической обработки (для снятия наклепа). Однако в случае соединения заготовок большой площади рационально использование схемы с одним зарядом взрывчатого вещества. Небольшой размер исходных заготовок (110 × 60 × 1 мм) позволил использовать в качестве метода соединения сварку взрывом по симметричной угловой схе-

Таблица 1

**Элементный состав исходных материалов**

| Сталь     | Массовая доля элемента, % |      |      |       |       |       |       |      |      |      |      |       |      |
|-----------|---------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|------|
|           | C                         | Mn   | Si   | P     | S     | Ni    | Cr    | Mo   | Ti   | Co   | Cu   | As    | W    |
| Н18К9М5Т  | 0,02                      | 0,01 | 0,04 | 0,004 | 0,007 | 17,23 | 0,01  | 4,28 | 0,77 | 0,18 | –    | –     | –    |
| 12Х18Н10Т | 0,11                      | 0,73 | 0,55 | 0,05  | 0,01  | 9,18  | 17,82 | –    | 0,54 | –    | –    | –     | –    |
| 20        | 0,17                      | 0,47 | 0,02 | 0,01  | 0,02  | 0,03  | 0,01  | –    | –    | –    | 0,02 | 0,002 | –    |
| 5ХВ2С     | 0,30                      | 0,29 | 0,66 | 0,04  | 0,02  | –     | 1,27  | 0,01 | –    | –    | –    | –     | 2,16 |

Таблица 2

**Режимы термической обработки стальных заготовок**

| Материал  | Вид термической обработки | Температура нагрева, °С | Среда охлаждения |
|-----------|---------------------------|-------------------------|------------------|
| Н18К9М5Т  | Закалка                   | 820                     | Воздух           |
| 12Х18Н10Т | Закалка                   | 1100                    | Вода             |
| 20        | Отжиг                     | 920                     | Вакуум           |
| 5ХВ2С     | Отжиг                     | 1000                    | Воздух           |

ме. Процесс сварки осуществляли во взрывной камере в Институте гидродинамики имени Лаврентьева СО РАН.

Термическая обработка сварных пакетов осуществилась в высокотемпературных лабораторных электропечах *SNOL 30/1300* по режимам, представленным в табл. 3.

Сваренные взрывом и термически обработанные композиты типа «сталь 12X18H10T – сталь 5XB2C», «сталь H18K9M5T – сталь 12X18H10T» и «сталь H18K9M5T – сталь 20» изучались методами оптической микроскопии (микроскопы *Carl Zeiss AXIO Observer A1* и *Carl Zeiss AXIO Observer Z1m*), растровой электронной микроскопии (микроскоп *Carl Zeiss EVO 50 XVP*). Металлографические шлифы готовили по

стандартной технологии, основанной на механическом шлифовании и полировании анализируемого материала. Для выявления микроструктуры мартенситно-стареющей, инструментальной штамповой и конструкционной углеродистой сталей использовали 5%-й спиртовой раствор азотной кислоты, а для хромоникелевой стали – электролитическое травление в 60 %-м водном растворе азотной кислоты при плотности тока  $10 \text{ A/cm}^2$  [17].

Прочностные свойства многослойных материалов в условиях одноосного растяжения определяли на установке *Instron 3369*, работу разрушения на маятниковом копре *Metrocom*. Для измерения микротвердости использовали прибор *Wolpert Group 402 MVD*.

Таблица 3

Режимы термической обработки сварных пакетов

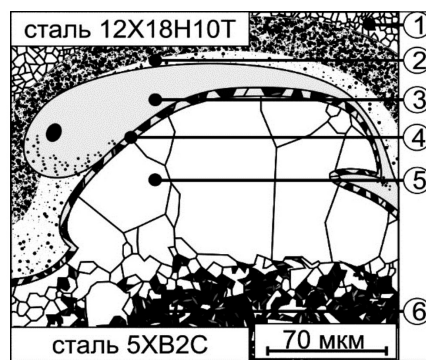
| Сварной пакет                      | Вид термической обработки | Температура нагрева, °С | Время выдержки при заданных температурах, ч | Среда охлаждения |
|------------------------------------|---------------------------|-------------------------|---|------------------|
| «Сталь 12X18H10T – сталь 5XB2C»    | Закалка                   | 880                     | 0,5   | Масло            |
|                                    | Отпуск                    | 550                     | 3   | Воздух           |
| «Сталь 12X18H10T – сталь H18K9M5T» | Старение                  | 490                     | 3   | Воздух           |
| «Сталь H18K9M5T – сталь 20»        | Старение                  | 490                     | 3   | Воздух           |

### Результаты исследований и их обсуждение

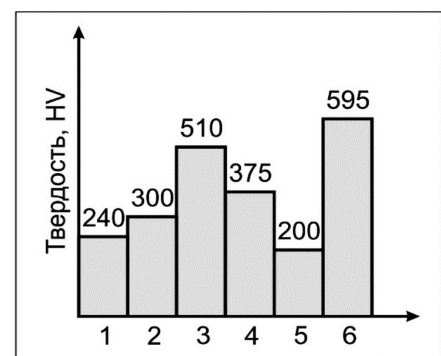
Термическая обработка сваренных взрывом композиционных материалов существенно влияет на их структуру и позволяет дополнительно повысить механические свойства. Наиболее ярко выраженные структурные изменения, вызванные термической обработкой, были зафиксированы в сварных пакетах «сталь 12X18H10T – сталь 5XB2C».

В ходе термической обработки слоистой композиции «сталь 12X18H10T – сталь 5XB2C» происходит диффузия углерода из поверхностных слоев инструментальной штамповой стали 5XB2C, в результате чего в последней формируется слой, обеднен-

ный углеродом (рис. 1, зона 5; рис. 2, фото 5). Концентрация углерода в наружных слоях хромоникелевой аустенитной стали (рис. 1, зона 2; рис. 2, фото 2) наоборот увеличивается. В исходном состоянии углерод в ней был связан в карбиды титана (TiC) благодаря стабилизации  $\gamma$ -фазы титаном. После насыщения поверхностных



а



б

Рис. 1. Схема строения зон, образовавшихся в результате термической обработки сварных пакетов типа «сталь 12X18H10T – сталь 5XB2C» (а) и твердость различных зон термически обработанных композиций, зафиксированная методом наноиндентирования (б)

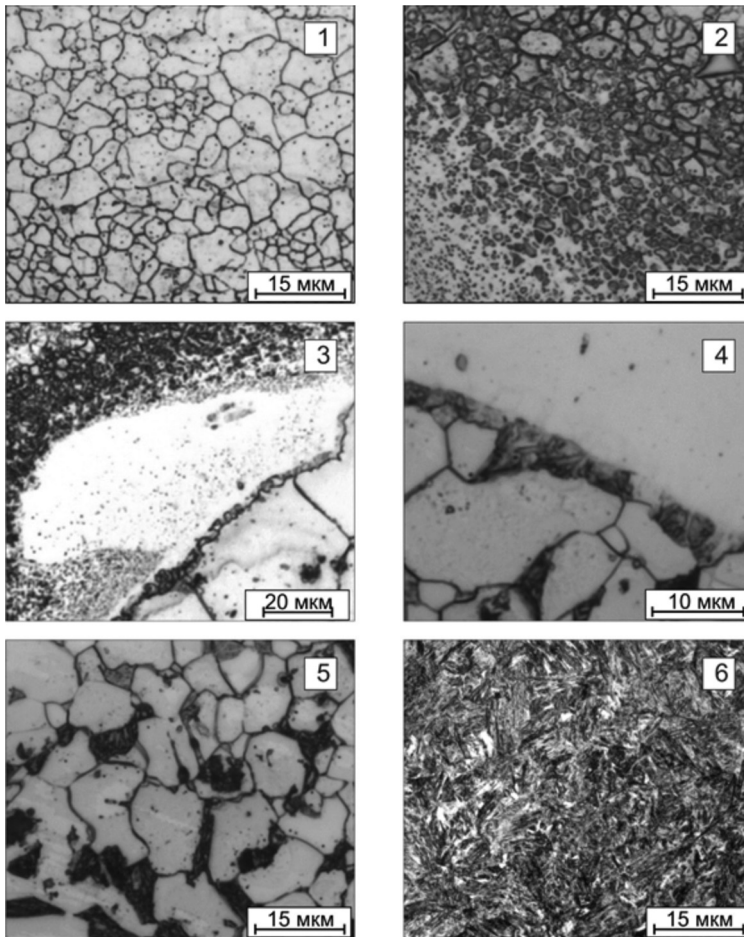


Рис. 2. Структура зон, сформированных в результате термической обработки слоистого композита, состоящего из чередующихся пластин инструментальной штамповой стали 5XB2C и аустенитной хромоникелевой стали 12X18H10T:

1 – исходный аустенит стали 12X18H10T; 2 – упрочненный карбидными частицами аустенит стали 12X18H10T; 3 – вихревые зоны; 4 – промежуточный слой, состоящий из остаточного аустенита и пакетов мартенсита; 5 – участок стали 5XB2C, обедненный углеродом; 6 – мартенсит стали 5XB2C

слоев стали 12X18H10T углеродом содержащегося в ней титана становится недостаточно для стабилизации  $\gamma$ -фазы и избыточный углерод вступает в реакцию с металлами, формируя карбиды, обогащенные хромом ( $M_{23}C_6$ ), что повышает твердость материала до  $\sim 300$  HV (рис. 1, зона 2; рис. 2, фото 2). Глубина такого упрочненного карбидами слоя колеблется в диапазоне от 55 до 200 мкм.

В результате диффузии хрома и никеля из аустенитной стали 12X18H10T в инструментальную сталь 5XB2C концентрация легирующих элементов в последней возраста-

ет, что приводит к смещению точек начала и конца мартенситного превращения в область более низких температур. Формирование мартенситной структуры происходит в результате охлаждения холодными слоями окружающего металла. Незавершенность же процесса мартенситного превращения объясняет присутствие в анализируемой области повышенного количества остаточного аустенита. Таким образом, граница между соединенными пластинами разнородных сталей характеризуется наличием тонкого ( $\sim 3 \dots 5$  мкм) слоя, состоящего из аустенита и беспорядочно расположенных в нем пакетов мартенсита (рис. 1, зона 4; рис. 2, фото 4).

Внутренние слои сталей 12X18H10T и 5XB2C не претерпевают существенных структурных изменений и состоят из аустенита (рис. 1, зона 1; рис. 2, фото 1) и мартенсита (рис. 1, зона 6; рис. 2, фото 6).

Для исследования влияния структурных изменений на механические свойства сварных композиций были проведены испытания слоистых образцов на ударную вязкость (рис. 3, а). Ударная вязкость сварной композиции после термической обработки возросла в полтора раза по сравнению с термически необработанной композицией (с 800 до 1200 кДж/м<sup>2</sup>). Объясняется это релаксационными процессами, протекающими в ходе термической обработки в хромоникелевой стали, а также особенностями разрушения инструментальной стали

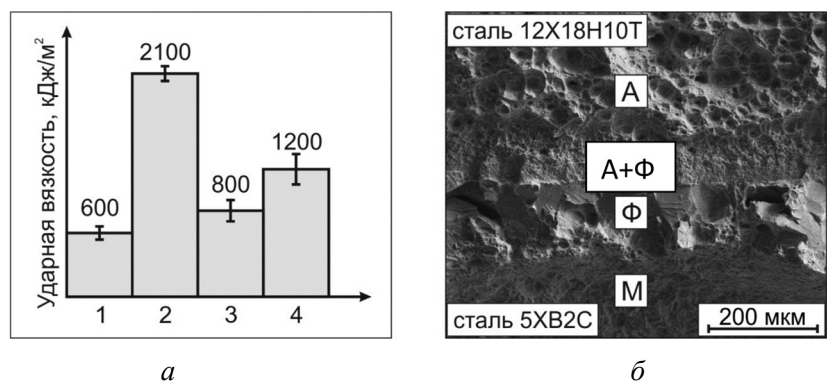


Рис. 3. Результаты испытаний материалов на ударную вязкость: 1 – сталь 5XB2C; 2 – сталь 12X18H10T; 3 – композиция «сталь 5XB2C – сталь 12X18H10T»; 4 – композиция «сталь 5XB2C – сталь 12X18H10T» после термической обработки (а); фрактограмма излома термически обработанной композиции «сталь 5XB2C – сталь 12X18H10T», полученного в условиях динамического нагружения: А – аустенит; Ф – феррит; М – мартенсит (б)

(рис. 3, б). Нагрев аустенитной стали до 550 °С активирует процессы полигонизации, сопровождающиеся снижением плотности дислокаций, их перераспределением и образованием границ субзеренного типа. Это приводит к снижению твердости и прочности, а также к увеличению вязкости материала.

Термическая обработка сваренной взрывом композиции «сталь 12Х18Н10Т – сталь 5ХВ2С» оказывает влияние на характер разрушения обеих сталей. «Ямки» на поверхности разрушения слоев аустенитной стали в термически обработанной композиции становятся менее глубокими (рис. 3, б) по сравнению со слоями аустенитной стали без термической обработки. Мартенсит, сформированный в инструментальной стали, разрушается по вязкому механизму, а феррит, наоборот, характеризуется хрупким механизмом разрушения (рис. 3, б). Подобное явление было зафиксировано при разрушении двухфазных феррито-мартенситных сталей [18]. Затруднение пластической релаксации в феррите приводит к тому, что эта фаза не тормозит процесс зарождения и распространения трещины, а наоборот способствует возникновению трещин по механизму скола. Так как объемная доля феррита невелика, то более вязкой фазой является граничащий с ней мартенсит.

Область между разнородными сталями, представляющая собой остаточный аустенит с пакетами мартенсита, разрушается с образованием излома смешанного типа (рис. 3, б).

Существенных структурных изменений при термической обработке сварных пакетов «сталь 12Х18Н10Т – сталь Н18К9М5Т» и «сталь Н18К9М5Т – сталь 20» выявлено не было, в связи с чем особое внимание было уделено анализу их механических свойств.

Термическая обработка сварной композиции «сталь 12Х18Н10Т – сталь Н18К9М5Т» (см. табл. 3) приводит к существенному увеличению микротвердости мартенситно-старееющей стали (от 400 до 750 HV) (рис. 4). Наблюдаемый рост микротвердости обусловлен выделением в процессе термической обработки упрочняющих мелкодисперсных интерметаллидных фаз Ni<sub>3</sub>Ti и Fe<sub>2</sub>Mo [19]. Следует подчеркнуть, что микротвердость мартенситно-старееющей стали в тер-

мически обработанной многослойной композиции превышает значения, зафиксированные при анализе пластин Н18К9М5Т, подвергнутых аналогичной термической обработке (рис. 4).

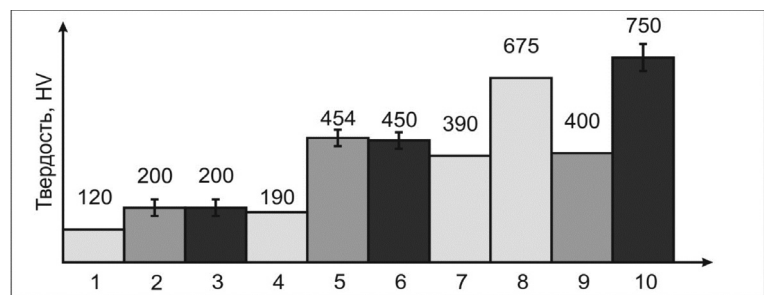


Рис. 4. Микротвердость слоистых композиций и исходных материалов, входящих в их состав:

1 – сталь 20 после отжига; 2 – сталь 20 после сварки; 3 – сталь 20 после сварки и термической обработки; 4 – сталь 12Х18Н10Т после закалки; 5 – сталь 12Х18Н10Т после сварки; 6 – сталь 12Х18Н10Т после сварки и термической обработки; 7 – сталь Н18К9М5Т после закалки; 8 – сталь Н18К9М5Т после ТО; 9 – сталь Н18К9М5Т после сварки; 10 – сталь Н18К9М5Т после сварки и ТО

Экспериментально установлено, что влияние процесса деформации и термической обработки на характер упрочнения сталей резко различается. Результаты измерения микротвердости на центральных участках пластин свидетельствуют о том, что сталь 12Х18Н10Т существенно упрочняется при сварке взрывом (с 190 до 454 HV), а при нагреве до 490 °С и выдержке при этой температуре ее микротвердость практически не изменяется. Сталь Н18К9М5Т, наоборот, не склонна к упрочнению при сварке и существенно упрочняется на стадии термической обработки (с 400 до 750 HV).

Анализ представленных результатов свидетельствует о том, что полученные сваркой взрывом слоистые материалы обладают высоким комплексом свойств.

Временное сопротивление разрушению слоистой композиции «сталь 5ХВ2С – сталь 12Х18Н10Т» увеличилось в 1,7 раза по сравнению со сталью 5ХВ2С и в 2,3 раза по сравнению со сталью 12Х18Н10Т и составило 1160 МПа. Предел текучести возрос в 2,6 и 5,1 раз соответственно и составил 1000 МПа. Проведенная на заключительном этапе закалка с низким отпускном привела к увеличению временного сопротивления разрушению на 4 % по сравнению с незакаленными слоистыми композициями. При этом предел текучести возрос на 6 %. Во всех рассматриваемых случаях при использовании



технологии сварки взрывом происходило существенное снижение относительного удлинения образцов.

Композиция «сталь Н18К9М5Т – сталь 20» после трехчасовой выдержки при 490 °С обладает следующими значениями прочностных свойств:  $\sigma_B = 1510$  МПа (865 МПа без ТО),  $\sigma_{0,2} = 1\,460$  МПа (780 МПа без ТО),  $\delta = 10\%$  (7 % без ТО).

Временное сопротивление разрушению слоистой композиции «сталь 12Х18Н10Т – сталь Н18К9М5Т», термически обработанной при 490 °С, составляет 1 570 МПа (960 МПа без ТО), предел текучести  $\sigma_{0,2} = 1550$  МПа (940 МПа без ТО), относительное удлинение  $\delta = 15\%$  (18 % без ТО). Полученные экспериментально результаты сравнивали со значениями прочности композитов, рассчитанными по формуле [20]:

$$(\sigma_{Bк}) = (\sigma_{Bп1}) \cdot V_{п1} + (\sigma_{Bп2}) \cdot (1 - V_{п1}),$$

где  $(\sigma_{Bк})$  – расчетное значение временного сопротивления разрушению композиционного материала, состоящего из пластин первого и второго типов (МПа);  $(\sigma_{Bп1})$  – временное сопротивление разрушения первого материала (МПа);  $V_{п1}$  – объемная доля первого материала в общем объеме композита;  $(\sigma_{Bп2})$  – временное сопротивление разрушения второго материала (МПа).

Сравнение экспериментальных и расчетных значений временного сопротивления разрушению слоистых композиций до термической обработки и после нее представлено в табл. 4.

Различия в уровне временного сопротивления разрушению, зафиксированные между экспериментальными и расчетными значениями, являются результатом деформационного упрочнения, происходящего при динамическом взаимодействии стальных заготовок.

Анализ значений относительного удлинения исследуемых материалов показал, что наличие в структуре композита прослоек из стали с высокими показателями пластичности (стали 20 и стали 12Х18Н10Т) приводит к двух- трехкратному росту пластичности по сравнению с исходной сталью Н18К9М5Т.

Элементы, составляющие композит «сталь Н18К9М5Т – сталь 20», разрушаются с проявлением вязкого и квазивязкого механизмов. «Ямки» на поверхности пластин из стали 20 с ферритоперлитной структурой, имеют размеры ~ 10...40 мкм (рис. 5, фото 1). Поверхности разрушения пластин из стали Н18К9М5Т по сравнению со сталью 20 развиты в меньшей степени. Тем не менее при повышенном увеличении (5000 крат и более) на участках изломов, соответствующих пластинам из мартенситно-старееющей стали, можно также наблюдать «ямки», однако размер их существенно меньше (2...4 мкм), рис. 5, фото 2, что в целом позволяет отнести излом пластин из мартенситно-старееющей стали к квазивязкому типу.

Для хромоникелевой стали характерно разрушение с признаками, свидетельствующими о высокой энергоемкости процесса. Речь идет, в частности, о присутствии в изломе «ямок» раз-

Таблица 4

**Временное сопротивление разрушению слоистых композиций до и после термической обработки**

| Слоистая композиция  | $\sigma_{в\ расч}$ | $\sigma_{в\ эксп}$ | $\left(1 - \frac{\sigma_{эксп}}{\sigma_{расч}}\right) 100\%$ |
|--|--------------------|--------------------|--|
| «Сталь 12Х18Н10Т – сталь 5ХВ2С» до термической обработки       | 590                | 1160               | 96 %   |
| «Сталь 12Х18Н10Т – сталь 5ХВ2С» после термической обработки    | 951                | 1205               | 27 %   |
| «Сталь Н18К9М5Т – сталь 20» до термической обработки           | 687                | 865                | 26 %   |
| «Сталь Н18К9М5Т – сталь 20» после термической обработки        | 1171               | 1510               | 29 %   |
| «Сталь 12Х18Н10Т – сталь Н18К9М5Т» до термической обработки    | 788                | 960                | 22 %   |
| «Сталь 12Х18Н10Т – сталь Н18К9М5Т» после термической обработки | 1274               | 1610               | 26 %   |

мером 2...20 мкм (рис. 5, фото 3). На дне многих крупных ямок четко просматриваются компактные включения.

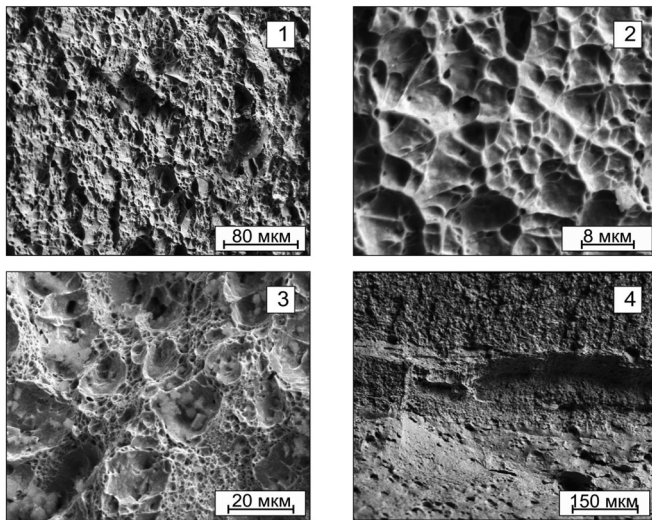


Рис. 5. Фрактограммы изломов слоев термически обработанных композиций, полученных в условиях статического нагружения:

1 – сталь 20; 2 – сталь N18K9M5T; 3 – сталь 12X18N10T; 4 – сталь 5XB2C

Присутствие в зонах соединения вихревых построений отражается на характере разрушения многослойных композитов. Разрушение материала происходило по границам вихревых построений. Размер возникших при этом «ямок» составлял ~ 10 мкм (рис. 5, фото 4). Для зон, возникших на месте вихреобразных построений, характерным также является присутствие микропустот. Природа их появления связана с пребыванием металла в расплавленном состоянии.

## Выводы

1. Эффективным подходом к проблеме повышения конструктивной прочности металлических материалов является формирование многослойных пакетов из чередующихся пластин прочных и пластичных сталей с последующей их термической обработкой. Экспериментально было показано различие значений временного сопротивления разрушению в среднем на 30 % по сравнению с расчетными значениями, полученными при использовании правила смесей. Различия в уровне временного сопротивления разрушению являются результатом деформационного упрочнения, происходящего при динамическом взаимодействии стальных заготовок.

2. В процессе термической обработки многослойных материалов, полученных сваркой взрывом тонких пластин из хромоникелевой аустенитной и инструментальной штамповой сталей, формируется четко выраженная градиентная структура, характерной особенностью которой является наличие нескольких зон с различным строением. Ускоренному формированию этих зон при нагреве способствует неравновесное строение материалов в околошовной зоне шириной ~100 мкм, возникшее в результате интенсивной пластической деформации динамически взаимодействующих стальных заготовок. Различная степень пластической деформации обуславливает ширину формируемых в результате диффузии зон вдоль профиля волны сварного шва.

3. Экспериментально установлено, что влияние процесса деформации и термической обработки на характер упрочнения хромоникелевой, мартенситно-старееющей и инструментальной сталей резко различается. Результаты измерения микротвердости в центральных зонах пластин свидетельствуют о том, что сталь 12X18N10T упрочняется при сварке взрывом на 42 % (с 190 до 454 HV). В процессе выдержки при 490 °С ее микротвердость практически не изменяется. Сталь N18K9M5T, наоборот, не склонна к упрочнению при сварке и упрочняется на стадии старения при 490 °С на 53 % (с 400 до 750 HV). Механизм упрочнения мартенситно-старееющей стали обусловлен формированием в ней интерметаллидных частиц. Микротвердость инструментальной стали при сварке взрывом возрастает на 32 % (с 220 HV до 290 HV). Термическая обработка позволяет дополнительно поднять уровень микротвердости этой стали на 48 % (с 290 HV до 600 HV).

## Список литературы

1. Энтин Р.И., Курдюмов Г.В. Пути повышения прочности и пластичности конструкционных сталей // Вестник Академии наук СССР. – 1967. – № 8. – С. 20–26.
2. Тушинский Л.И. Структурная теория конструктивной прочности материалов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 400 с.
3. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.
4. Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

5. *Ляхтин Ю.М., Арзамасов Б.Н.* Химико-термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
6. *Korzhov V.P., Kiiko V.M., Karpov M.I.* Structure of multilayer microcomposite Ni/Al obtained by diffusion welding // *Inorganic Materials: Applied Research.* – 2012. – Vol. 3, iss. 4. – P. 314–318. – doi: 10.1134/S2075113312040107.
7. Optimizing the diffusion welding process for alloy 800H: thermodynamic, diffusion modeling, and experimental work / R.E. Mizia, D.E. Clark, M.V. Glazoff, T.E. Lister, T.L. Trowbridge // *Metallurgical and Materials Transactions: A.* – 2013. – Vol. 44, iss. 1, suppl. – P. 154–161. – doi: 10.1007/s11661-011-0991-6.
8. *Harach D.J., Vecchio K.S.* Microstructure evolution in metal-intermetallic laminate (MIL) composites synthesized by reactive foil sintering in air // *Metallurgical and Material Transaction: A.* – 2001. – Vol. 32, iss. 6. – P. 1493–1505. – doi: 10.1007/s11661-001-0237-0.
9. Resistance-curve and fracture behavior of Ti-Al<sub>3</sub>Ti metallic-intermetallic laminate (MIL) composites A. Rohatgi, D.J. Harach, K.S. Vecchio, K.P. Harvey // *Acta Materialia.* – 2003. – Vol. 51, iss. 10. – P. 2933–2957. – doi: 10.1016/S1359-6454(03)00108-3.
10. *Luo J.-G., Acoff V.L.* Using cold roll bonding and annealing to process Ti/Al multi-layered composites from elemental foils // *Materials Science and Engineering: A.* – 2004. – Vol. 379, iss. 1–2. – P. 164–172. – doi: 10.1016/j.msea.2004.01.021.
11. *Kong F., Chen Y., Zhang D.* Interfacial microstructure and shear strength of Ti6Al4V/TiAl laminate composite sheet fabricated by hot packed rolling // *Materials and Design.* – 2011. – Vol. 32, iss. 5. – P. 3167–3172. – doi: 10.1016/j.matdes.2011.02.052.
12. The increase of structural strength of multilayered materials produced by explosive welding of dissimilar steels thin plates / E.A. Prikhodko, V.S. Lozhkin, V.I. Mali, M.A. Esikov // *The 8 International Forum on Strategic Technologies (IFOST 2013): proceedings, Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013.* – Ulaanbaatar, 2013. – Vol. 1. – P. 37–40.
13. The effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of multilayered composites welded by explosion / E.A. Prikhodko, I.A. Bataev, A.A. Bataev, V.S. Lozhkin, V.I. Mali, M.A. Esikov // *Advanced Materials Research.* – 2012. – Vol. 535–537. – P. 231–234. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.231.
14. *Лысак В.И., Кузьмин С.В.* Создание композиционных материалов сваркой взрывом // *Вестник Южного научного центра.* – 2013. – Т. 9, юбилейный вып. – С. 64–69.
15. *Лысак В.И., Кузьмин С.В.* Сварка взрывом. – М.: Машиностроение, 2005. – С. 121–138.
16. *Батаев И.А.* Структура и механические свойства многослойных материалов, сформированных по технологии сварки взрывом тонколистовых заготовок из низкоуглеродистой стали: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2010. – 266 с.
17. *ASM Handbook. Vol. 9. Metallography and Microstructures / ed. by G.F. Vander Voort.* – Materials Park, Ohio, USA: ASM International Publ., 2004. – 1184 p. ISBN: 978-0-87170-706-2.
18. *Голованенко С.А., Фоништейн Н.М.* Двухфазные низколегированные стали. – М.: Металлургия, 1986. – С. 85.
19. *Биронт В.С., Крушенко Г.Г.* Влияние термической и термоциклической обработки на структуру и свойства мартенситно-старееющей стали // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии.* – 2008. – Т. 1, № 3. – P. 247–255.
20. *Батаев А.А.* Композиционные материалы: строение, получение, применение: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 383 с. – ISBN 5-7782-0315-2.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3 (72), July – September 2016, Pages 31–40

### The effect of heat treatment on the structure and properties of metallic layered composite materials formed by explosive welding of heterogeneous steels thin plates

**Lozhkina E.A.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: helens\_case@mail.ru

**Lozhkin V.S.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: logkaa@mail.ru

**Mali V.I.**<sup>2</sup>, Ph.D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, e-mail: mali@hydro.nsc.ru

**Esikov M.A.**<sup>2</sup>, Junior Researcher, e-mail: EsikovMaxim@ngs.ru

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>2</sup> Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the RAS, 15 Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

## Abstract

Three types of metal laminated composite materials consisting of alternating plates of durable and plastic steels are formed by explosive welding. In order to increase the structural strength indicators, the derived composite materials are heat treated. Compositions containing maraging steel are subjected to artificial aging for 3 hours at 490 °C. Compositions containing tool steel are quenched in oil at 880 °C and then tempered at 550 °C. The mechanical properties of the materials are determined by its structure. Carried out static and dynamic mechanical tests confirmed the positive effect of heat treatment on the properties of the layered composite materials, in spite of the diffusion zones formation in the structure. During heat treatment of multilayer materials, obtained by explosive welding of chrome-nickel austenitic steel and structural tool steel thin plates, an explicit gradient structure is formed, and characterized by the presence of several zones with different structure. An accelerate formation of these zones during heating contributes to the non-equilibrium structure of materials in the heat-affected zone of a width of about 100 μm, which is formed as a result of severe plastic deformation of dynamically interacting steel billets. The width of the diffusion zones along weld profile waves is derived from the different degrees of plastic deformation.

It is established experimentally that the effect of the deformation and heat treatment processes on the nature of the hardening of chromium-nickel, maraging and tool steels differs sharply. The results of the microhardness measuring in the central areas of the plates indicate that chromium-nickel steel is hardened by explosive welding on 42%. In the soak process at 490 °C its microhardness is practically unchanged. Maraging steel conversely is undisposed to hardening during welding and is hardened on aging stage at 490 °C by 53 %. The mechanism of maraging steel hardening is due to the formation of intermetallic particles. The microhardness of the tool steel during explosion welding is increased by 32. Heat treatment allows to further raise the microhardness level of the tool steel by 48%.

It has been shown experimentally that there is a difference in average 30 % of the stress limit values, compared with calculated values obtained by using the rule of mixtures. Difference in the level of the stress limit values is due to the work hardening that occurs during the dynamic interaction of steel billets.

## Keywords

maraging steel, carbon steel, chrome-nickel stainless steel, explosive welding, laminated composite materials, heat treatment.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-31-40

## References

1. Entin R.I., Kurdyumov G.V. Puti povysheniya prochnosti i plastichnosti konstruktsionnykh staley [Ways to improve the strength and ductility of structural steels]. *Vestnik Akademii nauk SSSR – Herald of the Russian Academy of Science*, 1967, no. 8, pp. 20–26. (In Russian)
2. Tushinskii L.I. *Strukturnaya teoriya konstruktivnoi prochnosti materialov* [The structural theory of constructive strength of materials]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004. 400 p.
3. Novikov I.I. *Teoriya termicheskoi obrabotki metallov* [The theory of heat treatment of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 480 p.
4. Bernshtein M.L., Zaimovskii V.A., Kaputkina L.M. *Termomekhanicheskaya obrabotka stali* [Thermomechanical processing of steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 480 p.
5. Lakhtin Yu.M., Arzamasov B.N. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov* [Chemical heat treatment of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 256 p.
6. Korzhov V.P., Kiiko V.M., Karpov M.I. Structure of multilayer microcomposite Ni/Al obtained by diffusion welding. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2012, vol. 3, iss. 4, pp. 314–318. doi: 10.1134/S2075113312040107
7. Mizia R.E., Clark D.E., Glazoff M.V., Lister T.E., Trowbridge T.L. Optimizing the diffusion welding process for alloy 800H: thermodynamic, diffusion modeling, and experimental work. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2013, vol. 44, iss. 1, suppl., pp. 154–161. doi: 10.1007/s11661-011-0991-6
8. Harach D.J., Vecchio K.S. Microstructure evolution in metal-intermetallic laminate (MIL) composites synthesized by reactive foil sintering in air. *Metallurgical and material transaction: A*, 2001, vol. 32, iss. 6, pp. 1493–1505. doi: 10.1007/s11661-001-0237-0
9. Rohatgi A., Harach D.J., Vecchio K.S., Harvey K.P. Resistance-curve and fracture behavior of Ti-Al<sub>3</sub> Ti metallicintermetallic laminate (MIL) composites. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, iss. 10, pp. 2933–2957. doi: 10.1016/S1359-6454(03)00108-3

10. Luo J.-G., Acoff V.L. Using cold roll bonding and annealing to process Ti/Al multi-layered composites from elemental foils. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 379, iss. 1–2, pp. 164–172. doi: 10.1016/j.msea.2004.01.021
11. Kong F., Chen Y., Zhang D. Interfacial microstructure and shear strength of Ti6Al4V/TiAl laminate composite sheet fabricated by hot packed rolling. *Materials and Design*, 2011, vol. 32, iss. 6, pp. 3167–3172. doi: 10.1016/j.matdes.2011.02.052
12. Prikhodko E.A., Lozhkin V.S., Mali V.I., Esikov M.A. The increase of structural strength of multilayered materials produced by explosive welding of dissimilar steels thin plates. *The 8 International Forum on Strategic Technologies (IFOST 2013): proceedings*, Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013, Ulaanbaatar, 2013, vol. 1, pp. 37–40.
13. Prikhodko E.A., Bataev I.A., Bataev A.A., Lozhkin V.S., Mali V.I., Esikov M.A. The effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of multilayered composites welded by explosion. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 535–537, pp. 231–234. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.231
14. Lysak V.I., Kuz'min S.V. Sozdanie kompozitsionnykh materialov svarkoj vzryvom [Production of composite materials by explosion welding]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra – Vestnik SSC RAS*, 2013, no. 9, anniversary iss., pp. 64–69.
15. Lysak V.I., Kuz'min S.V. *Svarka vzryvom* [Explosive welding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 544 p.
16. Bataev I.A. *Struktura i mekhanicheskie svoystva mnogosloynnykh materialov, sformirovannykh po tekhnologii svarki vzryvom tonkolistovykh zagotovok iz nizkouglerodistoi stali*. Diss. kand. tekhn. nauk [Structure and mechanical properties multilayer materials formed by explosion welding thin sheets of mild steel workpieces. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2010. 233 p.
17. Vander Voort G.F., ed. *ASM Handbook*. Vol. 9. *Metallography and Microstructures*. Materials Park, Ohio, USA, ASM International Publ., 2004. 1184 p. ISBN 978-0-87170-706-2
18. Golovanenko S.A., Fonshtein N.M. *Dvukhfaznye nizkolegirovannyye stali* [Biphasic low-alloyed steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, p. 85.
19. Biront V.S., Krushenko G.G. Vliyanie termicheskoi i termotsiklicheskoi obrabotki na strukturu i svoystva martensitno-stareyushchei stali [Effect of heat and thermo-cyclic treatment on structure and properties of martensitic-ageing steel]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii – Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2008, vol. 1, no. 3, pp. 247–255.
20. Bataev A.A. *Kompozitsionnyye materialy: stroenie, poluchenie, primenenie* [Composite materials: structure, obtaining, using]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2002. 383 p. ISBN 5-7782-0315-2

### Funding

The study is undertaken with financial support from the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology

### Article history

Received 1 July 2016

Revised 18 July 2016

Accepted 15 August 2016

# ОБРАЗОВАНИЕ ЖИДКОЙ ФАЗЫ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ЗАКАЛКИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ НАГРЕВОМ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ\*

*В.В. ИВАНЦИВСКИЙ, доктор техн. наук, доцент*

*И.А. БАТАЕВ, канд. техн. наук, доцент*

*Т.Г. МАРТЫНОВА, канд. техн. наук, доцент*

*Н.В. ВАХРУШЕВ, аспирант, ассистент*

*Г.О. ЧА, аспирант*

*(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 3 июня 2016

Рецензирование 15 июля 2016

Принята к печати 15 августа 2016

**Иванцовский В.В.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: ivancivskij@corp.nstu.ru

Для повышения эксплуатационных свойств деталей машин все большее распространения получают методы модифицирования поверхностных слоев деталей с использованием источников энергии высокой концентрации, обеспечивающих скорости нагрева порядка  $10^4 \dots 10^5$  °C/с. Объектом данных исследований является поверхностная закалка высокоэнергетическим нагревом токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ). Данному источнику энергии свойственно весьма сложное распределение энергии по толщине нагреваемого слоя, что может являться причиной образования в глубине материала микрообъемов расплавленного металла, приводящее к существенному снижению качества обрабатываемого изделия. Следовательно, при назначении технологических режимов, необходимо учитывать характерные особенности обработки данными источниками нагрева.

Натурные эксперименты проводились на круглошлифовальном станке модели 3Б12, оснащенного дополнительным источником энергии, в качестве которого использовался выносной закалочный контур, реализующий высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты. Структурные исследования производили с применением оптической и растровой микроскопии. Математическое моделирование тепловых полей и структурно-фазовых превращений при ВЭН ТВЧ осуществлялось в программных комплексах ANSYS и SYSWELD.

Теоретически обоснована и практически доказана возможность возникновения в процессе поверхностной закалки стали 45 с использованием высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты с одновременным душевым водяным охлаждением жидкой фазы не на поверхности, а на глубине 0,15...0,2 мм. На основании проведенных исследований сделан вывод о том, что назначать режимы поверхностной закалки с использованием ВЭН ТВЧ с одновременным душевым охлаждением необходимо исходя из наиболее теплонапряженного слоя.

**Ключевые слова:** поверхностная закалка, токи высокой частоты, метод конечных элементов, конструкционная сталь, жидкая фаза.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-41-51

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-2\_15 в плановом периоде 2015–2016 гг.

## Введение

Поверхностная закалка стальных деталей с использованием концентрированных источников энергии характеризуется высокими скоростями нагрева (десятки тысяч градусов в секунду). В этих условиях для завершения процесса аустенитизации разогрев стали осуществляют вплоть до температуры плавления [1–8]. При использовании поверхностных источников нагрева (лазер, плазма и др.) максимальные значения температур, безусловно, наблюдаются именно на поверхности материала [9–14]. Однако для объемных источников энергии (электронный луч, токи высокой частоты) данный факт не очевиден. Это объясняется, прежде всего, физической природой объемного источника, т. е. закономерностью распределения энергии по глубине нагреваемого слоя [15]. Так, в работе [16] показана возможность образования в глубине материала микрообъемов расплавленного металла при нагреве в воздушной атмосфере с использованием электронного пучка. На данных участках при поверхностной закалке заэвтектидной стали была зафиксирована структура ледебурита, характерная для термической обработки чугунов.

При нагреве сталей в воздушной среде с использованием концентрированного электронного пучка распределение выделяемой энергии в материале носит подобный характер, как и при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ) [17, 18]. В этом случае при поверхностной закалке с использованием ВЭН ТВЧ можно также ожидать возможность возникновения локальных объемов жидкой фазы в глубине материала.

Целью данной работы является определение наиболее теплонапряженного слоя при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты стальных деталей с одновременным душевым охлаждением.

## Методика экспериментального исследования

### *Материалы и методы натурных экспериментов*

В качестве образцов для поверхностного упрочнения использовались цилиндрические детали из стали 45. Состав исходного материала

проверяли с использованием оптико-эмиссионного спектрометра ARL 3460. Результаты анализа представлены в таблице.

Предварительная подготовка образцов производилась на токарном обрабатывающем центре СТХ310eco V3 с системой ЧПУ Siemens 810D. Геометрические параметры дисков: Ø 50 мм, высота 10 мм. Контроль размеров осуществлялся на профилографе-профилометре Form Talysurf Series 2.

**Химический состав исходных материалов**

| Материал | Массовая доля элемента, % |      |      |       |       |      |      |      |
|----------|---------------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|
|          | C                         | Si   | Mn   | S     | P     | Cr   | Ni   | Cu   |
| 45       | 0,44                      | 0,23 | 0,61 | 0,013 | 0,019 | 0,11 | 0,15 | 0,17 |

Поверхностное упрочнение производилось на модернизированном круглошлифовальном станке модели 3Б12. Для этого станочная система оснащалась дополнительным концентрированным источником энергии, в качестве которого использовался выносной закалочный контур, реализующий высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты (ВЭНТВЧ), характеризующийся высоким термическим коэффициентом полезного действия. В качестве источника энергии был применен ламповый генератор марки ВЧГ 6-60/0,44 с рабочей частотой тока 440 кГц. Процесс нагрева осуществлялся по глубинной схеме (толщина упрочненного слоя не превышала глубины проникновения тока в горячий металл – 0,6...0,8 мм) непрерывно-последовательным способом. Схема обработки представлена на рис.1 [19, 20].

При упрочнении применялся индуктор петлевого типа, оснащенный ферритовым магнитопроводом марки N87 (для работы в диапазоне частот до 500 кГц) с магнитной проницаемостью  $\mu_i = 2200$  (рис. 1). Исследования проводились при использовании интенсивного водяного душевого охлаждения поверхности (коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 30 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C)) в следующем диапазоне режимов обработки: удельная мощность источника  $q_{\text{и}} = (1,5...4,0) \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>, окружная скорость детали  $V_{\text{д}} = (50...100)$  мм/с. Ширина активного провода индуктора составляла  $R_{\text{и}} = 1,2$  мм, обработка осуществлялась с зазором  $\delta = 0,1...0,2$  мм. С целью устранения возможности перегорания активного провода и обеспечения надежного отвода тепло-

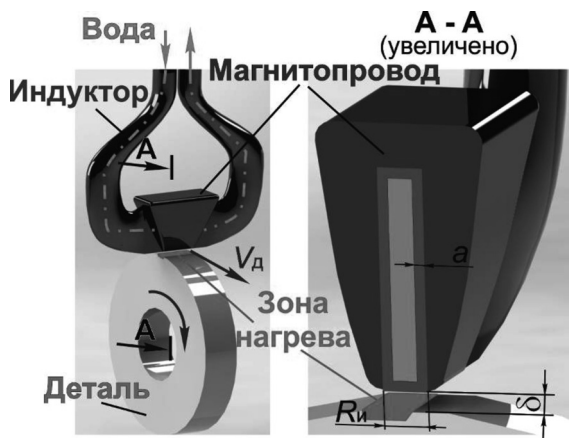


Рис. 1. Схема обработки при ВЭН ТВЧ

ты толщина стенок индуктора составляет  $a = 0,12...0,15$  мм [21–23].

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Carl ZeissAxio Observer A1m и растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP. Металлографические шлифы готовили по стандартной технологии, основанной на механическом шлифовании и полировании анализируемого материала.

**Математическое моделирование**

Подготовка конечно-элементной модели (построение 3D модели образца, назначение типа конечных элементов (КЭ) и создание регулярной КЭ сетки) осуществлялась в программном комплексе ANSYS. Генератором ANSYS Meshing была сформирована гексаэдрическая КЭ сетка с использованием следующих типов конечных элементов: *Solid bodies* – твердые тела моделировали восьмиузловыми тетраэдрами SOLID 45; *Surface bodies* – поверхностные тела моделировали четырехузловыми четырехугольными оболочковыми элементами SHELL 63; *Line bodies* – линейные тела моделировали двухузловыми линейными элементами LINK 8. Размер конечных элементов составлял 0,01...1 мм. Общее количество элементов (*Elements*) – 2 116 119 (рис. 2), при этом узлов (*Nodes*) – 7 482 433. При создании КЭ модели были созданы следующие компоненты: «*Volume*» – группа трехмерных элементов, обозначающих обрабатываемый объект; «*Trajectory*» – группа одномерных элементов, которая определяет траекторию перемеще-

ния источника энергии высокой концентрации; «*Reference*» – опорная эквидистанта – группа одномерных элементов, способствующая ориентированию локальной системы координат источника энергии; «*StartElem*» – стартовые элементы начала действия источника; «*StartNodes*» и «*EndNodes*» – начальные и конечные узлы на траектории перемещения; «*Skin*» – группа двухмерных элементов, обозначающих поверхности, по которым происходят конвективные и радиационные тепловые потери (*Convective and Radiative Losses*); «*ClampedNodes*» – группа узлов, по которым происходит закрепление диска.

Моделирование процесса ВЭНТВЧ осуществляли в системе SYSWELD, позволяющей посредством использования модели упруго-вязкопластического поведения материала и современного математического аппарата осуществить расчет температурных полей, распределения структурных составляющих, твердости, внутренних напряжений и деформаций [24].

При нагреве ТВЧ источником выделения энергии являются вихревые токи, возникающие в материале при воздействии переменных магнитных и электрических полей. Величина удельной мощности нагрева будет определяться плотностью тока  $J$ , характер изменения которого по глубине металла описывается зависимостью

$$J_z / J_0 = e^{-Z \sqrt{\frac{\pi \mu_0 \mu f}{\rho_e}}}$$

Здесь  $J_z$  – плотность тока на глубине  $Z$ ;  $J_0$  – плотность тока на поверхности;  $\rho_e$  – удельное электрическое сопротивление;  $f$  – частота тока;  $\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость вакуума;

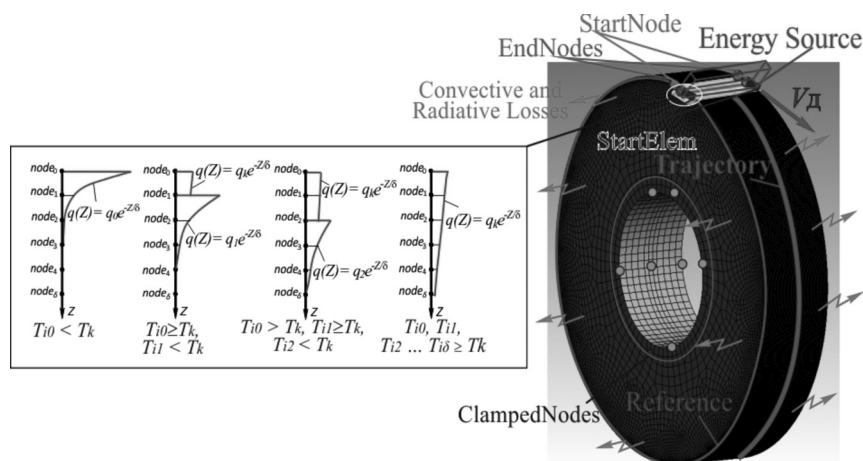


Рис. 2. Конечно-элементная модель процесса ВЭН ТВЧ



$\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала.

При нагреве стали изменяются ее удельное электрическое сопротивление и магнитная проницаемость, причем удельное сопротивление возрастает вплоть до точки магнитных превращений, после чего его рост замедляется. Магнитная проницаемость слабо зависит от температуры примерно до 650...700 °С, после чего быстро уменьшается и достигает величины, примерно равной магнитной проницаемости вакуума. Из изложенного следует, что распределение энергии по глубине материала не является постоянным.

Кинетические кривые нагрева ТВЧ поверхности изделия имеют перегиб в интервале температур 700...800 °С. Процесс нагрева разделяется на начальный этап с большой почти постоянной скоростью нарастания температуры и этап замедленного нагрева выше температуры потери сталью магнитных свойств. Основная причина замедления нагрева в точке магнитных превращений заключается в перераспределении энергии по сечению изделия. Действительно, в процессе нагрева всегда создается некоторый температурный градиент по сечению обрабатываемого объекта. Величины  $\rho_e$  и  $\mu$  зависят от температуры материала. Распространение электромагнитного процесса происходит, таким образом, в среде с переменными  $\rho_e$  и  $\mu$ . В работе [25] рассмотрен случай, когда материал состоит из двух слоев, имеющих разные  $\rho_e$  и  $\mu$ . Если бы первый слой был нагрет выше температуры 800 °С, а второй не подвергся нагреву (20 °С), то распределение вихревого тока точно соответствовало бы зависимости, представленной на рис. 3. Следовательно, при условии, когда верхний слой материала потерял ферромагнитные свойства, а нижележащий слой нагрет до температуры, не превышающей температуры точки Кюри, происходит перераспределение плотности

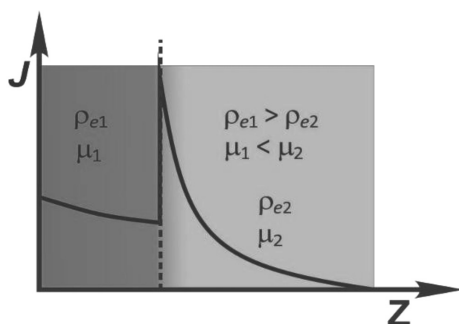


Рис. 3. Распределение плотности тока по глубине в двухслойной среде

тока. Максимум энерговыделения смещается от поверхности в слой, не потерявший ферромагнитных свойств. Алгоритм перераспределения энергии по глубине материала на разных стадиях нагрева представлен на рис. 2.

Важную роль в создании математической модели играет расчет теплофизических и физико-механических свойств и генерация базы данных материалов. Зависимости теплофизических характеристик (теплопроводность  $\lambda(T)$ , теплоемкость  $c(T)$  и удельная плотность  $\rho(T)$ ) для данных марок сталей приняты по данным работ [26–28]. При описании предела текучести  $\sigma_T(T)$ , модуля Юнга  $E(T)$ , коэффициента Пуассона  $\nu(T)$ , модуля упрочнения  $H(T)$  использовались данные, представленные в работах [29–36].

## Результаты и обсуждение

В процессе моделирования температурных полей в сталях при ВЭН ТВЧ по алгоритму, представленному в работе [17], было установлено, что при определенном сочетании режимов нагрева температура нижележащего слоя может достигать более высоких значений, чем на поверхности (рис. 4). Так, температура слоя на глубине  $Z = 0,2$  мм от поверхности достигает значений температуры плавления материала, в то время как температура поверхностного слоя ниже этого значения. Это происходит за счет того, что при разогреве поверхностного слоя до температуры точки Кюри  $T_K$ , когда сталь теряет ферромагнитные свойства, большая часть энергии выделяется в нижележащем слое. При этом в поверхностном слое происходит интенсивный отбор тепла охлаждающей жидкостью,

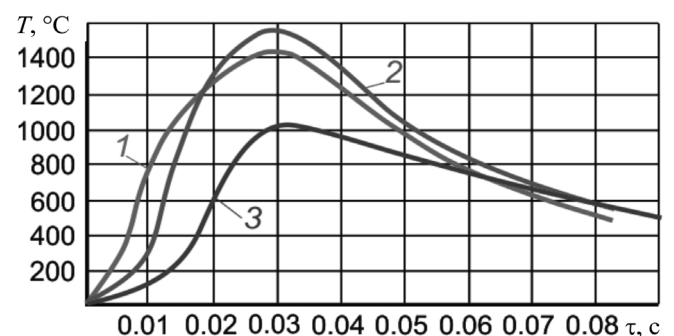


Рис. 4. Термические циклы, реализуемые на различной глубине поверхностного слоя при нагреве ВЭН ТВЧ:

материал – сталь 45;  $q_H = 200$  МВт/м<sup>2</sup>,  $V_d = 60$  мм/с,  $R_H = 1,2$  мм; 1 –  $Z = 0$ ; 2 –  $Z = 0,2$  мм; 3 –  $Z = 0,8$  мм

подающейся непосредственно в зону нагрева, в то время как в нижележащем слое отвод тепла регламентируется условиями теплопроводности. В этом случае становится возможным образование жидкой фазы не на поверхности, а в более глубоких слоях нагреваемого металла.

Для подтверждения полученных результатов моделирования температурных полей был проведен эксперимент, реализующий режимы нагрева, представленные на рис. 4. В процессе обработки цилиндрического образца было зафиксировано возникновение автоколебаний индуктора, вызванного периодическими выбросами расплавленного металла на поверхность (рис. 5).

Рис. 5. Следы проплава на закаленных образцах



Это явление можно объяснить следующим образом. В данных условиях источник энергии является медленно движущимся, т. е. скорость теплопередачи выше скорости движения источника. Поэтому в начальный момент нагрева не наблюдается расплавления металла (см. рис. 4). Через определенный момент времени температура на глубине порядка 0,2 мм достигает значительной температуры плавления металла (кривая 2). В этом случае в приповерхностном слое в зоне, расположенной непосредственно под индуктором, происходит образование замкнутого объема расплавленного металла. Тепловое расширение расплава приводит к возрастанию давления в данном объеме. Поверхностный слой металла, разогретый до высоких температур (кривая 1), становится пластичным. Это приводит к кинжальному проплавлению, т. е. расплавленный металл из нижележащего слоя выбрасывается наружу, оставляя на поверхности образца кратер (лунку), а также наплывы и капли расплавленного металла (рис. 6).

Следует отметить, что при определенных сочетаниях режимов поверхностной закалки оплавление материала может начинаться

и с поверхностного слоя. Однако, как видно на рис. 6, следов оплавления металла до лунки не наблюдается. Отсутствие следов оплавления после лунки объясняется тем, что в процессе выброса расплавленного металла происходит уменьшение зазора между активным проводом индуктора и обрабатываемой поверхностью, что приводит к увеличению интенсивности магнитного поля между индуктором и нагреваемым объектом. Это, в свою очередь, приводит к возрастанию отталкивающего удельного механического усилия между индуктором и деталью, что вызывает упругую деформацию токоподводящих медных трубок и, как следствие, происходит увеличение зазора и снижение удельной мощности нагрева.

После прохождения зоны расплавления за счет упругости индуктора величина зазора восстанавливается, и цикл нагрева поверхности детали повторяется. Именно с этим связана периодичность возникновения на образцах следов проплава металла (см. рис. 5). При этом следует подчеркнуть, что в процессе обработки не наблюдалось замыкания активного провода индуктора с обрабатываемой поверхностью, что привело бы к короткому замыканию и плавлению меди активного провода индуктора, приводящих к его разрушению. Для подтверждения данного факта был проведен микрорентгеноспектральный анализ оплавленного слоя, который показал отсутствие следов меди в расплаве (рис. 7).

Как показывает рис. 5, выброс расплавленного металла происходит не по всей ширине обрабатываемого образца, а в двух локальных зонах. Это объясняется достаточно трудоемкой технологией изготовления индуктора для реализации высокоэнергетического нагрева ТВЧ. При этом весьма сложно обеспечить абсолютную прямолинейность активного провода индуктора. Его профиль имеет отклонения от прямолинейности

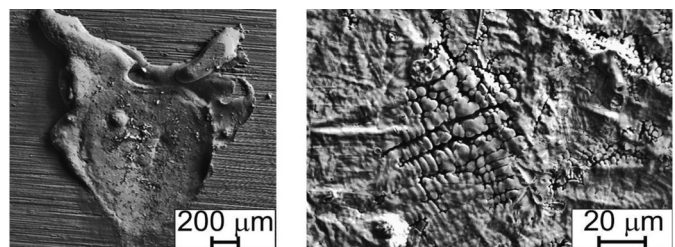


Рис. 6. Лунка, образовавшаяся на поверхности образца после выброса расплавленного металла (а) и фрагмент поверхности внутри лунки (б)

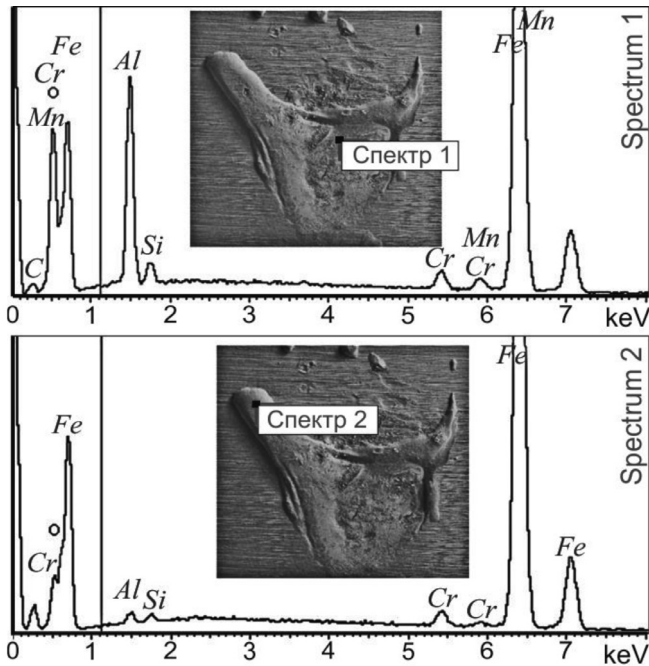


Рис. 7. Дифракционные картины, снятые на двух участках локального оплавления металла

в пределах 0,02...0,04 мм, что, безусловно, сказывается и на уровне удельной мощности нагрева. Наиболее глубокий проплав металла происходит именно в тех двух зонах, где зазор между индуктором и обрабатываемой поверхностью был минимальным.

На рис. 8 показаны фрагменты поверхности, непосредственно прилегающие к лунке. Здесь отчетливо видна начальная стадия проплавления металла.

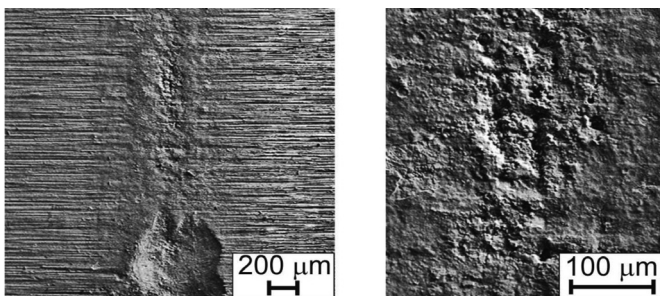


Рис. 8. Фрагменты зоны, соответствующей начальной стадии проплавления металла

В этой зоне расплав металла образовался на меньшей глубине, непосредственно в приповерхностном слое материала. На поверхности образца видны места пластической деформации (вспучивания) металла, а также отдельные микрократеры выброса расплавленного металла на поверхность.

На рис. 9 представлены снимки различных участков зоны оплавления металла, зафиксиро-

ванные на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO50 XVP. Наличие жидкой фазы металла, интенсивное охлаждение с поверхности за счет подачи охлаждающей жидкости непосредственно в зону нагрева и интенсивный отвод тепла в глубь металла за счет теплопроводности позволяют сделать вывод о возможности получения переохлажденного расплава. Как видно из рис. 9, на поверхности лунок формируется дендритное построение материала. Кристаллизация металла происходила в условиях быстрого охлаждения, что привело к возникновению значительных по величине градиентов напряжений и, как следствие, к возникновению микротрещин.

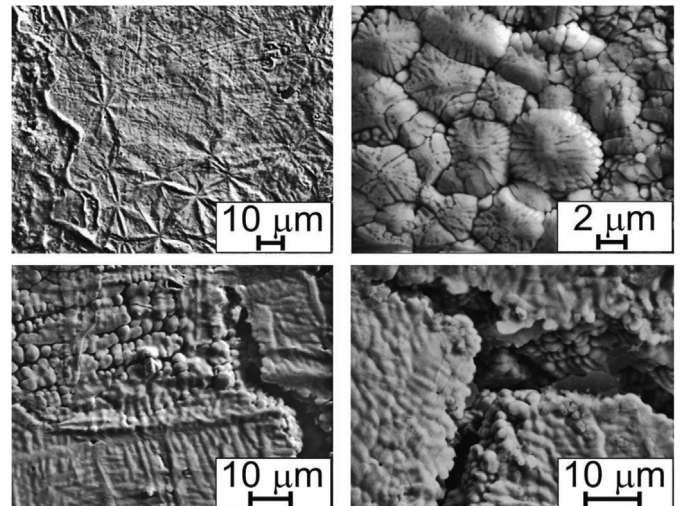


Рис. 9. Отдельные фрагменты зоны оплавления металла

## Вывод

В процессе поверхностной закалки сталей наличие оплавления материала, как правило, недопустимо. Таким образом, на основании проведенных исследований сделан вывод о том, что назначать режимы поверхностной закалки с использованием ВЭН ТВЧ с одновременным душевым охлаждением необходимо исходя из наиболее теплонапряженного слоя. Так, например, для стали 45 максимальные значения температур реализуются на глубине 0,15...0,2 мм.

Авторы выражают благодарность доценту Новосибирского государственного технического университета В.Ю. Скибе за оказанную помощь в проведении натурных и теоретических исследований.

## Список литературы

1. Multipass surface hardening of steel samples with inclined surfaces by concentrated electron beam in the air of atmosphere pressure / V.V. Abashkin, O.A. Gorshkov, A.A. Ilyin, A.S. Lovtsov, R.N. Rizakhanov // High Temperature Material Processes: an International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. – 2004. – Vol. 8, N 3. – P. 427–432. – doi: 10.1615/HighTempMatProc.v8.i3.80.

2. Davis J.R. Surface hardening of steels: understanding the basics. – Materials Park, OH: ASM International, 2002. – 364 p. – ISBN 978-0-87170-764-2.

3. Анализ напряженно-деформированного состояния материала при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты / В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 3 (64). – С. 90–102.

4. Béjar M.A., Henríquez R. Surface hardening of steel by plasma-electrolysis boronizing // Materials and Design. – 2009. – Vol. 30, iss. 5. – P. 1726–1728. – doi: 10.1016/j.matdes.2008.07.006.

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

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

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

8. Surface hardening of steels with carbon by non-vacuum electron-beam processing / I.A. Bataev, M.G. Golkovskii, A.A. Bataev, A.A. Losinskaya, A.I. Popelyukh, E.A. Drobyaz // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 242. – P. 164–169. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.01.038.

9. Oxide powder plasma processing by low-energy ions of titanium / E.M. Vodopyanov, A.V. Loginova, A.S. Ivashutenko, N.V. Martyushev // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 756. – P. 299–302. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.299.

10. Physical-mechanical properties of corundum-zirconium ceramic obtained by the technology of radial magnetoimpulse pressing / S.V. Akarachkin, A.A. Sivkov,

A.S. Ivashutenko, N.V. Martyushev // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 756. – P. 286–292. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.286.

11. Ion J.C. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. – Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. – 576 p. – ISBN-10: 008097189X. – ISBN-13: 978-0080971896.

12. Fauchais P.L., Heberlein J.V.R., Boulos M.I. Thermal spray fundamentals. – New York: Springer, 2014. – 1566 p. – ISBN 978-0-387-28319-7. – doi: 10.1007/978-0-387-68991-3.

13. Handbook of thermal spray technology / J.R. Davis, ed. – Materials Park, OH: ASM International, 2004. – 338 p. – ISBN-10: 0-87170-795-0. – ISBN-13: 978-0-87170-795-6.

14. ASM Handbook. Vol. 5A. Thermal spray technology / R.C. Tucker jr, ed. – Materials Park, Ohio: ASM International, 2013. – 412 p. – ISBN 978-1-61503-996-8.

15. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating source / V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, N.V. Martyushev, D.V. Lobanov, N.V. Vakhrushev, A.K. Zhigulev // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 712. – P. 105–111. – doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105.

16. Особенности структурных превращений в сталях, обусловленные использованием источников высококонцентрированной энергии / А.А. Батаев, И.А. Батаев, В.Г. Буров, В.В. Иванцовский // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2004. – № 4 (25). – С. 18–19.

17. Иванцовский В.В. Численное моделирование температурных полей в материалах при упрочнении с использованием концентрированных объемных источников нагрева // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2004. – № 2. – С. 161–172.

18. Skeebea V., Ivancivsky V., Pushnin V. Numerical modeling of steel surface hardening in the process of high energy heating by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 288–293. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.288.

19. Иванцовский В.В., Батаев В.А. Упрочнение поверхностных слоев деталей машин с использованием высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты // Ползуновский вестник. – 2005. – № 2-2. – С. 104–112.

20. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Зуб Н.П. Методика назначения режимов обработки, обеспечивающих рациональное распределение остаточных напряжений при поверхностной закалке ВЭН ТВЧ // Научный вестник НГТУ. – 2008. – № 3 (32). – С. 83–94.

21. Структура износостойких плазменных покрытий после высокоэнергетического воздействия

ТВЧ / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, В.В. Иванцовский, В.Ю. Скиба, Н.В. Плотникова, Д.В. Лобанов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 4 (65). – С. 11–18.

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

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

24. Моделирование напряженно-деформированного состояния материала в программном комплексе SYSWELD при поверхностной закалке ТВЧ / В.Ю. Скиба, В.Е. Воротников, Р.А. Гарин, Е.А. Гарин // В мире научных открытий. – 2010. – № 2-3. – С. 16–19.

25. *Бабат Г.И.* Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 552 с.

26. *Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л.* Физические свойства металлов и сплавов / под ред. Я.Л. Лившица. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.

27. Теплопроводность твердых тел: справочник / под ред. А.С. Охотина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.

28. Стали и сплавы. Марочник: справочник / под ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гервасьева. – М.: Интермет инжиниринг, 2001. – 608 с. – ISBN 5-89594-056-0.

29. *Denis S., Sjöström S., Simon A.* Coupled temperature, stress, phase transformation calculation model numerical illustration of the internal stress evolution

during cooling of a eutectoid steel cylinder // Metallurgical and Materials Transactions: A. – 1987. – Vol. 18, N 7. – P. 1203–1212. – doi: 10.1007/BF02647190.

30. *Hildenwall B., Ericsson T.* Prediction of residual stresses in case-hardening steel // Hardenability Concepts with Application to Steel / D.V. Doane and J.S. Kirkaldy, eds. – Warrendale: AIME, 1978. – P. 579–605.

31. *Прус А.А., Ермолаев Б.И.* Металлы и сплавы: справочные данные о физико-механических свойствах при различных температурах и условиях нагружения. – М.: ЦНИИ, 1975. – 583 с.

32. *Зиновьев В.Е.* Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник. – М.: Металлургия, 1989. – 383 с.

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

34. *Fortunier R., Leblond J.B., Bergheau J.M.* A Numerical model for multiple phase transformations in steels during thermal processes // Journal of Shanghai Jiaotong University (Science). – 2000. – Vol. E5, no. 1. – P. 213–220.

35. *Sjöström S.* The calculation of quench stresses in steel: PhD diss. no. 84 / Linköping University, Linköping Studios in Science and Technology, Division of Solid Mechanics and Strength of Materials, Department of Mechanical Engineering. – Linköping, Sweden, 1982. – 126 p.

36. *Иванцовский В.В.* Управление структурным и напряженным состоянием поверхностных слоев деталей машин при их упрочнении с использованием концентрированных источников нагрева и финишного шлифования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09 / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2012. – 425 с.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3 (72), July – September 2016, Pages 41–51

### The formation of the liquid phase in the surface layer of steel components in the high-energy heat hardening by high frequency currents

**Ivancivsky V.V.**, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ivancivskij@corp.nstu.ru

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

**Martynova T.G.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: tatyana martynova1511@gmail.com

**Vakhrushev N.V.**, Ph.D. student, Assistant, e-mail: vah\_nikit@mail.ru

**Cha G.O.**, Ph.D. student, Engineer, e-mail: Grigoriy\_olegovich@mail.ru

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

## Abstract

**Purpose:** To improve the operational properties of machine parts, the methods of modifying the surface layers of parts with highly concentrated energy sources, providing a heating rate of about  $10^4 \dots 10^5$  °C/sec, are becoming more common. The target of the research is high-energy heat hardening of the surface by high-frequency currents (HEH HFC). This energy source is characterized by highly complicated energy distribution in the depth of the heated layer, which may cause the formation of micro volumes of molten metal in the depth of the material, leading to a significant reduction in the quality of the workpiece. Consequently, when setting the process parameters, it is necessary to take into account the processing characteristics by the given heat sources. **Methods:** Full-scale experiments are carried out on the cylindrical grinding machines 3B12, having an additional source of energy in the form of the external quenching circuit implementing high-energy heating by high-frequency currents. Structural studies are carried out using optical and scanning electron microscopy. Mathematical modeling of thermal fields and structural phase transitions using HEH HFC is carried out in ANSYS and SYSWELD software systems. **Results and Discussion:** It is theoretically grounded and proven in use that when performing the surface hardening of steel 45 using the high-energy heating by high-frequency currents and simultaneous shower water-cooling, the liquid phase may occur not on the surface but at the depth of 0,15...0,2 mm. Basing on the research the conclusion is as follows: when setting the processing parameters of the HEH HFC surface hardening with simultaneous shower water-cooling, they must be based on the most heat-stressed layer.

## Keywords

surface hardening, high-frequency currents, FEM, structural steel, the liquid phase.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-41-51

## References

1. Abashkin V.V., Gorshkov O.A., Ilyin A.A., Lovtsov A.S., Rizakhanov R.N. Multipass surface hardening of steel samples with inclined surfaces by concentrated electron beam in the air of atmosphere pressure. *High Temperature Material Processes: an International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*, 2004, vol. 8, iss. 3, pp. 427–432. doi: 10.1615/HighTempMatProc.v8.i3.80
2. Davis J.R. Surface hardening of steels: understanding the basics. Materials Park, Ohio, ASM International Publ., 2002. 364 p. ISBN 978-0-87170-764-2
3. Skeebe V.Yu., Pushnin V.N., Erokhin I.A., Kornev D.Yu. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya materiala pri vysokoenergeticheskom nagreve tokami vysokoi chastoty [Analysis of the stress-strain state of the material under high-energy heating by high frequency currents]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 3 (64), pp. 90–102.
4. Béjar M.A., Henríquez R. Surface hardening of steel by plasma-electrolysis boronizing. *Materials and Design*, 2009, vol. 30, iss. 5, pp. 1726–1728. doi: 10.1016/j.matdes.2008.07.006
5. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Kutyshkin A.V., Parts K.A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126, p. 012016. doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016
6. Skeebe V., Pushnin V., Kornev D. Quality improvement of wear-resistant coatings in plasma spraying integrated with high-energy heating by high frequency currents. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 88–94. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.88
7. Plotnikova N., Losinskaya A., Skeebe V., Nikitenko E. Perspective of high energy heating implementation for steel surface saturation with carbon. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 351–354. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.351
8. Bataev I.A., Golkovskii M.G., Bataev A.A., Losinskaya A.A., Popelyukh A.I., Drobyaz E.A. Surface hardening of steels with carbon by non-vacuum electron-beam processing. *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 242, pp. 164–169. doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.01.038
9. Vodopyanov E.M., Loginova A.V., Ivashutenko A.S., Martyushev N.V. Oxide powder plasma processing by low-energy ions of titanium. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 756, pp. 299–302. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.299
10. Akarachkin S.V., Sivkov A.A., Ivashutenko A.S., Martyushev N.V. Physical-mechanical properties of corundum-zirconium ceramic obtained by the technology of radial magnetoimpulse pressing. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 756, pp. 286–292. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.286

11. Ion J.C. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. Burlington, Elsevier Butterworth-Heinemann Publ., 2005. 576 p. ISBN-10: 008097189X. ISBN-13: 978-0080971896
12. Fauchais P.L., Heberlein J.V.R., Boulos M.I. *Thermal spray fundamentals*. New York, Springer, 2014. 1566 p. ISBN 978-0-387-28319-7. doi: 10.1007/978-0-387-68991-3
13. Davis J.R., ed. *Handbook of thermal spray technology*. Materials Park, Ohio, ASM International, 2004. 338 p. ISBN-10: 0-87170-795-0. ISBN-13: 978-0-87170-795-6
14. Tucker R.C. jr., ed. *ASM Handbook*. Vol. 5A. *Thermal spray technology*. Materials Park, Ohio, ASM International, 2013. 412 p. ISBN 978-1-61503-996-8
15. Skeebea V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyshev N.V., Lobanov D.V., Vakhrushev N.V., Zhigulev A.K. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating source. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 712, pp. 105–111. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105
16. Bataev A.A., Bataev I.A., Burov V.G., Ivancivsky V.V. Osobennosti strukturnykh prevrashchenii v stalyakh, obuslovlennyye ispol'zovaniem istochnikov vysokokontsentrirrovannoi energii [Features of structural transformations in steels based on highly concentrated energy sources]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2004, no. 4 (25), pp. 18–19.
17. Ivancivsky V.V. Chislennoe modelirovanie temperaturnykh polei v materialakh pri uprochnenii s ispol'zovaniem kontsentrirrovannykh ob'emnykh istochnikov nagreva [Numerical modeling of temperature fields in materials hardening using concentrated volumetric heat sources]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2004, no. 2, pp. 161–172.
18. Skeebea V., Ivancivsky V., Pushnin V. Numerical modeling of steel surface hardening in the process of high energy heating by high frequency currents. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 288–293. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.288
19. Ivancivsky V.V., Bataev V.A. Uprochnenie poverkhnostnykh sloev detalei mashin s ispol'zovaniem vysokoenergeticheskogo nagreva tokami vysokoi chastoty [Surface hardening of machine parts by using high-energy heating by high frequency currents]. *Polzunovskii vestnik – Polzunov Bulletin*, 2005, no. 2-2, pp. 104–112.
20. Ivancivsky V.V., Skeebea V.Yu., Zub N.P. Metodika naznacheniya rezhimov obrabotki, obespechivayushchikh ratsional'noe raspredelenie ostatochnykh napryazhenii pri poverkhnostnoi zakalke VEN TVCh [Method of determining processing modes, ensuring the rational distribution of residual stresses in surface hardening HEH HFC]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2008, no. 3 (32), pp. 83–94.
21. Chesov Yu.S., Zverev E.A., Ivancivsky V.V., Skeebea V.Yu., Plotnikova N.V., Lobanov D.V. Struktura iznosostoikikh plazmennyykh pokrytii posle vysokoenergeticheskogo vozdeistviya TVCh [Structure of wear resistant plasma coatings after high-energy treatment using high-frequency currents]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 4 (65), pp. 11–18.
22. Skeebea V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 12, pp. 1408–1411. doi: 10.1080/10426914.2014.973595
23. Skeebea V.Yu., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Zhigulev A.K., Skeebea P.Yu. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “diamond smoothing”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 125, p. 012031. doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012031
24. Skeebea V.Yu., Vorotnikov V.E., Garin R.A., Garin E.A. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya materiala v programmnom komplekse SYSWELD pri poverkhnostnoi zakalke TVCh [Simulation of the stress-strain state of the material in the software package SYSWELD in surface hardening by high frequency]. *V mire nauchnykh otkrytii – In the World of Scientific Discoveries*, 2010, no. 2-3, pp. 16–19. (In Russian)
25. Babat G.I. *Induktsionnyi nagrev metallov i ego promyshlennoe primeneniye* [Induction heating of metals and its industrial application]. Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1965. 552 p.
26. Lifshits Ya.L., Kraposhin V.S., Linetskii Ya.L. *Fizicheskie svoystva metallov i splavov* [Physical properties of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 320 p.
27. Okhotin A.S., ed. *Teploprovodnost' tverdykh tel: spravochnik* [Thermal conductivity of solids: directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 320 p.
28. Sorokin V.G., Gervas'ev M.A., eds. *Stali i splavy. Marochnik: spravochnik* [Grade steels and alloys. Reference Edition]. Moscow, Internet Engineering Publ., 2001. 608 p. ISBN 5-89594-056-0

29. Denis S., Sjöström S., Simon A. Coupled temperature, stress, phase transformation calculation model numerical illustration of the internal stress evolution during cooling of a eutectoid steel cylinder. *Metallurgical Transactions: A*, 1987, vol. 18, no. 7, pp. 1203–1212. doi: 10.1007/BF02647190
30. Hildenwall B., Ericsson T. Prediction of residual stresses in case-hardening steel. *Hardenability Concepts with Application to Steel*. Ed by D.V. Doane and J.S. Kirkaldy. Warrendale, AIME, 1978, pp. 579–605.
31. Prus A.A., Ermolaev B.I. *Metally i splavy: spravochnye dannye o fiziko-mekhanicheskikh svoystvakh pri razlichnykh temperaturakh i usloviyakh nagruzheniya* [Metals and alloys. Reference data on the physical and mechanical properties at different temperatures and loading conditions]. Moscow, TsNII Publ., 1975. 583 p.
32. Zinov'ev V.E. *Teplofizicheskie svoystva metallov pri vysokikh temperaturakh: spravochnik* [Thermophysical properties of metals at high temperatures: directory]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989. 383 p.
33. Skeeba V.Yu. *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei mashin pri integratsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of the technological processing machinery parts with the integration of abrasive grinding and surface hardening currents by high frequency currents. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2008. 257 p.
34. Fortunier R., Leblond J.B., Bergheau J.M. A numerical model for multiple phase transformations in steels during thermal processes. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2000, vol. E5, no. 1, pp. 213–220.
35. Sjöström S. *The calculation of quench stresses in steel*. PhD diss. no. 84. Linköping University, Linköping Studios in Science and Technology, Division of Solid Mechanics and Strength of Materials, Department of Mechanical Engineering. Linköping, Sweden, 1982. 126 p.
36. Ivancivsky V.V. *Upravlenie strukturnym i napryazhennym sostoyaniem poverkhnostnykh sloev detalei mashin pri ikh uprochnenii s ispol'zovaniem kontsentrirrovannykh istochnikov nagreva i finishnogo shlifovaniya*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Control of structural and stress state of the surface layers of machine parts during their hardening using concentrated sources of heat and abrasive finishing. Dr. eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2012. 425 p.

### Acknowledgement

The authors would like to thank Associate Professor of Novosibirsk State Technical University V Yu Skeeba for his assistance in the theoretical research and full-sale investigation.

### Funding

This study was supported by a NSTU grant (project No. TII-IITM-2\_15).

### Article history

Received 3 June 2016

Revised 15 July 2016

Accepted 15 August 2016



# ФОРМИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ СПЕКНИЕМ ЧАСТИЦ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ\*

*А.А. НИКУЛИНА, канд. техн. наук, доцент  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 1 июля 2016

Рецензирование 18 июля 2016

Принята к печати 15 августа 2016

**Никulina А.А.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: a.nikulina@corp.nstu.ru

С использованием метода искрового плазменного спекания сформированы гетерофазные железоуглеродистые сплавы на основе частиц разнородных сталей У8 и 12Х18Н10Т соответственно в перлитном и аустенитном состоянии. Результаты структурных исследований, выполненных с использованием методов световой и растровой электронной микроскопии, показали, что основными структурными составляющими в полученных композициях являются аустенит, перлит, феррит, мартенсит и карбид хрома. В зонах взаимодействия исходных частиц формируются области переходного химического состава, приобретающие после охлаждения аустенитно-мартенситную структуру. Микротвердость данных областей находится на уровне 6000...9000 МПа.

**Ключевые слова:** искровое плазменное спекание, структура, перлит, мартенсит, аустенит, разнородные стали, структурные исследования.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-52-61

## Введение

Железоуглеродистые сплавы являются важнейшими материалами в современном машиностроении. Чаще всего они характеризуются гетерофазным строением [1]. Анализ литературы показывает, что исследователи в настоящее время активно занимаются изучением структуры и свойств двухфазных [2–7] и многофазных [8–13] сталей. Для первой группы основными структурными составляющими являются либо обе фазы железа ( $\gamma$  и  $\alpha$ ), либо матрицей является одна из фаз железа, а в ней присутствует метастабильная фаза ( $\alpha'$ - или  $\varepsilon$ -мартенсит) [14, 15]. Многофазные стали характеризуются наличием аустенита, феррита (или перлита) и мартенсита

(или бейнита). Особенность гетерофазных сталей заключается в том, что резко отличающиеся по свойствам фазы, входящие в их состав, обеспечивают в некоторых случаях уникальный комплекс механических свойств [16–19].

Основные методы получения гетерофазных сталей основаны на пластической деформации и/или термической обработке [8–19]. Однако интересные результаты отмечаются и при применении методов спекания порошков [20–24], среди которых можно выделить искровое плазменное спекание. Данный метод отличается кратковременностью воздействия на материал, что открывает большие возможности в формировании конечной структуры спекаемого материала. Суть метода заключается в пропускании импульсов

\* Работа выполнена в рамках программы стратегического развития НГТУ (проект С-14).

постоянного тока и одновременным приложением одноосного давления к порошковой композиции. За счет протекания тока контактирующие частицы локально плавятся, при этом основная часть материала остается в твердом состоянии. Спекание материала происходит равномерно по всему объему. Приложение давления обеспечивает высокую плотность получаемых компактов. Высокая скорость процесса позволяет фиксировать исходную структуру спекаемых материалов [25, 26]. Работ, посвященных получению гетерофазных железоуглеродистых сплавов методом искрового плазменного спекания, немного, хотя применение данной технологии может позволить сформировать уникальные материалы на основе железа.

Цель данной работы заключается в формировании многофазного материала на основе железа с использованием метода искрового плазменного спекания и исследовании его структуры.

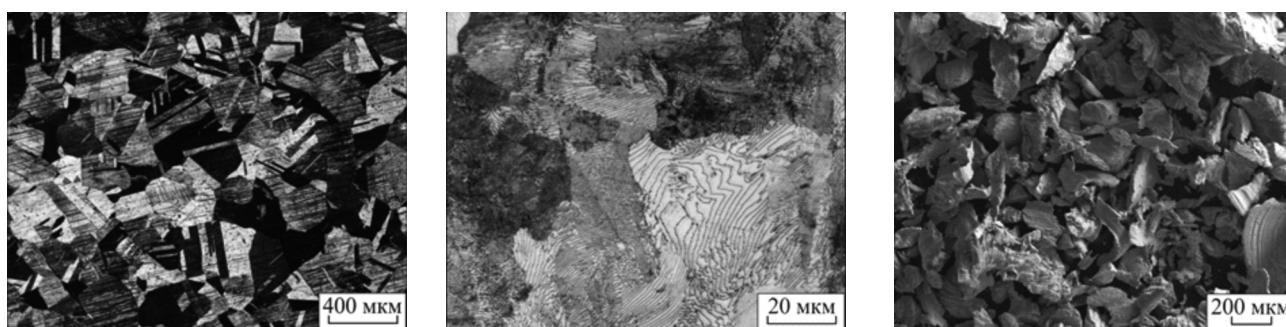
### Методика проведения исследований

В качестве исходных материалов были выбраны стали с перлитной (У8) и аустенитной (12Х18Н10Т) структурами (рис. 1, а, б). Предполагалось, что на участках взаимодействия частиц разнородных сталей в ходе спекания за счет активизации диффузионных процессов будут сформированы переходные области, обладающие промежуточным химическим составом по сравнению со спекаемыми сталями, что приве-

дет к появлению после охлаждения структур, отличных от исходных. Объектами исследования в работе являлись образцы, сформированные искровым плазменным спеканием (SPS) частиц данных разнородных сталей, полученных путем обработки резанием. Формирование равномерной смеси обеспечивали перемешиванием частиц сталей в планетарной шаровой мельнице Fritsch Pulverisette 6 при частоте вращения 100 об/мин в течение 20 мин. Микрофотографии смеси частиц сталей представлены на рис. 1, в. Более крупные вытянутые (за счет пластической деформации) частицы в данной смеси – частицы стали 12Х18Н10Т. Их максимальный размер достигает 1000 мкм. Наибольший размер частиц стали У8 составляет 500 мкм, при этом они имеют осколочную форму. Результаты энергодисперсионного анализа частиц представлены в табл. 1.

Спекание осуществляли на установке SPS10-4 Advanced Technology в токопроводящей графитовой пресс-форме с внутренним диаметром 30 мм. Форма и порошок отделялись графитовым слоем для исключения взаимодействия. Контроль температуры осуществляли термопарой, расположенной в отверстии в верхнем пуансоне. Режимы спекания образцов представлены в табл. 2. На рис. 2 изображен общий график процесса спекания.

Образцы для структурных исследований подготавливали с использованием стандартных



а

б

в

Рис. 1. Структура исходных сталей 12Х18Н10Т (а) и У8 (б) и общий вид полученной смеси частиц (в)

Таблица 1

### Результаты энергодисперсионного анализа стружки сталей

| Хим. элемент, % вес. | С    | Cr    | Ni   | Si   | Mn   | Fe   |
|----------------------|------|-------|------|------|------|------|
| Сталь 12Х18Н10Т      | 0,11 | 18,82 | 8,59 | 0,58 | 1,53 | Осн. |
| Сталь У8             | 0,76 | 0,36  | –    | 0,38 | 0,97 | Осн. |

**Режимы спекания образцов**

| Параметр                                  | Значение      |
|---|---------------|
| Средняя скорость нагрева, °С/мин          | 100           |
| Давление прессования, МПа                 | 60            |
| Давление первоначальной подпрессовки, МПа | 5             |
| Температура спекания                      | 1000, 1100 °С |
| Время спекания, мин                       | 5...25        |
| Сила тока, А                              | 910           |
| Рабочая среда                             | Вакуум        |

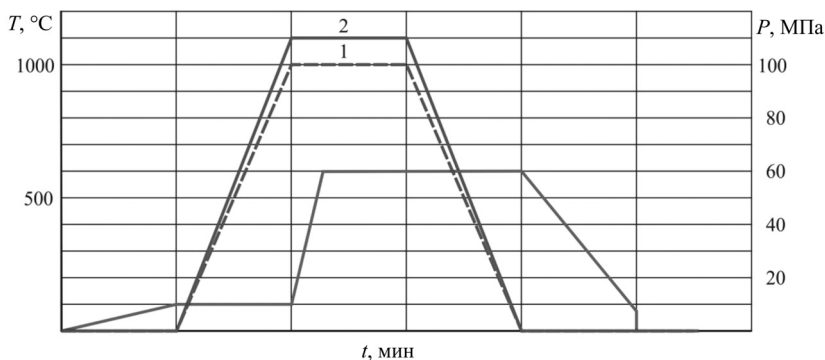


Рис. 2. Изменение температуры и давления в процессе искрового плазменного спекания:

1 – нагрев до 1000 °С; 2 – нагрев до 1100 °С

технологий шлифования и полирования на алмазных пастах. Финишную механическую полировку проводили на суспензии оксида хрома. Выявление структуры полученных композиций осуществляли 5%-м раствором азотной кислоты в спирте. Анализ структуры проводили на световом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer A1m и растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP. Распределение химических элементов изучали с использованием энергодисперсионного анализатора INCA.

Микротвердость фаз оценивали на микротвердомере для испытаний по Виккерсу 402MVD Wolpert Group.

### Результаты исследований и обсуждение

Материал, сформированный с использованием метода искрового плазменного спекания частиц разнородных сталей характеризуется незначительным количеством пор. Распределение легирующих элементов в спеченном композите при сканировании по линии представлено

на рис. 3. Видно, что светлые области соответствуют исходным частицам легированной стали, более темные области – исходным частицам углеродистой стали. Соотношение объемных долей разнородных областей примерно равно. В поперечном сечении структуру полученных образцов можно представить в виде схемы, изображенной на рис. 4, а. Центральные слои образцов характеризуются аустенитно-ферритным строением (рис. 4, б). При удалении от центра структура постепенно изменяется и области, соответствующие частицам углеродистой стали, приобретают сначала ферритно-перлитное (рис. 4, в), а затем полностью перлитное (рис. 4, г) строение. Формирование ферритной структуры объясняется активной диффузией углерода в процессе спекания, в результате чего частицы стали У8 обезуглероживаются. Обратный процесс происходит на периферии образцов, где поверхностные слои контактировали с графитовым слоем. За счет насыщения углеродом в областях, соответствующих исходным частицам стали У8, происходит образование видманштеттова цементита. На рис. 5 видно, что увеличение времени спекания приводит к увеличению объемной доли данной фазы.

Граничные слои, где происходило взаимодействие разнородных микрообъемов, приобретают промежуточное химическое строение между двумя спекаемыми сталями и при охлаждении в

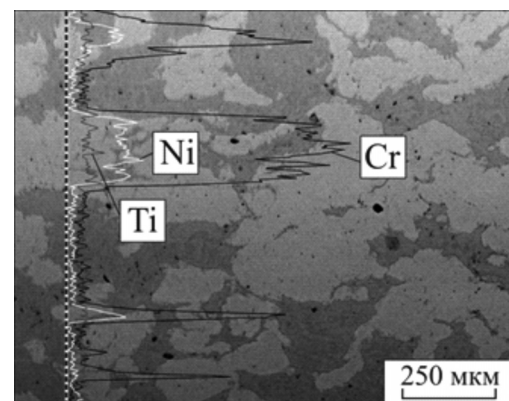


Рис. 3. Распределение легирующих элементов в спеченном материале

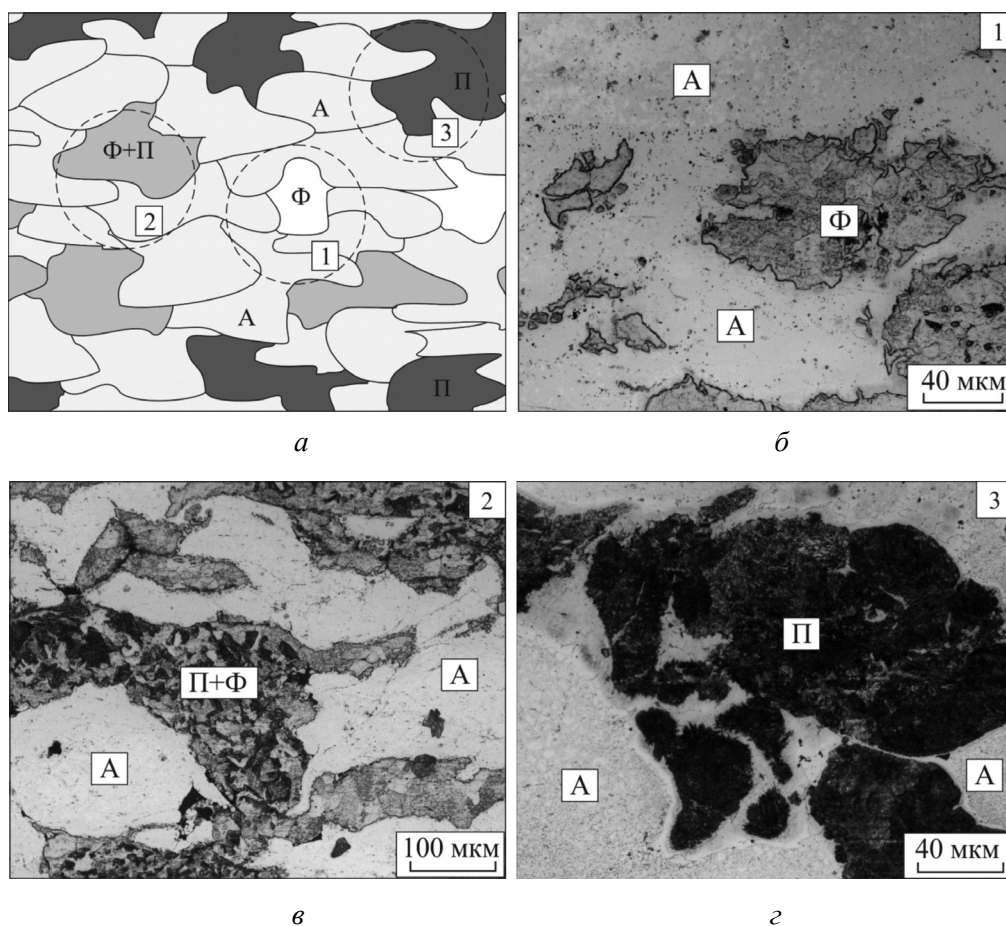


Рис. 4. Схема строения полученных композиций по толщине (а), структура в области 1 (б), в области 2 (в) и в области 3 (г). А – аустенит; П – перлит; Ф – феррит

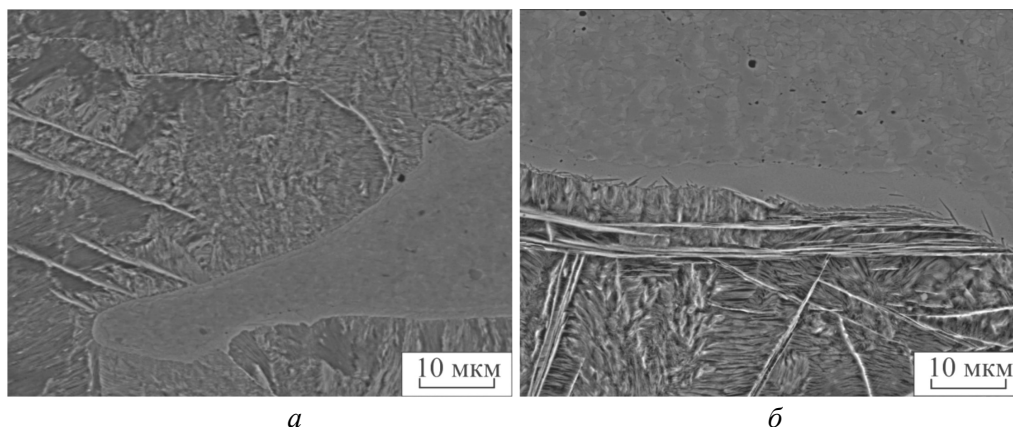


Рис. 5. Строение поверхностных насыщенных углеродом слоев образцов, полученных при температуре 1100 °С и времени 5 (а) и 25 (б) мин

них формируется аустенитно-мартенситная структура (рис. 6, а). Микрорентгеноспектральный анализ показал, что в данных областях концентрация хрома достигает 6...8 % вес., никеля – 2...3 % вес. Такое количество легирующих элементов недостаточно для стабилизации аустенита и при охлаждении происходит мартенситное превращение. Для участков, располагающихся на месте исходных частиц хромоникелевой стали, харак-

терно наличие карбидов и существенно более мелких аустенитных зерен по сравнению с исходной сталью, что связано со сдерживанием роста зерна после рекристаллизации за счет карбидных выделений по границам. В общем структуру на участке взаимодействия разнородных микрообъемов можно описать схемой, изображенной на рис. 6, б. Ширина промежуточных областей увеличивается по мере увеличения времени и

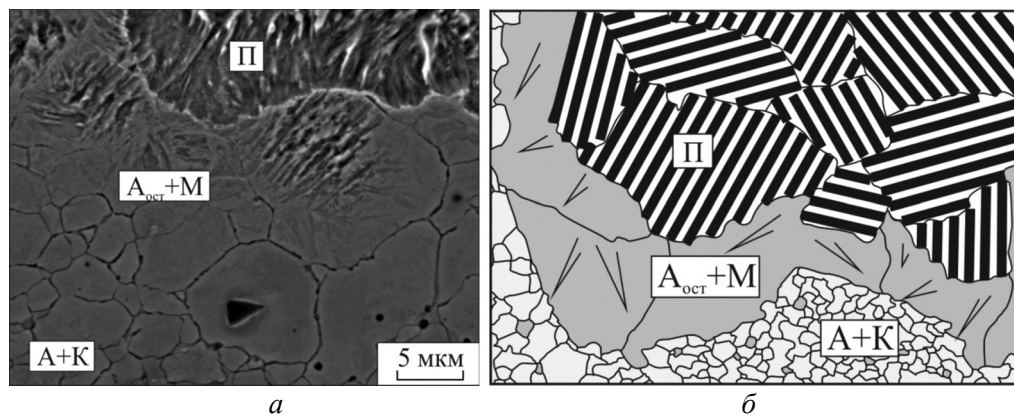


Рис. 6. Мартенситно-аустенитные области на границе взаимодействия разнородных микрообъемов (а) и общая схема строения таких областей (б).  $A_{ост}$  – остаточный аустенит, А – аустенит; К – карбиды; Π – перлит; М – мартенсит; Ф – феррит

температуры спекания (рис. 7). Ширина переходной зоны для материалов, полученных при температуре 1000 °С, не превышает в среднем 10 мкм. В то же время при увеличении времени спекания на некоторых участках наблюдаются достаточно широкие переходные зоны с аустенитно-мартенситным строением. Композиции,

полученные при температуре 1100 °С, характеризуются широкой переходной зоной уже при незначительном времени спекания, а при выдержке 15...25 мин ее ширина может достигать более 20 мкм. В центральных слоях образцов, где на месте частиц углеродистой стали зафиксирована структура феррита, также наблюдается переход-

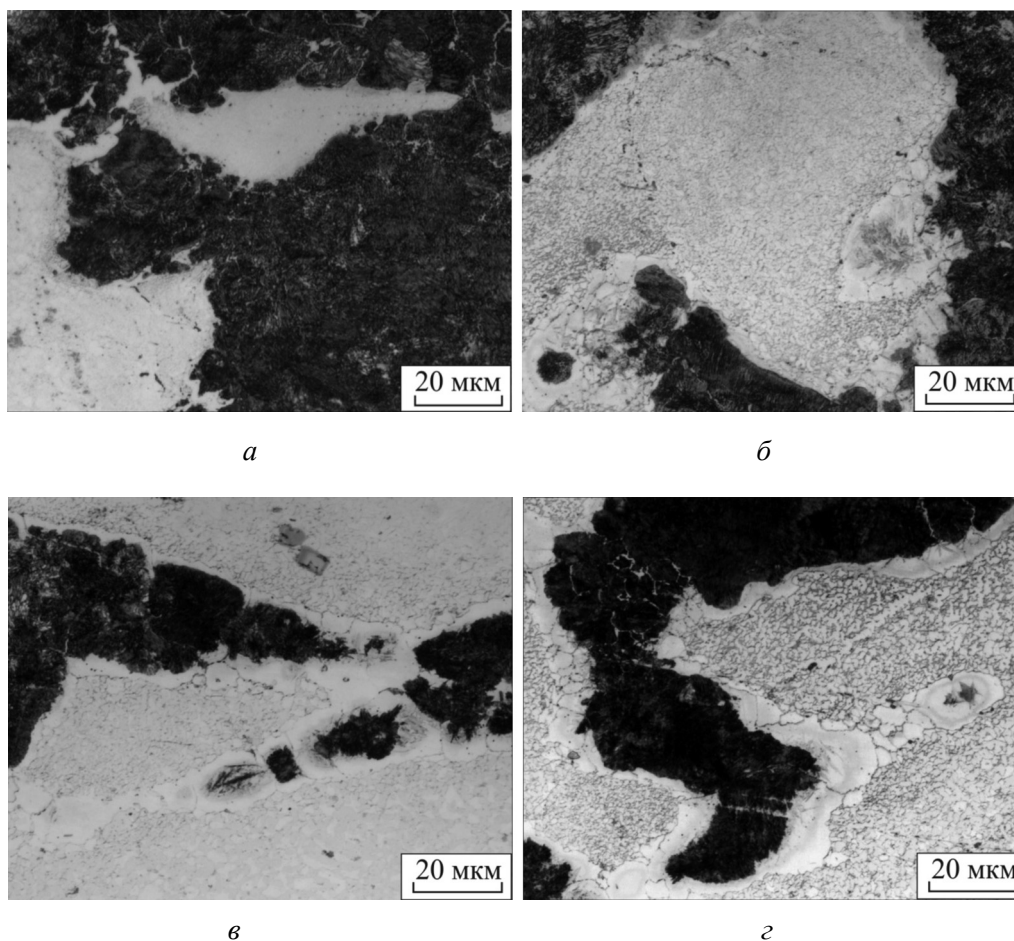


Рис. 7. Переходная зона, сформированная при спекании стружки сталей У8 и 12Х18Н10Т при режимах:

а – 1000 °С, 5 мин; б – 1000 °С, 25 мин; в – 1100 °С, 5 мин; г – 1100 °С, 25 мин

ная область на участке взаимодействия разнородных микрообъемов, которая характеризуется мартенситным строением (рис. 8).

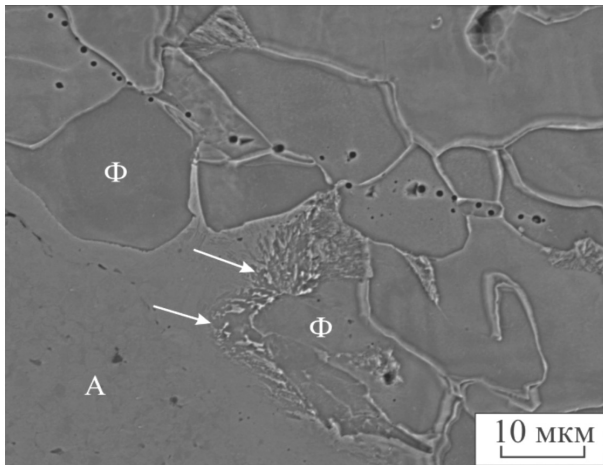


Рис. 8. Переходная зона (показана стрелками) между разнородными микрообъемами в центральной части образца. Ф – феррит; А – аустенит; стрелкой указана переходная область, обладающая структурой мартенсита

Рентгенофазовый анализ подтвердил результаты структурных исследований. Спеченные материалы незначительно отличаются по составу от исходной смеси. Единственным отличием является присутствие почти во всех спеченных образцах карбидной фазы  $Cr_7C_3$  (рис. 9).

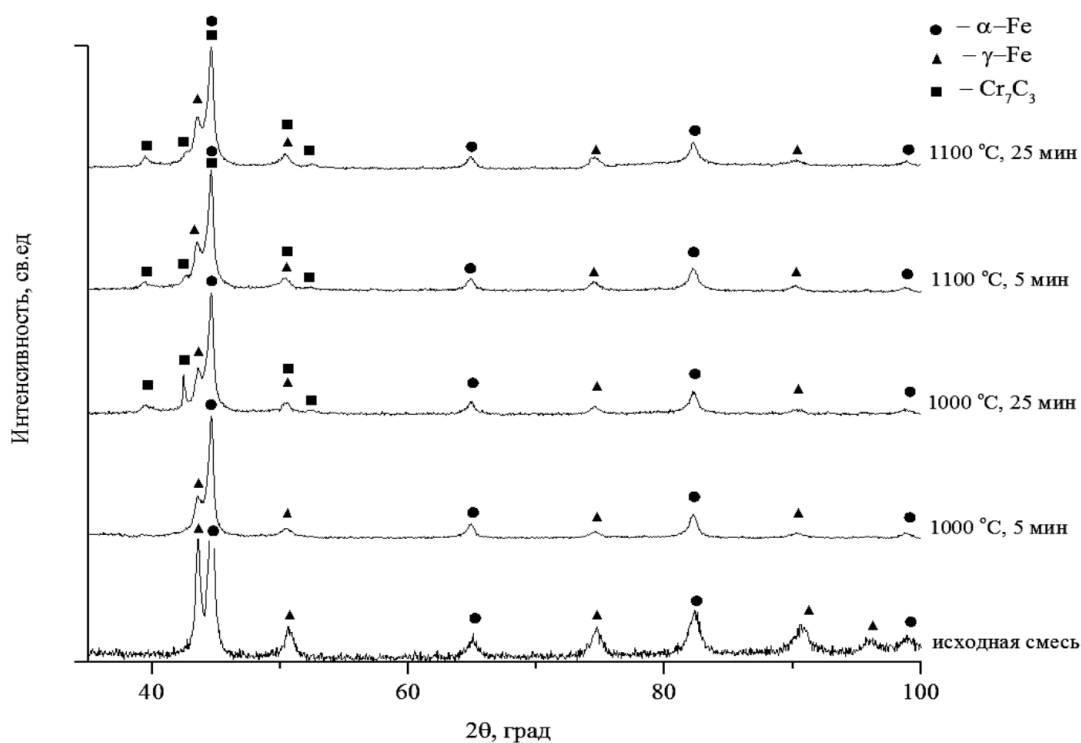


Рис. 9. Рентгенограммы исходной смеси и полученных материалов

Микротвердость разнородных микрообъемов существенно отличается. Так, для участков, сформированных на месте частиц углеродистой стали, характерно минимальное значение микротвердости в случае образования феррита (1500...1700 МПа), перлитные же области характеризуются уровнем микротвердости 3000...3500 МПа. Максимальный уровень микротвердости отмечен в переходных областях (6000...9000 МПа). Также достаточно высокий уровень микротвердости характерен для участков, сформированных на месте частиц хромоникелевой стали (5000...6500 МПа), что объясняется выделением большого количества карбидов.

### Выводы

Проведены структурные исследования материалов, полученных искровым плазменным спеканием частиц разнородных сталей У8 и 12Х18Н10Т, имеющих соответственно перлитное и аустенитное строение.

1. Использование метода искрового плазменного спекания позволяет получить железоуглеродистые материалы, обладающие гетерофазной структурой. Основными структурными составляющими полученных материалов являются

аустенит, перлит, феррит, мартенсит, а также карбиды хрома.

2. В области взаимодействия разнородных микрообъемов наблюдается образование переходных областей. Максимальная толщина таких областей при температуре спекания 1000 °С не превышает 10 мкм, а при 1100 °С ее ширина достигает 20 мкм.

3. Максимальный уровень микротвердости в спеченных материалах характерен для переходных областей и составляет 6000...9000 МПа.

Автор выражает благодарность доценту Национального исследовательского Томского политехнического университета А.С. Ивашутенко за подготовку образцов на установке искрового плазменного спекания.

### Список литературы

1. Гуляев А.П. *Металловедение*. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Rosenberg G., Sinaiova I., Juhar L. Effect of microstructure on mechanical properties of dual phase steels in the presence of stress concentrators // *Materials Science & Engineering: A*. – 2013. – Vol. 582. – P. 347–358. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2013.06.035>.
3. Ultrahigh strength martensite–austenite dual-phase steels with ultrafine structure: the response to indentation experiments / R.D.K. Misra, P. Venkatsurya, K.M. Wu, L.P. Karjalainen // *Materials Science & Engineering: A*. – 2013. – Vol. 560. – P. 693–699. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.10.015>.
4. Damage and fracture of dual-phase steels: influence of martensite volume fraction / Q. Lai, O. Bouaziz, M. Gouné, L. Brassart, M. Verdier, G. Parry, A. Perlade, Y. Bréchet, T. Pardoen // *Materials Science & Engineering: A*. – 2015. – Vol. 646. – P. 322–331. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.08.073>.
5. Paul S.K., Stanford N., Hilditch T. Effect of martensite morphology on low cycle fatigue behaviour of dual phase steels: experimental and microstructural investigation // *Materials Science & Engineering: A*. – 2015. – Vol. 644. – P. 53–60. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.07.044>.
6. Abid N.H., Abu Al-Rub R.K., Palazotto A.N. Computational modeling of the effect of equiaxed heterogeneous microstructures on strength and ductility of dual phase steels // *Computational Materials Science*. – 2015. – Vol. 103. – P. 20–37. – doi: [10.1016/j.commatsci.2015.02.051](http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.02.051).
7. Deformation and fracture mechanisms in fine- and ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels and the effect of aging / M. Calcagnotto, Y. Adachi, D. Ponge, D. Raabe // *Acta Materialia*. – 2011. – Vol. 59. – P. 658–670. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.08.073>.
8. Maresca F., Kouznetsova V.G., Geers M.G.D. Deformation behaviour of lath martensite in multi-phase steels // *Scripta Materialia*. – 2016. – Vol. 110. – P. 74–77. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.08.004>.
9. Radwański K. Structural characterization of low-carbon multiphase steels merging advanced research methods with light optical microscopy // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – 2016. – Vol. 16. – P. 282–293. – doi: [10.1016/j.acme.2015.12.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2015.12.001).
10. Super strong and highly ductile low alloy multiphase steels consisting of bainite, ferrite and retained austenite / A. Varshney, S. Sangal, S. Kundu, K. Mondal // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 95. – P. 75–88. – doi: [10.1016/j.matdes.2016.01.078](http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.078).
11. Hudgins A.W., Matlock D.K. The effects of property differences in multiphase sheet steels on local formability // *Materials Science & Engineering: A*. – 2016. – Vol. 654. – P. 169–176. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.12.035>.
12. Role of microstructure in the low cycle fatigue of multi-phase steels / T. Hilditch, H. Beladi, P. Hodgson, N. Stanford // *Materials Science and Engineering: A*. – 2012. – Vol. 534. – P. 288–296. – doi: [10.1016/j.msea.2011.11.071](http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2011.11.071).
13. Wiewiórowska S., Muskalski Z. The application of low and medium carbon steel with multiphase TRIP structure in drawing industry // *Procedia Manufacturing*. – 2015. – Vol. 2. – P. 181–185.
14. Голованенко С.А., Фоништейн Н.М. Конструкционные двухфазные стали // *Итоги науки и техники. Металловедение и термическая обработка*. – 1983. – Т. 17. – С. 64–120.
15. Батаева З.Б. Повышение конструктивной прочности низкоуглеродистых сталей путем формирования анизотропной гетерофазной структуры в условиях горячей и холодной пластической деформации: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2003. – 206 с.
16. Microstructures and mechanical properties of dual phase steel produced by laboratory simulated strip casting / Z.P. Xiong, A.G. Kostryzhev, N.E. Stanford, E.V. Pereloma // *Materials and Design*. – 2015. – Vol. 88. – P. 537–549. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.031>.
17. Microstructure and mechanical properties of dual phase strip steel in the overaging process of continuous annealing / C.Sh. Li, Z.X. Li, Y.M. Cen, B. Ma, G. Huo // *Materials Science & Engineering: A*. – 2015. – Vol. 627. – P. 281–289. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.109>.
18. Microstructure and mechanical properties of high strength and high toughness micro-laminated dual



phase steels / M.D. Zhang, J. Hu, W.Q. Cao, H. Dong // *Materials Science & Engineering: A.* – 2014. – Vol. 618. – P. 168–175. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2014.08.073>.

19. Goto S., Kami C., Kawamura S. Effect of alloying elements and hot-rolling conditions on microstructure of bainitic-ferrite/martensite dual phase steel with high toughness // *Materials Science & Engineering: A.* – 2015. – Vol. 648. – P. 436–442. – doi: [10.1016/j.msea.2015.09.093](https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.09.093).

20. Nanostructured/ultrafine multiphase steel with enhanced ductility obtained by mechanical alloying and spark plasma sintering of powders / C. Menapace, I. Lonardelli, M. Tait, A. Molinari // *Materials Science and Engineering: A.* – 2009. – Vol. 517. – P. 1–7. – doi: [10.1016/j.msea.2009.03.021](https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.03.021).

21. Munir Z.A., Anselmi-Tamburini U. The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: a review of the spark plasma sintering method // *Journal of Materials Science.* – 2006. – Vol. 41. – P. 763–777. – doi: [10.1007/s10853-006-6555-2](https://doi.org/10.1007/s10853-006-6555-2).

22. Mariappan R., Kumaran S., Srinivasa Rao T. Effect of sintering atmosphere on structure and properties of austeno-ferritic stainless steels // *Materials Science and Engineering: A.* – 2009. – Vol. 517. – P. 328–333.

23. Activated sintering of P/M duplex stainless steel powders / J. Kaziora, M. Nykiel, T. Pieczonka, T. Marcu Puscas, A. Molinari // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2004. – Vol. 157–158. – P. 712–717. – doi: [10.1016/j.jmatprotec.2004.07.140](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.140).

24. Simchi A., Rota A., Imgrund P. An investigation on the sintering behavior of 316L and 17-4PH stainless steel powders for graded composites // *Materials Science and Engineering: A.* – 2006. – Vol. 424. – P. 282–289. – doi: [10.1016/j.msea.2006.03.032](https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.03.032).

25. Райченко А.И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока. – М.: Металлургия, 1987. – 128 с.

26. Omori M. Sintering, consolidation, reaction and crystal growth by the spark plasma system (SPS) // *Materials Science and Engineering: A.* – 2000. – Vol. 287. – P. 183–188. – doi: [10.1016/S0921-5093\(00\)00773-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00773-5).

## ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

№ 3 (72), July – September 2016, Pages 52–61

### Formation of heterogeneous iron-carbon alloys structure by sintering of dissimilar steels particles

Nikulina A.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: [a.nikulina@corp.nstu.ru](mailto:a.nikulina@corp.nstu.ru)

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

#### Abstract

The objective of the study was to investigate the relationship between the microstructure of the compositions and the sintering conditions. Spark plasma sintering of dissimilar steels particles (Fe-0.8C and Fe-0.12C-18Cr-10Ni-1Ti with pearlite and austenite structures, respectively) is implemented to form heterophase iron-carbon alloys. Several sintering conditions with different temperature (1000 and 1100 °C) and sintering time (5 to 25 minutes) are used. All obtained compositions are characterized by the absence of pores. Correlation of the heterogeneous microvolumes is close to 1:1. The main methods of structural research in the work are light microscopy and scanning electron microscopy. Microhardness testing is also carried out. The experimental results presented in the study clearly show that basic structural components in the obtained compositions are austenite, pearlite, ferrite, martensite, as well as chromium carbides. It is found that in the zones of interaction between heterogeneous particles the transitional chemical composition areas are formed. The chromium content reaches 6...8 % wt. and nickel – 2...3 % wt. in these areas. The maximum thickness of such areas at the sintering temperature of 1000 °C is less than 10 microns and at 1100 °C its width reaches 20 micron. This chemical composition of the intermediate areas leads to the appearance of austenitic-martensitic structure after cooling with microhardness level about 600...900 HV.

#### Keywords

spark plasma sintering, microstructure, pearlite, martensite, austenite, dissimilar steels, structural research.

DOI: [10.17212/1994-6309-2016-3-52-61](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2016-3-52-61)



## References

1. Gulyaev A.P. *Metallovedenie* [Metal science]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 544 p.
2. Rosenberg G., Sinaiová I., Juhar L. Effect of microstructure on mechanical properties of dual phase steels in the presence of stress concentrators. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, vol. 582, pp. 347–358. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2013.06.035>
3. Misra R.D.K., Venkatsurya P., Wu K.M., Karjalainen L.P. Ultrahigh strength martensite–austenite dual-phase steels with ultrafine structure: the response to indentation experiments. *Materials Science & Engineering: A*, 2013, vol. 560, pp. 693–699. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.10.015>
4. Lai Q., Bouaziz O., Gouné M., Brassart L., Verdier M., Parry G., Perlade A., Bréchet Y., Pardoën T. Damage and fracture of dual-phase steels: influence of martensite volume fraction. *Materials Science & Engineering: A*, 2015, vol. 646, pp. 322–331. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.08.073>
5. Paul S.K., Stanford N., Hilditch T. Effect of martensite morphology on low cycle fatigue behaviour of dual phase steels: experimental and microstructural investigation. *Materials Science & Engineering: A*, 2015, vol. 644, pp. 53–60. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.07.044>
6. Abid N.H., Abu Al-Rub R.K., Palazotto A.N. Computational modeling of the effect of equiaxed heterogeneous microstructures on strength and ductility of dual phase steels. *Computational Materials Science*, 2015, vol. 103, pp. 20–37. doi: [10.1016/j.commatsci.2015.02.051](http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.02.051)
7. Calcagnotto M., Adachi Y., Ponge D., Raabe D. Deformation and fracture mechanisms in fine- and ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels and the effect of aging. *Acta Materialia*, 2011, vol. 59, pp. 658–670. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.08.073>
8. Maresca F., Kouznetsova V.G., Geers M.G.D. Deformation behaviour of lath martensite in multi-phase steels. *Scripta Materialia*, 2016, vol. 110, pp. 74–77. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.08.004>
9. Radwański K. Structural characterization of low-carbon multiphase steels merging advanced research methods with light optical microscopy. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2016, vol. 16, pp. 282–293. doi: [10.1016/j.acme.2015.12.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2015.12.001)
10. Varshney A., Sangal S., Kundu S., Mondal K. Super strong and highly ductile low alloy multiphase steels consisting of bainite, ferrite and retained austenite. *Materials & Design*, 2016, vol. 95, pp. 75–88. doi: [10.1016/j.matdes.2016.01.078](http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.078)
11. Hudgins A.W., Matlock D.K. The effects of property differences in multiphase sheet steels on local formability. *Materials Science & Engineering: A*, 2016, vol. 654, pp. 169–176. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.12.035>
12. Hilditch T., Beladi H., Hodgson P., Stanford N. Role of microstructure in the low cycle fatigue of multi-phase steels. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, vol. 534, pp. 288–296. doi: [10.1016/j.msea.2011.11.071](http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2011.11.071)
13. Wiewiórowska S., Muskalski Z. The application of low and medium carbon steel with multiphase TRIP structure in drawing industry. *Procedia Manufacturing*, 2015, vol. 2, pp. 181–185.
14. Golovanenko S.A., Fonshtein N.M. Konstruktsionnye dvukhfaznye stali [Structural duplex steels]. *Itogi nauki i tekhniki. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka – The results of science and technology. Metallurgy and heat treatment*, 1983, vol. 17, pp. 64–120.
15. Bataeva Z.B. *Povyshenie konstruktivnoi prochnosti nizkouglerodistykh stalei putem formirovaniya anizotropnoi geterofaznoi struktury v usloviyakh goryachei i kholodnoi plasticheskoi deformatsii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increased structural strength of low carbon steels by forming anisotropic heterophase structure under hot and cold plastic deformation. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2003. 206 p.
16. Xiong Z.P., Kostryzhev A.G., Stanford N.E., Pereloma E.V. Microstructures and mechanical properties of dual phase steel produced by laboratory simulated strip casting. *Materials and Design*, 2015, vol. 88, pp. 537–549. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.031>
17. Li C.Sh., Li Z.X., Cen Y.M., Ma B., Huo G. Microstructure and mechanical properties of dual phase strip steel in the overaging process of continuous annealing. *Materials Science & Engineering: A*, 2015, vol. 627, pp. 281–289. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.109>
18. Zhang M.D., Hu J., Cao W.Q., Dong H. Microstructure and mechanical properties of high strength and high toughness micro-laminated dual phase steels. *Materials Science & Engineering: A*, 2014, vol. 618, pp. 168–175. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2014.08.073>
19. Goto S., Kami C., Kawamura S. Effect of alloying elements and hot-rolling conditions on microstructure of bainitic-ferrite/martensite dual phase steel with high toughness. *Materials Science & Engineering: A*, 2015, vol. 648, pp. 436–442. doi: [10.1016/j.msea.2015.09.093](http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.09.093)

20. Menapace C., Lonardelli I., Tait M., Molinari A. Nanostructured/ultrafine multiphase steel with enhanced ductility obtained by mechanical alloying and spark plasma sintering of powders. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, vol. 517, pp. 1–7. doi: 10.1016/j.msea.2009.03.021

21. Munir Z.A., Anselmi-Tamburini U. The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: a review of the spark plasma sintering method. *Journal of Materials Science*, 2006, vol. 41, pp. 763–777. doi: 10.1007/s10853-006-6555-2

22. Mariappan R., Kumaran S., Srinivasa Rao T. Effect of sintering atmosphere on structure and properties of austeno-ferritic stainless steels. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, vol. 517, pp. 328–333. doi: 10.1016/j.msea.2009.04.011

23. Kaziora J., Nykiel M., Pieczonka T., Marcu Puscas T., Molinari A. Activated sintering of P/M duplex stainless steel powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 157–158, pp. 712–717. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.07.140

24. Simchi A., Rota A., Imgrund P. An investigation on the sintering behavior of 316L and 17-4PH stainless steel powders for graded composites. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, vol. 424, pp. 282–289. doi: 10.1016/j.msea.2006.03.032

25. Raichenko A.I. *Osnovy protsessy spekaniya poroshkov propuskaniem elektricheskogo toka* [Fundamentals of the powders sintering by passing an electric current]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 128 p.

26. Omori M. Sintering, consolidation, reaction and crystal growth by the spark plasma system (SPS). *Materials Science & Engineering: A*, 2000, vol. 287, pp. 183–188. doi: 10.1016/S0921-5093(00)00773-5

#### **Acknowledgements**

The author expresses sincere appreciation to Associate Professor A.S. Ivashutenko for help with sintering experiment.

#### **Funding**

The work was performed under the strategic development program of Novosibirsk State Technical University (project C-14).

#### **Article history**

Received 1 July 2016

Revised 18 July 2016

Accepted 15 August 2016

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

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

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

### 1. Общие комментарии

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

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

Избегайте:

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

- длинного текста (абзаца), содержащего избыточные высказывания.

Научная статья должна иметь определенную структуру, которая описана ниже.

### 2. Заглавие и сведения об авторах

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

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

### 3. Аннотация (реферат)

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

### 4. Ключевые слова

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

### 5. Введение

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

## **6. Описание экспериментальной части и теоретической/вычислительной работы**

### **6.1. Материал, испытываемые образцы и порядок проведения испытаний**

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

При необходимости приводятся рисунки образцов с единицами измерения (единицы измерения только в системе СИ). При испытании стандартных образцов достаточно ссылки на стандарт. Для большой программы испытаний целесообразно использовать таблицу матричного типа. Если образцы взяты из слитков, заготовок или компонентов, то описывается их ориентация и нахождение в исходном материале, используются стандартные обозначения по ГОСТу.

При проведении испытаний приводится следующая информация.

1. Тип и условия испытаний, например, температура испытаний, скорость нагружения, внешняя среда.

2. Описываются переменные параметры, измеряемые величины и методы их измерения с точностью, степенью погрешности, разрешением и т.д.; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

### **6.2. Результаты экспериментов**

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

### **6.3. По теоретической/вычислительной работе**

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

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

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

## **7. Обсуждение**

Необходимо использовать этот раздел для того, чтобы в полном объеме объяснить значимость вашего подхода, данных или анализа и результатов. Настоящий раздел упорядочивает и интерпретирует результаты. Цель раздела – показать, какие знания были получены в результате вашей работы, а также перспективу полученных результатов, сравнив их с существующим положением в данной области, описанным в разделе «Введение». Большое количество графиков и цветных иллюстраций не дает научного результата, это не презентация в PowerPoint. Обязанностью автора является упорядочение данных и систематическое представление результатов. Так, простой отчет о результатах испытаний без попытки исследовать внутренние механизмы не имеет большой ценности.

## 8. Выводы

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

## 9. Список литературы

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

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

*В.Г. Атапин, В.Ю. Скиба,  
Редакционный совет и редакция журнала  
«Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)»*

## ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

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

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

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

В тексте авторского резюме следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, 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  $^1\text{H}$  or  $^{31}\text{P}$  spectroscopy) are related to several pathophysiologic indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative  $^{13}\text{C}$ -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  $^{31}\text{P}$ 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](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.

Сканированный 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 – А4. Шрифт – *Times New Roman*, размер шрифта основного текста – 14 пт, параметры страницы – все поля 2 см. Выравнивание по ширине. Межстрочный интервал **полуторный**. Абзацный отступ – 1,25 см. Переносы включены. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть четкими и понятными, могут быть включены в текст статьи.

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

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

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

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

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

**Научная публикация должна иметь следующую структуру**

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

**2. Аннотация:**

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

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

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

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

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

**6. Результаты и обсуждение.**

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

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

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

**10. Сведения для РИНЦ.**

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ АНГЛОЯЗЫЧНОГО БЛОКА СТАТЬИ

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

**Англоязычная часть статьи должна включать в себя:**

**заголовок (Title)**, переведенный с русского языка. В переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме 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](http://journals.nstu.ru/files/2_4/affiliation.doc);

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

**ключевые слова (Keywords);**

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

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

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

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

## ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ В АНГЛОЯЗЫЧНОМ БЛОКЕ СТАТЬИ\*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## ПРИМЕРЫ ССЫЛОК

**Описание статьи из журналов:**

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

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

**Описание статьи из электронного журнала:**

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

**Если статья имеет DOI – обязательно указать его!****Описание статьи с DOI:**

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

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

**Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):**

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

**Описание материалов конференций:**

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

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

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

**Описание книги (монографии, сборники):**

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

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

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

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

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

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

Belousov, A.I., Bobrik, P.I., Rakhman\_Zade, A.Z. *Teplovye yavleniya i obrabatyvaemost' rezaniem 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*. 4<sup>th</sup> 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](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 kompaknyi 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](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.<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: metal\_working@mail.ru  
Petrov V.S.<sup>2</sup>, Ph.D. student, e-mail: petrov\_v@mail.ru

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>2</sup>I.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

<sup>1</sup>Иванов Владимир Григорьевич, <sup>2</sup>Петров Виктор Сергеевич, ... (Ф.И.О. указывается полностью и для всех соавторов!)

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

<sup>2</sup>Алтайский 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

<sup>1</sup>Ivanov V.G., <sup>2</sup>Petrov V.S., ...

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>2</sup>I.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.

# МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ НГТУ

## Кафедры:

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

## Научная деятельность:

*выполнение фундаментальных и прикладных исследований в области:*

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

## Производственная деятельность:

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

## Образовательные услуги:

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

## Центры, лаборатории:

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

## Адрес:

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

Тел./факс: +7 (383) 346-51-92

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

Декан МТФ: к.т.н., доцент Янпольский Василий Васильевич  
e-mail: [mtf@corp.nstu.ru](mailto: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](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov);
- на сайте НГТУ: [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru) (раздел «Научная и инновационная деятельность»; научные издания)

- электронная версия журнала доступна на платформе eLIBRARY.RU.

## График выхода журнала в течение текущего года

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

## Адрес редакции журнала:

630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 137 ВЦ, зам. гл. редактора – В. Ю. Скиба.

Тел.: Скиба В.Ю. (383) 346-17-79  
E-mail: [metal\\_working@mail.ru](mailto:metal_working@mail.ru)



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

## Тематика работы конференции:

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

## Официальный сайт конференции:

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



Рекламные материалы должны соответствовать тематике научно-технического и производственного журнала по машиностроению. Для размещения рекламы предоставляется площадь трех страниц обложки (цветная).

Цветная реклама на обложке (формат А4):

- 2 страница 18 000 руб.
- 3 страница 15 000 руб.
- 4 страница 20 000 руб.

