



Представительство в РФ и СНГ

**ПРОМЫШЛЕННЫЕ  
РЕШЕНИЯ**



**中国铸造协会  
CHINA FOUNDRY ASSOCIATION**

## ЛИТЬЕ МЕТАЛЛОВ

«Промышленные решения» при активном сотрудничестве и поддержке Китайской Литейной Ассоциации (CFA) занимается модернизацией и созданием новых литейных производств на территории РФ и стран СНГ, успешно совмещая производственные возможности ведущих предприятий и научно-исследовательской и инженерной базы Китая. Это позволяет нам предлагать клиентам проектные решения, отвечающие техническим, нормативным, качественным и другим требованиям, одновременно с этим повышающие экономическую привлекательность проекта.

- Отливки;
- Материалы;
- Оборудование;
- Технологии;
- Инжиниринг.

Официальный дилер по РФ и СНГ



**ПРОМЫШЛЕННЫЕ  
РЕШЕНИЯ**

# MUNZER

## СТАНКИ ДЛЯ МЕХАНООБРАБОТКИ С ЧПУ

MUNZER TECHNOLOGY Co., LTD является предприятием по производству, продаже и обслуживанию металлообрабатывающих станков с ЧПУ. Производственные базы расположены в Тайване и континентальном Китае. Предприятие тесно сотрудничает с немецким REXROTH, что позволило создать научно-исследовательскую и прикладную базу по проектировке и созданию линейных направляющих для компании MUNZER. Кроме того, в США был открыт Научно-исследовательский центр высокопроизводительных фрезерных станков с ЧПУ.

- Токарные станки с ЧПУ;
- Вертикальные обрабатывающие центры;
- Горизонтальные обрабатывающие центры;
- Зубофрезерные станки с ЧПУ;
- Портальные фрезерно-расточные станки;
- Портальные шлифовальные станки.



Официальный дилер по РФ и СНГ



**ПРОМЫШЛЕННЫЕ  
РЕШЕНИЯ**



**浦锐国际**

## ОБРАБОТКА ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА И ТРУБ

«Промышленные решения» в тесном сотрудничестве с PROTECH INTERNATIONAL осуществляют поставки оборудования для обработки листового металла и труб. Компании тесно сотрудничают с рядом надежных заводов в Тайване и континентальном Китае, а также подбирают технологии, с возможностью комплектования цеха «под ключ». Это позволяет подбирать оборудование любой сложности и для выполнения конкретных задач Заказчика, в т.ч. нестандартные решения. Опыт совместного посещения китайских заводов-изготовителей дает возможность познакомиться с передовыми технологиями производства при выборе оборудования.

- Станки для лазерной резки и лазерной сварки;
- Установки гидроабразивной/плазменной резки;
- Трубогибочное оборудование;
- Листогибочные прессы;
- Гильотины;
- Координатно-пробивные прессы;
- Валковые машины;
- Станки для полировки и шлифовки;
- Штамповочные прессы.



**ПРОМЫШЛЕННЫЕ  
РЕШЕНИЯ**

109316, Россия, Москва,  
Волгоградский пр., д. 46Б стр. 1, оф. 531  
Бизнес-центр "Волгоградский"

+7 (495) 128-33-77  
info@foundry-china.ru  
foundry-china.ru; is-stanki.ru

# ЛИТЬЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

2021 г., № 2

Ежеквартальный научно-производственный журнал.  
Выпускается на русском, с аннотацией на английском языке;  
распространяется в БЕЛАРУСИ, РОССИИ, УКРАИНЕ, ЛИТВЕ, КАЗАХСТАНЕ,  
ЧЕХИИ, ПОЛЬШЕ, ГЕРМАНИИ, ФРАНЦИИ.  
Журнал издается с января 1997 г.  
Выходит 4 раза в год

## УЧРЕДИТЕЛИ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск  
ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин  
Ассоциация литейщиков и металлургов, г. Минск  
ОАО «БЕЛНИИЛИТ», г. Минск  
ОАО «ГОМЕЛЬСКИЙ ЛИТЕЙНЫЙ ЗАВОД «ЦЕНТРОЛИТ», г. Гомель  
ГНУ «Институт технологии металлов Национальной академии наук  
Беларуси», г. Могилев  
ОАО «Минский тракторный завод», г. Минск  
ОАО «Могилевский металлургический завод», г. Могилев  
ОАО «Речицкий метизный завод», г. Речица

## ИЗДАТЕЛЬ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

## ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДСОВЕТА

*Харитончик С. В.*, д-р техн. наук, БНТУ, г. Минск, Беларусь

## ЗАМ. ПРЕДСЕДАТЕЛЯ РЕДСОВЕТА

*Марукович Е. И.*, акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор,  
ГНУ ИТМ НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь

## РЕДСОВЕТ

*Корчик Д. А.*, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,  
Беларусь  
*Хрусталева Б. М.*, акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., БНТУ,  
Беларусь  
*Николайчик Ю. А.*, канд. техн. наук, доцент, БНТУ, Беларусь  
*Самончик В. Г.*, ОАО «Речицкий метизный завод», Беларусь  
*Душко С. О.*, ОАО «ГОМЕЛЬСКИЙ ЛИТЕЙНЫЙ ЗАВОД «ЦЕНТРОЛИТ»,  
Беларусь

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

*Марукович Е. И.*, академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор,  
лауреат Госпремий БССР и РБ, Заслуженный изобретатель РБ

## РЕДАКЦИЯ

*Машканова С. В.*, редактор, БНТУ, Беларусь  
*Лебедев М. Н.*, компьютерная верстка, дизайн, БНТУ, Беларусь  
*Голосюк Н. В.*, менеджмент, БНТУ, Беларусь  
*Соболев В. Е.*, перевод, БНТУ, Беларусь

## ОСНОВАТЕЛЬ ЖУРНАЛА

*Кукуй Давид Михайлович*, д-р техн. наук, проф., лауреат Гос-  
премии БССР

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Марукович Е. И.*, главный редактор, акад. НАН Беларуси, д-р техн.  
наук, проф., ГНУ ИТМ НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь  
*Николайчик Ю. А.*, зам. главного редактора по литейному произ-  
водству, канд. техн. наук, доцент, БНТУ, г. Минск, Беларусь  
*Анелькин Н. И.*, зам. главного редактора по металлургии, ОАО  
«БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», Беларусь  
*Анисович А. Г.*, д-р физ.-мат. наук, ведущий науч. сотр., ГНУ ФТИ  
НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь  
*Гордиенко А. И.*, акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., ГНУ  
ФТИ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь  
*Дибров И. А.*, д-р техн. наук, проф., Российская ассоциация литей-  
щиков, г. Москва, Россия  
*Иванов И. А.*, д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь  
*Константинов В. М.*, д-р техн. наук, проф., БНТУ, Беларусь  
*Крамер Олаф. М.*, Heinrich Wagner Sinto Maschinenfabrik GmbH,  
Германия  
*Найдек В. А.*, акад. НАН Украины, д-р техн. наук, проф., ФТИ МиС  
НАН Украины, г. Киев, Украина  
*Немененок Б. М.*, д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь  
*Нофал А.*, проф., Центральный научно-исследовательский метал-  
лургический институт, г. Каир, Египет  
*Пантелеенко Ф. И.*, чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.,  
БНТУ, г. Минск, Беларусь  
*Поддубный А. Н.*, д-р техн. наук, г. Москва, Россия  
*Прушак В. Я.*, чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., ЗАО  
«Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным  
производством», г. Солигорск, Беларусь  
*Ровин С. А.*, д-р техн. наук, доцент, БНТУ, г. Минск, Беларусь  
*Садохва М. А.*, канд. техн. наук, доцент, БНТУ, г. Минск, Беларусь  
*Стеценко В. Ю.*, канд. техн. наук, ГНУ ИТМ НАН Беларуси, г. Мо-  
гилев, Беларусь  
*Томило В. А.*, д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь  
*Трусова И. А.*, д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь  
*Франашек Т.*, Польская ассоциация литейщиков, Польша  
*Хань Юйсинь*, Китайская литейная ассоциация, Китай  
*Чандл П.*, Furtenbach, Австрия  
*Чой Ки-Йонг*, проф., Республика Корея

## АДРЕС РЕДАКЦИИ

Беларусь, 220013, Минск, пр. Независимости, 65,  
тел.: (017) 292-74-75, тел./факс: (017) 331-11-16.  
E-mail: limrb@tut.by. Web: www.alimrb.by, www.lim.bntu.by

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь. Свидетельство о регистрации № 1244 от 31 мая 2012 г.

Подписано в печать 00.00.2021. Выход в свет 00.00.2021. Формат 60×84%. Цена свободная  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 15,1. Уч.-изд. л. 9,6. Тираж 150 экз. Заказ 000000  
Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014. 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65

Редакция не несет ответственности за содержание рекламных объявлений.  
Журнал «Литье и металлургия» включен в Перечень научных изданий Респу-  
блики Беларусь, DOAJ, РИНЦ.

# FOUNDRY PRODUCTION AND METALLURGY

2021, no. 2

Quartely Journal

Issued in Russian with annotations in English.

Foundry Production and Metallurgy Journal is distributed throughout Belarus, Russia, the Ukraine, Kazakhstan, Baltic States, Czech Republic, Slovakia, Poland, Germany and France.

The Journal has been published since January 1997.

Issued four times a year.

## FOUNDERS

Belarusian National Technical University, Minsk  
OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», Zlobin  
Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Minsk  
OJSC «BELNIIIT», Minsk  
OJSC «Gomel Foundry Plant «TSENTROLIT», Gomel  
State scientific institution «Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus», Mogilev  
OJSC «Minsk Tractor Works», Minsk  
OJSC «Mogilev Metallurgical Works», Mogilev  
OJSC «Rechitsa Metzizny Plant», Rechitsa

## PUBLISHER

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

### CHAIRMAN OF EDITORIAL COUNCIL

*Kharitonchik S. V.*, Dr. of Engineering Science, BNTU, Minsk, Belarus

### DEPUTY CHAIRMAN OF THE EDITORIAL COUNCIL

*Marukovich E. I.*, Academician of NAS of Belarus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Institute of Technology of Metals of NAS of Belarus, Mogilev, Belarus

### EDITORIAL COUNCIL

*Korchik D. A.*, OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», Zhlobin, Gomel Region, Belarus

*Khrustalev B. M.*, Academician of NAS of Belarus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, BNTU, Minsk, Belarus

*Nikalaichyk Yu. A.*, Ph. D in Technical Sciences, Associate Professor, BNTU, Minsk, Belarus

*Samonchik V. G.*, OJSC Rechitsa Metzizny Plant, Rechitsa, Belarus

*Dushko S. O.*, OJSC Gomel Foundry Plant «TSENTROLIT», Gomel, Belarus

### CHIEF EDITOR

*Marukovich E. I.*, Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Laureate of State Prizes of BSSR and RB, Honoured Inventor of the Republic of Belarus

### EDITORIAL STAFF

*Mashkanova S. V.*, Editor, BNTU, Minsk, Belarus

*Lebedev M. N.*, Computer layout, Design, BNTU, Minsk, Belarus

*Halasiuk N. V.*, Management, BNTU, Minsk, Belarus

*Sobolev V. E.*, Translation, BNTU, Minsk, Belarus

### FOUNDER OF THE JOURNAL

*Kukuj David Mikhailovich*, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Laureate of State Prize of BSSR

## EDITORIAL BOARD

*Marukovich E. I.*, Chief Editor, Academician of NAS of Belarus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Institute of Technology of Metals of NAS of Belarus, Mogilev, Belarus

*Nikalaichyk Yu. A.*, Deputy Chief Editor for Foundry, Ph.D in Technical Sciences, Associate Professor, BNTU, Minsk, Belarus

*Anel'kin N. I.*, Deputy Chief Editor for Metallurgy, OJSC «BSW – Management Company of the Holding «BMC», Zhlobin, Gomel Region, Belarus

*Anisovitch A. G.*, Dr. of Physical-Math Sciences, Physical-Technical Institute of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus

*Gordienko A. I.*, Academician of NAS of Belarus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Physical-Technical Institute of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus

*Dibrov I. A.*, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Russian Foundry Association, Moscow, Russia

*Ivanov I. A.*, Dr. of Engineering Sciences, Professor, BNTU, Minsk, Belarus

*Konstantinov V. M.*, Dr. of Engineering Sciences, Professor, BNTU, Minsk, Belarus

*Kramer Olaf M.*, HEINRICH WAGNER SINTO Maschinenfabrik GmbH, Germany

*Naidek V. L.*, Academician of NAS of Ukraine, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Physical-Technological Institute of NAS of Ukraine, Kiiv, Ukraine

*Nemenenok B. M.*, Dr. of Engineering Sciences, Professor, BNTU, Minsk, Belarus

*Nofal A.*, Professor, Central Metallurgical R&D Institute, Cairo, Egypt

*Panteleenko F. I.*, Corresponding Member of NAS of Belarus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, BNTU, Minsk, Belarus

*Poddubnij A. N.*, Dr. of Engineering Sciences, Moscow, Russia

*Pruschak V. Ia.*, Corresponding Member of NAS of Belarus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, CJSC Soligorsk Institute of Problems of Resource Saving with Pilot Production, Soligorsk, Belarus

*Rovin S. L.*, Dr. of Engineering Sciences, Associate Professor, BNTU, Minsk, Belarus

*Sadokha M. A.*, Ph.D in Technical Sciences, Associate Professor, BNTU, Minsk, Belarus

*Stetsenko V. Yu.*, Ph.D in Technical Sciences, Institute of Technology of Metals of NAS of Belarus, Mogilev, Belarus

*Tomilo V. A.*, Dr. of Engineering Sciences, Professor, BNTU, Minsk, Belarus

*Trusova I. A.*, Dr. of Engineering Sciences, Professor, BNTU, Minsk, Belarus

*Franaszek T.*, Polish Foundrymen's Association, Krakow, Poland

*Han Yuxin*, China Foundry Association, China

*Tschandl P.*, FURTENBACH, Austria

*Choi Ki-Jong*, Professor, Republic of Korea

### ADDRESS OF EDITORIAL STAFF

Nezavisimosti ave., 65, 220013, Minsk

Tel.: (017) 292-74-75, Tel./fax (017) 331-11-16,

E-mail: limrb@tut.by Web: www.alimrb.by, www.lim.bntu.by

The Journal is registered in the Ministry of information of the Republic of Belarus. Certificate of registry No 1244 dated May 31, 2012.

Format 60×84%. Free price. Offset paper. Digital printing.

Base print pages 15,1. Account. publ. pages 9,6. Circulation 150 copies. Order 000000.

Printed in BNTU. Permit LP No 02330/74 dated 03.03.2014. 65, Nezavisimosti ave., Minsk, 220013

## СОДЕРЖАНИЕ

Подписной индекс 75034

Давыд Михайлович Кукуй. Мы помним. 1946–2014 .....	8
<b>С ЮБИЛЕЕМ</b>	
Харитончик С. В. (к 50-летию со дня рождения) .....	18
Одарченко Б. В. (к 80-летию со дня рождения) .....	20
Ровин Л. Е. (к 80-летию со дня рождения) .....	21
Шелег В. К. (к 75-летию со дня рождения) .....	22
<b>ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО</b>	
Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., ГНУ ИТМ НАН Беларуси, Стеценко А. В., МОУ ВО «Белорусско-Российский университет» Наноструктурная кристаллизация металлов .....	23
Лисовой А. А., Ткаченко И. С., Худешенко А. Н., ООО «Завод АКС», Россия Импортозамещающее оборудование для ЛГМ-процесса .....	27
Волков Д. А., Волков А. Д., Ефименко А. В., ОАО «БЕЛНИИЛИТ» Исследование технологических параметров стержневых отливок при литье в облицованный кокиль.....	32
Витязь П. А., НАН Беларуси, Свидунович Н. А., Куис Д. В., БГТУ, Николайчик Ю. А., Ровин С. Л., БНТУ Модифицирование литейных сплавов наноструктурированными материалами .....	37
<b>МЕТАЛЛУРГИЯ</b>	
Казаков А. А., Киселев Д. В., Казакова Е. И., ООО «Тиксомет», Россия Количественные методы оценки микроструктуры стали и сплавов для пересмотра устаревших ГОСТ .....	42
Змеева Н. А., Винокурова О. Ю., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Опτικο-эмиссионной метод спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой определения массовой концентрации фосфора в водно-масляной эмульсии .....	49
Глазунова Н. А., Потапенко Ю. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Влияние работы установки гидросбива на качество поверхности проката .....	54
Лежнев С. Н., Найзабеков А. Б., Волокитина И. Е., Рудненский индустриальный институт, Казахстан, Панин Е. А., Карагандинский индустриальный университет, Казахстан, Куис Д. В., БГТУ Рециклинг пруткового лома нержавеющей металлов радиально-сдвиговой прокаткой с получением в нем градиентной ультрамелкозернистой структуры .....	61
<b>МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ</b>	
Иванов И. А., Слуцкий А. Г., Шейнерт В. А., Иванов А. И., Белый А. Н., БНТУ Изготовление катодов-мишеней из композиционных силицидов для нанесения защитных покрытий с применением литейно-деформационной технологии .....	68
Анисович А. Г., Ласковнев А. П., Маркевич М. И., Малышко А. Н., ГНУ ФТИ НАН Беларуси, Журавлева В. И., Военная академия Республики Беларусь Получение наночастиц кремния и алюминия в водном растворе .....	76
Исагулов А. З., Квон Св. С., Куликов В. Ю., Достоева А. М., Щербакова Е. П., Карагандинский техниче- ский университет, Казахстан, Ковалев П. В., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия Повышение износостойких свойств стали 30X3MФ дополнительным микролегированием .....	81

<b>Урбанович Н. И., Барановский К. Э., Розенберг Е. В.,</b> БНТУ, <b>Ашуйко В. А., Матыс В. Г.,</b> БГТУ, <b>Волосюк В. Ф.,</b> ООО «Гальварекс», <b>Печерский А. Ф.,</b> ОАО «РМЗ»	
Анализ способов получения цинксодержащих покрытий с применением отходов производства горячего цинкования .....	87
<b>Ушеренко С. М., Дашкевич В. Г., Ушеренко Ю. С.,</b> БНТУ	
Активация диффузии при формировании на поверхности стальных деталей боридных слоев .....	94
<b>Бердиев Д. М., Юсупов А. А.,</b> Ташкенский государственный технический университет, Узбекистан	
Повышение износостойкости стальных изделий методом нестандартных режимов термической обработки .....	100

#### ОХРАНА ТРУДА

<b>Прибылов А. В.,</b> УП «Промышленные экологические системы», <b>Шаповалов Ю. П.,</b> ООО «Газочистка инжиниринг», <b>Глушень Е. М.,</b> Институт микробиологии НАН Беларуси	
Опыт применения абсорбционно-биохимических установок для очистки вентиляционных выбросов в литейном производстве .....	105

#### ДИСКУССИЯ

<b>Сазоненко И. О.,</b> г. Могилев, <b>Сапон В. И.,</b> г. Минск	
Относительность: фотон .....	109
<b>Поэтическая страничка</b> .....	120
Памяти <b>Беха Н. И.</b> .....	121

## CONTENTS

Subscription 75034

<b>Davyd Mikhailovich Kukui. We remember. 1946–2014</b> .....	8
---	---

## HAPPY ANNIVERSARY

<b>Kharitonchik S.V.</b> (on the 50th Anniversary) .....	18
<b>Odarchenko B.V.</b> (on the 80th Anniversary) .....	20
<b>Rovin L.E.</b> (on the 80th Anniversary) .....	21
<b>Sheleg V.K.</b> (on the 75th Anniversary) .....	22

## FOUNDRY

<b>Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu.,</b> Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, <b>Stetsenko A.V.,</b> Belarusian-Russian University Nanostructural crystallization of metals .....	23
<b>Lisovoi A.A., Tkachenko I.S., Khudeshenko A.N.,</b> LLC “AKS Plant”, Russia Import- substituting equipment for the lost form casting process .....	27
<b>Volkov D.A., Volkov A.D., Efimenko A.V.,</b> OJSC “BELNIILIT” Investigation of the technological parameters of cored castings when in a lined coquille .....	32
<b>Vitiaz P.A.,</b> National Academy of Sciences of Belarus, <b>Svidunovich N.A., Kuis D.V.,</b> Belarusian State Technological University, <b>Nikalaichyk Yu.A., Rovin S.L.,</b> Belarusian National Technical University Modification of cast alloys nanostructured materials .....	37

## METALLURGY

<b>Kazakov A.A., Kiselev D.V., Kazakova E.I.,</b> LLC “Tiksomet”, Russia Quantitative methods for assessing the microstructure of steel and alloys for revising outdated GOST standards .....	42
<b>Zmeeva N.A., Vinokurova O. Yu.,</b> OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC” Optical-emission spectrometry method with inductively coupled plasma for determining the mass concentration of phosphorus in an oil-water emulsion .....	49
<b>Glazunova N.A., Potapenko Yu. A.,</b> OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC” Influence of the hydraulic pump unit on the quality of the rolled surface .....	54
<b>Lezhnev S.N., Naizabekov A.B., Volokitina I.E.,</b> Rudny Industrial Institute, Kazakhstan, <b>Panin E.A.,</b> Karaganda Industrial University, Kazakhstan, <b>Kuis D.V.,</b> Belarusian State Technological University Recycling of stainless steel bar scrap by radial-shear rolling to obtain an ultrafine-grained gradient structure .....	61

## SCIENCE OF MATERIALS

<b>Ivanov I.A., Slutsky A.G., Scheinert V.A., Ivanov A.I., Bely A.N.,</b> Belarussian National Technical University Production of target cathodes from composite silicides for applying protective coatings using casting and deformation technologies .....	68
<b>Anisovich A.G., Laskovnev A.P., Markevich M.I., Malyshko A.N.,</b> Physical-Technical Institute of the National Academy os Sciences of Belarus, <b>Zhuravleva V.I.,</b> Military Academy of the Republic of Belarus Preparation of silicon and aluminum nanoparticles in an aqueous solution .....	76

<b>Issagulov A.Z., Kvon Sv.S., Kulikov V. Yu., Dostaeva A.M., Shcherbakova E.P.</b> , Karaganda Technical University, Kazakhstan, <b>Kovalev P.V.</b> , Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia Improvement of wear-resistant properties of steel 30H3MF with additional microalloying .....	81
<b>Urbanovich N.I., Baranovsky K.E., Rozenberg E.V.</b> , Belarusian National Technical University, <b>Ashuiko V.A., Matys V.G.</b> , Belarusian State Technological University, <b>Volosyuk V.F.</b> , OJSC “Galvarex”, <b>Pecherskiy A.F.</b> , OJSC “Rechitsa Metizny Plant” Analysis of methods for obtaining zinc-containing coatings using hot-dip galvanizing production waste .....	87
<b>Usherenko S.M., Dashkevich V.G., Usherenko Yu.S.</b> , Belarusian National Technical University Activation of diffusion during the formation of boride layers on the surface of steel parts .....	94
<b>Berdiev D.M., Yusupov A.A.</b> , Tashkent State Technical University named after I. Karimov, Uzbekistan Improving the wear resistance of steel products by using non-standard heat treatment modes .....	100

#### PROTECTION OF LABOUR

<b>Pribylov A.V.</b> , UE “Industrial ecological systems”, <b>Shapovalov Yu. P.</b> , LLC “Gas treatment engineering”, <b>Glushen E.M.</b> , Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus Experience in the use of absorption and biochemical installations for cleaning ventilation emissions in foundry production .....	105
--	-----

#### DISCUSSION

<b>Sazonenko I.O.</b> , Mogilev, <b>Sapon V.I.</b> , Minsk Relativity: photon .....	109
<b>Poetic page</b> .....	120
In memory of Bekh N. I. ....	121

## ДАВЫД МИХАЙЛОВИЧ КУКУЙ. МЫ ПОМНИМ (1946 – 2014)

2 июня 2021 г. исполнилось бы 75 лет со дня рождения заведующему кафедрой «Машины и технология литейного производства» МТФ БНТУ, доктору технических наук, профессору, лауреату Госпремии БССР, председателю Ассоциации литейщиков и металлургов РБ, главному редактору журнала «Литье и металлургия» Давыду Михайловичу Кукую.

Вся жизнь Давыда Михайловича Кукуя со дня поступления на первый курс специальности «Машины и технология литейного производства» в 1964 году и до трагической гибели в августе 2014 года была неразрывно связана с кафедрой. Эти 50 лет вобрала в себя учебу в институте (1964–1969 гг.), аспирантуру и защиту кандидатской диссертации (1974 г.), участие в организации первой кафедральной научно-исследовательской лаборатории и почти 10 лет руководства ее работой, подготовку и защиту докторской диссертации (1987 г.), избрание на должность заведующего и бессменное, в течение 26 лет, руководство кафедрой (1988–2014 гг.), создание и руководство Белорусской ассоциацией литейщиков и металлургов (с 1991 г.), организацию первой в Независимой Беларуси международной конференции литейщиков «Эколит-93», проходившей под эгидой Европейской экономической комиссии ООН, а затем ежегодную подготовку и проведение ставших уже традиционными МНТК «Литейное производство и металлургия. Беларусь», создание национального ежеквартального научно-производственного журнала «Литье и металлургия» (1997 г.) и еще множество важнейших событий как в жизни кафедры, так и в жизни всего сообщества белорусских литейщиков и металлургов.

Еще в студенческие годы Давыд Михайлович занялся исследовательской работой, связанной с оптимизацией и разработкой новых составов жидкостекольных самоотвердеющих смесей. В этот период им были опубликованы первые статьи и получено первое авторское свидетельство. Именно это направление стало одним из основных в его будущей научной работе. Давыд Михайлович является автором более 300 научных работ, в том числе 3 монографий, 4 учебников, более 120 авторских свидетельств и зарубежных патентов, 10 учебно-методических пособий. Результаты его научно-исследовательской работы получили высокую оценку и признание как в научной среде, так и на промышленных предприятиях отрасли. Его работы награждались золотой и дважды бронзовыми медалями ВДНХ СССР, трижды дипломами ВДНХ БССР. В 1990 году за разработку и внедрение эффективных технологических процессов получения отливок Д. М. Кукуй был удостоен звания лауреата Государственной премии БССР.

Давыд Михайлович возглавил кафедру в непростое время – в стране началась перестройка, стремительная смена эпох, за которой последовал развал СССР, разрыв устоявшихся связей. В вихре перемен резко упали зарплаты преподавателей, практически исчезла государственная поддержка вузовской науки, снизились объемы производства и финансирование научно-исследовательских работ со стороны промышленных предприятий. Однако огромная трудоспособность и талант руководителя, поддержка сплоченного и дружного коллектива, который сложился к тому времени, позволили Давыду Михайловичу не только сохранить кафедру, но и привнести в ее работу новые научные направления, расширить сферу ее интересов и международные связи. На кафедре постоянно поддерживалась творческая атмосфера и поощрялась инициатива, состав кафедры пополнялся ее лучшими учениками и талантливыми выпускниками других вузов.



Д. М. Кукуй постоянно генерировал новые идеи и находил блестящие решения как в научной, так и педагогической работе. Благодаря его энергии и выдающимся организаторским способностям на ведущих предприятиях страны, в том числе на ОАО «БМЗ», ОАО «МТЗ», ОАО «Гомельский литейный завод «Центролит», Филиал ЗАО «Атлант» – Барановичский станкостроительный завод, ОАО «БЕЛНИИ-ЛИТ» и в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, были созданы филиалы кафедры. Несмотря на проблемы с финансированием, Д. М. Кукую удалось обновить лабораторное оборудование и переоборудовать кафедральные аудитории, оснастив их современной компьютерной и мультимедийной техникой. По его инициативе кафедра взяла на себя преподавание предметов по информационным технологиям начиная от информатики и основ компьютерного проектирования, завершая математическим моделированием и САПР технологических процессов изготовления отливок. В результате была организована целенаправленная подготовка чрезвычайно востребованных на предприятиях инженеро-литейщиков (конструкторов и технологов), свободно владеющих инженерными программами компьютерного моделирования литейных процессов и проектирования отливок и модельной оснастки. Большое внимание Давыд Михайлович уделял подготовке не только инженеров, но и специалистов высшей квалификации – кандидатов и докторов наук. Под руководством Д. М. Кукуя на кафедре было подготовлено и защищено 18 кандидатских и 3 докторских диссертации (В. Ф. Соболев – 1992 г., А. Н. Чичко и С. С. Гурин – 1995 г.). За активную педагогическую деятельность и высокие достижения в подготовке научных и инженерных кадров в 1990 году Давыду Михайловичу было присвоено ученое звание профессора, он неоднократно награждался Почетными грамотами БПИ, БГПА, БНТУ, был награжден Почетной грамотой Министерства образования и знаком «Отличник образования Республики Беларусь», Почетными грамотами Министерства промышленности Республики Беларусь и Национальной академии наук Беларуси, а в 2006 году был удостоен персональной надбавки Президента за выдающийся вклад в социально-экономическое развитие страны.



Коллектив преподавателей кафедры МиТЛП – победители соревнования БГПА (1996 г.)

Помимо научно-исследовательской и педагогической деятельности, профессор Д. М. Кукуй выполнял огромную общественную работу. В 1991 году он был избран президентом Белорусской ассоциации литейщиков и металлургов, объединяющей более 60 организаций и свыше 2 тысяч индивидуальных членов, а после ее реорганизации в Белорусское объединение литейщиков и металлургов (БелОЛМ, сегодня Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь) в 1994 году в течение 20 лет переизбирался его председателем. В январе 1997 года под его руководством начался выпуск ежеквартального научно-производственного журнала «Литье и металлургия», входящего в списки ВАКовских изданий Беларуси, России, Казахстана и Украины. Почти 17 лет Давыд Михайлович был главным редактором этого журнала, который стал одним из лучших профессиональных журналов не только на постсоветском пространстве, но и в странах Восточной Европы. Д. М. Кукуй являлся членом экспертного совета ВАК РБ, членом НТС Минпрома Республики Беларусь, заместителем председателя координационного совета ГНТППИ «Металлургия», членом ученого Совета БНТУ.

Давыд Михайлович активно умножал и укреплял международные связи кафедры, координировал международную деятельность Ассоциации литейщиков и металлургов и журнала «Литье и металлургия». В конце 90-х годов он инициировал организацию на кафедре новой специализации «Международный маркетинг и менеджмент в металлургическом производстве». За время его руководства расширились международные контакты с коллегами из Польши, Чехии, Словакии, Германии, Австрии, Китая, преподаватели и сотрудники стали постоянными участниками различных международных форумов, а студенты регулярно проходили практику на зарубежных предприятиях. Благодаря его кипучей энергии, умению вести диалог с государственными и общественными организациями, заводами и компаниями, обширным международным связям Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь стала членом Всемирной ассоциации литейщиков (WFO), а в 1993 году впервые в Независимой Беларуси удалось организовать крупнейший международный семинар, посвященный проблемам литейного производства и экологии, – «Эколит-93», проходивший под эгидой Европейской экономической комиссии ООН и собравший более 300 участников из 18 стран мира.



Открытие конференции и выставки «Эколит-93»

Этот исторический форум послужил своеобразным началом проведения ставших сегодня традиционными ежегодных МНТК «Литейное производство и металлургия. Беларусь», которые из года в год неизменно вызывают большой интерес не только в Беларуси и соседних странах, но также у специалистов из стран Европы и Ближнего Востока, Египта и Турции, Индии и Китая, США и Южной Кореи. В 2014 году Давыд Михайлович Кукуй был избран членом Исполнительного комитета Всемирной Ассоциации литейщиков.

Давыд Михайлович был настоящим ученым и великолепным руководителем, обладал огромной энергией и выдающимися организаторскими способностями, всегда был корректен и доброжелателен в общении с коллегами и внимателен к подчиненным, пользовался заслуженным авторитетом и уважением среди специалистов и ученых, коллег и студентов.

22 августа 2014 года оборвалась жизнь великолепного организатора и руководителя, блестящего ученого, замечательного инженера и учителя, достойного человека, но он и его дела навсегда останутся в нашей памяти.

С. Л. Ровин, зав. кафедрой «МиТЛП»,  
д-р техн. наук, доцент

## ВОСПОМИНАНИЯ КОЛЛЕГ, ДРУЗЕЙ, УЧЕНИКОВ О ДАВЫДЕ МИХАЙЛОВИЧЕ КУКУЕ

### НАМ ПРО ТЕБЯ НЕ СУЖДЕНО ЗАБЫТЬ

Давыд Михайлович Кукуй – известный педагог и ученый, крупный специалист в области литейного производства. Это мы знаем теперь. И всегда Давыд Михайлович Кукуй был одной из самых ярких фигур на кафедре «МиТЛП». Его учебники, научные идеи имеют большой спрос до сих пор среди студентов, аспирантов и специалистов в области металлургии. Чем объяснить этот успех? Давыд Михайлович неразрывно связывал научно-исследовательские идеи и производство. В свои работы и работы своих учеников Давыдом Михайловичем были включены самые современные методы исследования, компьютерные технологии, математические расчеты. Он был наделен даром быть другом и добрейшим человеком.

Самые счастливые годы, которые выпали на мою долю, это время аспирантуры. Давыд Михайлович знал меня со студенческих лет. Он следил за моими первыми научными студенческими работами, помогал советами, подсказывал как провести эксперимент. Каждый раз я приходила на кафедру, как на праздник. И это со второго курса. Добрые отношения на кафедре помогали в работе.

Мне хочется вспомнить молодые годы Давыда Михайловича, когда он формировался как заведующий кафедрой «Машины и технология литейного производства».

В науку Давыд Михайлович пришел рано, со студенческой скамьи. Вдохнул эту любовь к литейному производству наш общий учитель, доцент Абрам Моисеевич Милов. Наш учитель был автором многих ноу-хау. И мы шли за ним.

Давыд Михайлович в свои 30 с небольшим лет уже помогал аспирантам. Мне посчастливилось, я была у него первой аспиранткой. Давыд Михайлович поддерживал творческие научные связи с ведущими предприятиями нашей страны, а также с научно-исследовательскими и учебными институтами. Обладая глубокими знаниями и эрудицией, он имел огромное количество печатных работ, в числе которых монографии, учебники, авторские свидетельства.

Давыд Михайлович был лишь на 4 года старше меня, а уже руководил и организовал мою научно-исследовательскую работу. Он был инициатором многих исследований в моей диссертационной работе. Давыд Михайлович познакомил меня с учеными Академии наук Республики Беларусь. Это было очень важно. Он ввел меня в мир науки.

В процессе исследований мы сталкивались со случайными явлениями и устанавливали их закономерности. Так, при получении модифицированного жидкого стекла был обнаружен значительный рост скорости растворения силиката в 2 раза. Идея проведения опыта принадлежала Давыду Михайловичу. Впоследствии это вылилось в совместные изобретения и внедрения на заводах «Центролит» по всему СССР. Давыд Михайлович знакомил меня с предприятиями, мы вместе занимались внедрением и получали огромные экономические эффекты.

Важным событием в жизни преподавателей, сотрудников и студентов кафедры «Машины и технология литейного производства» стало заседание кафедры, где Давыда Михайловича Кукуя избирали на должность заведующего кафедрой. Выступали профессора, доценты. Все отмечали высокие научные достижения Давыда Михайловича, его трудолюбие и большие связи с производством, его организаторские способности.

Я никак не могла подумать, что слово предоставят мне, аспирантке Давыда Михайловича. Это было неожиданностью. И я произнесла: «Он для меня Бог». И все... Все заулыбались.

Мы помним Давыда Михайловича как человека, наделенного такими прекрасными качествами, как «креатив» и «харизма». Он был генератором новейших идей, с невероятной чуткостью, улавливающим пульс времени и умевшим создать единственно необходимое здесь и сейчас. Например, открытие новых специализаций: «Экономика», «Моделирование литейных процессов» и т.д.

Неотразимое и сокрушительное природное обаяние вообще ставили Д.М. Кукуя вне конкуренции, вызывали доверие к его слову.

Учителей своих не позабуду,  
Учителям своим не изменю.  
Они меня напутствуют оттуда,  
Где нету смены вечеру и дню.  
(А. Дементьев)

И. Н. Ушакова, канд. техн. наук,  
доцент кафедры «Охрана труда» БНТУ

## 50 ЛЕТ ДРУЖБЫ И СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ



Д. М. Кукуй 1988 г.

С Д. М. Кукуем я познакомился 1968 году при поступлении в институт. Он в это время уже закончил вуз и поступил в аспирантуру. Более близкое знакомство произошло через два года, когда я, будучи студентом, начал участвовать в выполнении кафедральных хоздоговорных работ под его руководством. Постепенно наше знакомство переросло в дружбу. Д. М. Кукуй, в это время уже работал над диссертацией, которую успешно защитил в 1974 г.

Больше 50 лет мы проработали вместе на кафедре и в кафедральной научно-исследовательской лаборатории. За эти годы были выполнены сотни договоров со многими заводами и институтами бывшего СССР начиная со стран Прибалтики: Каунасский завод «Центролит», Эстонский институт сланцев в городе Кохтла-Ярве, Рижский вагоностроительный завод. Большую работу проводили на Киевском заводе «Большевик» при внедрении новых составов формовочных смесей и дру-

гих решений, направленных на повышение качества чугунных отливок. Вспоминаются длительные командировки в Северо-Восточный Казахстан в город Усть-Каменогорск, где мы провели в общей сложности более полугода. Большую работу мы выполнили на Руставском и Липецком заводах «Центролит», где внедряли разработанные составы формовочных смесей.

Запомнились командировки в Армению в г. Чаренцаван. Там во время экскурсии на горнолыжный курорт произошел очень комичный случай. Давид был высокого роста и имел большой размер обуви. Когда мы по канатной дороге поднялись вверх, он поскользнулся и прямо в ботинках поехал вниз. Проехал метров 100, но на ногах удержался и не упал. Однако, пытаясь удержать равновесие, он так жестикулировал, что после остановки его брюки были разорваны и держались только на ремне. Только его отличная физическая подготовка и вестибулярный аппарат позволили избежать серьезной травмы, и все обошлось лишь смехом товарищей и порванными штанами.

Вспоминаю, когда он готовился к защите докторской диссертации, мы ему нарисовали более ста листов иллюстрационных плакатов формата А1, непрерывно что-то поправляя, чтобы представляемый диссертационный материал был более доступным для понимания.



Коллектив кафедральной научно-исследовательской лаборатории «Материаловедение и технология литейного производства». 1982 г.

Большую помощь мне оказал Давыд Михайлович при подготовке диссертации, хотя официально он и не был моим руководителем. Даже организовал вечер после моей защиты у себя дома, что было большой проблемой во время «сухого закона».

Мы вместе с ним работали практически на всех белорусских заводах, где были литейные цеха, и решали самые разные, казалось, на первый взгляд, неразрешимые производственные задачи.

После того, как Е. И. Бельский закончил руководить кафедрой в 1988 г., на должность заведующего кафедрой единогласно был избран Давыд Михайлович. За время его руководства кафедра стала ведущей кафедрой вуза, наш коллектив стал более сплоченным, а отношения – по-настоящему дружескими. За все время его заведования кафедрой мы не слышали от него ни одного плохого и грубого слова. Он всегда был доброжелательным человеком, абсолютно корректным и с сотрудниками кафедры, и со студентами.

В. А. Скворцов (выпускник 1972 г.),  
канд. техн. наук, доцент кафедры «МиТЛП»

---

## ПАМЯТИ НАСТАВНИКА И УЧИТЕЛЯ

2 июня 2021 года исполняется 75 лет со дня рождения д-ра техн. наук, профессора Д. М. Кукуя. Давыд Михайлович – уникальная и выдающаяся личность для нашей эпохи. Он, на своем личном примере показал, как в одном человеке, в своем лучшем качестве могут одновременно сочетаться педагог и наставник, ученый и инженер, креативный менеджер и высокопрофессиональный руководитель. Это человек, который безумно любил свою профессию, жил и болел за литейное производство, решая все вопросы, связанные с литейным делом, начиная от непрерывного совершенствования системы подготовки кадров (инженеров-литейщиков, аспирантов и докторантов, переподготовки уже работающих специалистов и др.), постановки и реализации уникальных научных исследований для литейного производства и металлургии нашей страны, и заканчивая внедрением новых технологических процессов и модернизацией действующих производств. Задачи, которые ставил Давыд Михайлович, являются актуальнейшими и сегодня.

Огромное спасибо, Давыд Михайлович, что мне повезло учиться у Вас и работать вместе с Вами. Светлая память о Вас останется навсегда!

Ю. А. Николайчик, канд. техн. наук, доцент,  
проректор по учебной работе БНТУ

---

На протяжении многих лет предприятие ОАО «ГЛЗ «ЦЕНТРОЛИТ» связывают крепкие и теплые отношения с Ассоциацией литейщиков и металлургов Республики Беларусь, во главе которой долгие годы стоял Давыд Михайлович Кукуй.

Каждый год Ассоциация литейщиков и металлургов проводит международные научно-технические конференции «Литейное производство и металлургия. Беларусь», инициатором и организатором которых был Давыд Михайлович Кукуй. Не стал исключением и 2008-й год. По предложению Д. М. Кукуя в 2008 году очередная конференция проходила в г. Гомеле. Проведение этой конференции было не случайным. В это время одному из крупнейших предприятий в области литейного производства и металлургии Республики Беларусь ОАО «Гомельский литейный завод «Центролит» исполнилось 40 лет. Это событие в жизни завода надолго осталось в памяти специалистов-литейщиков и гостей конференции.

По рекомендациям и при содействии Давыда Михайловича была проведена модернизация участка приготовления формовочной смеси в цехе крупного литья, за что огромная ему благодарность.

Немало специалистов-литейщиков, вышедших с кафедры «МиТЛП БНТУ», руководимой Давыдом Михайловичем, работали и продолжают работать на нашем заводе.

Он настоящий человек, талантливый ученый, взрастивший и давший дорогу в жизнь большому количеству молодых специалистов. Спасибо ему за все.

С. О. Душко,  
директор ОАО «ГЛЗ «ЦЕНТРОЛИТ»

---

Давыд Михайлович Кукуй был по-настоящему профессионалом своего дела. Студенты с большим вниманием и интересом слушали лекции Давыда Михайловича, изучали специальность по его книгам. Он заложил фундамент и дал нам знания, которые позволили успешно работать по специальности и реализовывать себя в профессиональной деятельности. Д. М. Кукуй подготовил и выпустил множество талантливых специалистов, ученых, которые в настоящее время приносят огромную пользу белорусской промышленности и науке. Только самые теплые воспоминания об этом человеке останутся у его выпускников.

В. И. Чечуха, главный металлург  
ОАО «ММЗ имени С. И. Вавилова –  
управляющая компания холдинга «БелОМО»

### УРЫВАК З КНІГІ АЛЕСЯ КЛЫШКІ «...КРОПКА» МІНСК, «СМЭЛТАК», 2021 г.

Алесь Клышка згадвае, што пад кіраўніцтвам трэнэра Ігара Пруднікава разам зь нязвычайным капітанам студэнцкай каманды і партнэрам па абароне Давідам Кукуем двойчы гулялі ў фінале футбольнага першынства СССР сярод студэнцкіх камандаў – у Варонежы і Харкаве ў 1967 і 1968 г. Нягледзячы на тое, што каманды супернікаў з Масквы, Ленінграду, іншых рэспублік часьцяком былі ўзмоцненыя «студэнтамі», якія выступалі ў вышэйшай лізе саюзнага чэмпіянату, удалася замацоўвацца на высокіх пазыцыях:

«З удзячнасьцю згадваю нашу каманду БПІ, якая на ўзроўні рэспублікі ня раз становілася чэмпіёнам і прызэрам студэнцкіх першынстваў. Гонар інстытуту ў той час (1966–1971) абаранялі студэнты фактычна аднаго нашага факультэту. Найперш Валер Філатаў, які праз колькі часу стаў майстрам спорту, чальцом зборнай СССР, выступаў за каманду «Тарпэда» (Масква), доўгі час быў прэзыдэнтам маскоўскага «Лякаматыву». Абаронца Віктар Кірсанаў, які ўжо тады ўваходзіў у склад юнацкай зборнай СССР. Генадзь Глеб, выдатны паўабаронца, гуляў за «Кайрат» (Алма-Ата). Галкіпэр, майстар спорту Аляксандар Міланін, Валеры Сінцоў, Васіль Ільін, Уладзімер Дрыга – у 1960-х усе яны гулялі за розныя каманды ў чэмпіянаце СССР, Мікалай Іваніцкі у «Тарпэда» (Мінск), Давід Кукуй у «Маторы» (Мінск)».



Студэнцкі футбол: уладальнікі Кубка г. Мінска каманда МТФ БПІ. 1968 г.

Першы рад: Уладзімір Дрыга, Валеры Сінцоў, Анатоль Глеб, Васіль Ільін, Мікалай Іваніцкі.  
Другі рад: Генадзь Сяліцкі, Давід Кукуй, Уладзімір Кучмель, Валеры Філатаў, Валеры Бельдэйка,  
Валянцін Кірсанаў, Алесь Клышка, Генадзь Казлоў



Кафедра «Машыны і тэхналогія ліцейнай вытворчасці» (лепшая кафедра МТФ 1983 г.)

Першы рад (злева направа):

Трусаў, Таццяна Майорава, Роза Канстанцінаўна Свяцільнікава (сакратар),  
Уладзімір Антонавіч Казлоўскі, Павел Пятровіч Навічкоў,

Другі рад (злева направа):

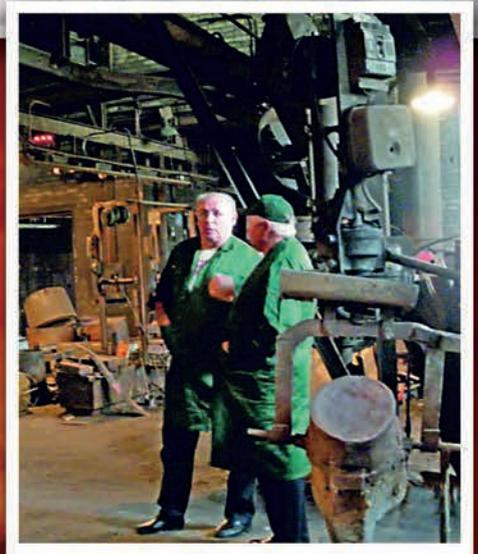
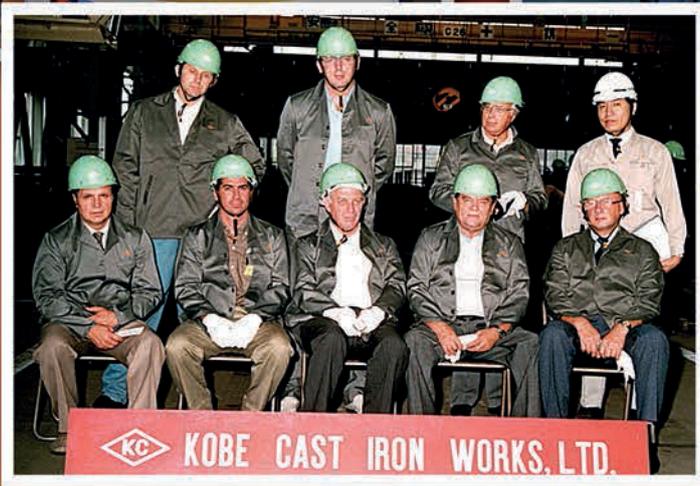
Яўген Шытаў, Анатоль Міхайлавіч Дзмітровіч (былы загадчык кафедры), Валянцін Грынберг, Уладзімір Собалеў,  
Аляксандр Чаус, Яўграф Іосіфавіч Бельскі (загадчык кафедры), Віктар Стасюлевіч, Алесь Клышка.

Трэці рад (злева направа):

Генадзь Кляшчанак, Уладзімір Лівенцаў, Міхаіл Сіткевіч, Валеры Скварцоў, Сцяпан Гурын,  
Давід Кукуй (будучы загадчык кафедры), Уладзімір Камяк, Пётр Гумінскі, Васіль Сцефанавіч,  
Ігар Філанавіч, Мікалай Невар, Сяргей Заяц, Віктар Адзіночка, Сяргей Кузняцоў.

# ДАВЫД МИХАЙЛОВИЧ КУКУЙ. МЫ ПОМНИМ (1946 – 2014)





# С юбилеем!

## Сергей Васильевич ХАРИТОНЧИК

(к 50-летию со дня рождения)



7 марта 2021 г. отметил свой юбилей ректор ведущего технического вуза Республики Беларусь, доктор технических наук Сергей Васильевич Харитончик.

Родился Сергей Васильевич в 1971 г. в г. Красный Смоленской области. В 1989 г., окончив среднюю школу с серебряной медалью, он поступил на автотракторный факультет Белорусского политехнического института.

После окончания с отличием БГПА Сергей Васильевич прошел путь от младшего научного сотрудника до директора Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси» (ранее – Научный центр проблем механики машин НАН Беларуси). При его активном участии центр стал одним из крупнейших в республике научно-исследовательским подразделением в области машиностроения и активных участников работ по заданиям ГНТП «Машиностроение» и ГПНИ «Механика».

Постоянно поддерживая тесные связи с Белорусским национальным техническим университетом, с 2002 г. Сергей Васильевич Харитончик осуществлял преподавательскую деятельность на кафедре «Большегрузные автомобили» автотракторного факультета. В апреле 2014 г. он назначен на должность декана машиностроительного факультета, а с января 2016 г. – на должность проректора по учебной работе и информационным технологиям. С октября 2017 г. С. В. Харитончик – ректор Белорусского национального технического университета.

Сергей Васильевич – известный специалист в области технологий компьютерного проектирования автотракторной и сельскохозяйственной техники, изделий машиностроения. В 1999 г. С. В. Харитончик защитил кандидатскую диссертацию, а в 2012 г. под руководством героя Беларуси, академика М. С. Высоцкого – докторскую диссертацию.

Как ученый С. В. Харитончик внес значительный научный вклад в разработку и освоение современных технологий виртуального проектирования, моделирования и испытаний для сокращения сроков и затрат на создание и доводку автотракторной и комбайновой техники. Он является автором более 120 научных работ, около 20 патентов. По итогам своей работы в 2006 и 2015 гг. Сергей Васильевич был удостоен стипендии Президента Республики Беларусь. Награжден Почетной грамотой НАН Беларуси и Почетной грамотой Министерства промышленности Республики Беларусь.

На должности ректора С. В. Харитончик особое внимание уделяет эффективному внедрению информационных технологий в организацию учебного и воспитательного процесса, открытию новых перспективных специальностей и реализации концепции «Университет 3.0» в БНТУ. Это позволило в 2019 г. БНТУ совместно с БГУФК создать научно-образовательный кластер «Интеллектуальные технологии в спорте» для обеспечения опережающего научно-технического развития, подготовки кадров и ускоренного внедрения в практику спорта научных разработок, основанных на новом поколении информационно-измерительных средств и инженерных технологий спортивного назначения.

Реализованы подходы по совершенствованию студенческого санатория-профилактория «Политехник». Созданы необходимые условия для обучения школьников в Национальном детском технопарке, где реализуется образовательная программа дополнительного образования одаренных детей и молодежи. На базе ОЗ БНТУ «Политехник» создана уникальная научно-инновационно-образовательная площадка, ведутся работы по выпуску изделий медицинского назначения, подготовке специалистов по биотехническим и медицинским аппаратам и системам.

Значительное внимание уделено развитию международного сотрудничества. Партнерами университета являются свыше 120 вузов и научно-образовательных центров из более 35 стран, возобновлены дружеские связи с ведущими университетами Узбекистана. В 2019 г. постановлением Президента Республики Узбекистан между БНТУ и Ташкентским государственным техническим университетом им. И. Каримова создан совместный Белорусско-Узбекский межотраслевой институт прикладных технических квалификаций в г. Ташкенте. С 2019 г. в БНТУ начата подготовка на английском языке иностранных граждан по шести специальностям получения высшего технического образования.

Во многом благодаря работоспособности и неиссякаемой творческой энергии Сергея Васильевича Белорусский национальный технический университет держит планку ведущего учебного заведения Беларуси по подготовке высококвалифицированных инженерных кадров для приоритетных отраслей народного хозяйства и занимается внедрением прорывных разработок и созданием инновационных продуктов.

О важности и роли Белорусского национального технического университета в подготовке кадров для потребностей отраслей экономики нашей страны на торжественном собрании трудового коллектива, посвященном 100-летию со дня основания БНТУ, говорил Президент Республики Беларусь Александр Григорьевич Лукашенко. Поздравляя коллектив, глава государства отметил, что сегодня университет является ведущим учебным заведением Беларуси по подготовке высококвалифицированных инженерных кадров для приоритетных отраслей народного хозяйства, занимается внедрением прорывных разработок и созданием инновационных производств. В день рождения университета, 10 декабря, Президент вручил БНТУ первый в истории Независимой Беларуси орден Трудовой Славы.



Вручение Президентом Республики Беларусь ордена Трудовой Славы

Ваш жизненный путь – это путь целеустремленного человека, талантливого руководителя, решающего сложнейшие задачи во всех сферах своей многогранной деятельности, которая неразрывно связана с БНТУ.

Редакция журнала «Литье и металлургия», Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь сердечно поздравляют Сергея Васильевича с юбилеем и желают крепкого здоровья, благополучия, долгих лет жизни, больших творческих успехов, жизненной энергии.

# С юбилеем!

## Борис Васильевич ОДАРЧЕНКО

*(к 80-летию со дня рождения)*



8 июля 2021 г. свой юбилей отмечает Борис Васильевич Одарченко, известный и уважаемый коллегами специалист в области литейного производства.

После окончания в 1969 г. Киевского ордена Ленина политехнического института Б. В. Одарченко был направлен на работу по распределению на молодой Гомельский завод «Центролит», ознаменовавший свое открытие первой плавкой в октябре 1968 года. Именно с этим, ставшим родным, предприятием Борис Васильевич разделил все вехи становления и развития, а также всю свою трудовую жизнь. Инженер-технолог, мастер, старший мастер, начальник техбюро, заместитель и начальник цеха крупного литья, начальник ПДО – вот те ступени карьерного роста, которые сформировали Бориса Васильевича как настоящего профессионала, опытного и мудрого управленца.

Пятнадцать лет, с 1984 по 1999 год в должности главного инженера предприятия Борис Васильевич управлял работой производственных цехов и технических служб, определяя технологическую политику и стратегию технического развития предприятия. Именно в это время (1988 г.) на гомельском «Центролите» был достигнут максимальный объем выпуска отливок – 85,5 тыс. т., проведена самая масштабная модернизация основных цехов и участков.

К развитию предприятия были подключены и задействованы научные школы Беларуси, Украины, России. Внедрены в производство передовые технологии плавки, формовки и изготовления стержней, основанные, в том числе на совместных научных разработках и изобретениях ученых Беларуси и инженерных работников предприятий. И в этой работе Борис Васильевич был инициатором многих идей, активным участником и руководителем проектов по модернизации и реконструкции производства. Автор многих изобретений и рацпредложений, лауреат Госпремии РБ за выдающиеся заслуги в области науки и технологий – вот оценка его работы в этой области.

Характеризуя Бориса Васильевича, друзья и коллеги всегда в первую очередь отмечали огромную работоспособность, трудолюбие и мощную позитивную энергию этого человека, которые он пронес через всю жизнь.

Вот и сейчас, Борис Васильевич идет по жизни с таким же оптимизмом, бодростью и энергией. Всецело отдает себя друзьям и близким. Собственным примером воспитывает и наставляет пятерых внуков, являясь для них эталоном настоящего мужчины и верного друга.

Дорогой Борис Васильевич, в этот торжественный день примите от редакции журнала «Литье и металлургия» и Ассоциации литейщиков и металлургов РБ самые теплые пожелания добра, здоровья, долголетия, бодрости на долгие годы.

# С юбилеем!

## Валерий Константинович ШЕЛЕГ

(к 75-летию со дня рождения)



26 апреля 2021 г. исполнилось 75 лет со дня рождения заведующему кафедрой «Технология машиностроения» Белорусского национального технического университета, члену-корреспонденту НАН Беларуси, доктору технических наук, профессору Валерию Константиновичу ШЕЛЕГУ.

В 1969 г. Валерий Константинович окончил машиностроительный факультет Белорусского политехнического института и по направлению работал конструктором специального конструкторского бюро автоматических линий. С сентября 1972 г. работал в Белорусском государственном научно-производственном концерне порошковой металлургии (ранее – НИИ порошковой металлургии, затем Белорусское республиканское научно-производственное объединение порошковой металлургии), где прошел путь от старшего инженера до генерального директора.

С июня 2005 г. В.К. Шелег работает в должности заведующего кафедрой «Технология машиностроения» Белорусского национального технического университета.

В 1978 г. Валерий Константинович защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, в 1989 г. – на соискание ученой степени доктора технических наук. В 1991 г. ему присвоено ученое звание профессора, в 2001 г. – звание Заслуженного деятеля науки Республики Беларусь. В 2015 г. избран членом-корреспондентом НАН Беларуси.

В.К. Шелег является известным ученым в области технологии машиностроения, материаловедения, порошковой металлургии, сварки и защитных покрытий.

За исследование и разработку новых теплообменных аппаратов с капиллярными структурами и их внедрение в промышленность В.К. Шелегу в 1978 г. присуждена премия Ленинского комсомола Белоруссии, в 1980 г. – Государственная премия БССР за разработку и внедрение в народное хозяйство новых пористых материалов и изделий на основе металлических порошков, в 1987 г. – премия Совета Министров СССР за разработку и внедрение в народное хозяйство проницаемых материалов с высокими эксплуатационными свойствами, а в 1997 г. – премия Национальной академии наук Беларуси за монографию «Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов».

В последние годы В.К. Шелег возглавляет научную школу в области теории и практики управления формированием качества поверхности деталей при механической обработке, в том числе и изготовленных из металлических порошков. При его непосредственном участии и под его научным руководством выполнен цикл работ по исследованию качества поверхности и эксплуатационных показателей деталей машин в процессе иглофрезерования, электроимпульсного полирования коррозионностойких и углеродистых конструкционных сталей, на основании теоретических исследований разработаны устройства, обеспечивающие стабильное стружкодробление при вибрационном точении высоколегированных сталей.

Результаты научной деятельности В.К. Шелега отражены в 798 опубликованных работах, в том числе в 27 монографиях и 228 научных статьях.

Практические разработки В.К. Шелега защищены более 280 авторскими свидетельствами и патентами,

В.К. Шелег ведет большую научно-организационную работу. Он являлся членом комиссии по вопросам государственной научно-технической политики при Совете Министров Республики Беларусь, был членом Президиума ВАК РБ, председателем Государственного экспертного совета ГКНТ РБ, председателем экспертного совета Минобразования РБ, является главным редактором Республиканского межведомственного сборника научных трудов «Машиностроение», а также членом редколлегии ряда журналов и сборников. По его инициативе созданы четыре филиала кафедры: на ОАО «МТЗ», ОАО «МЗКТ», в ФТИ НАН Беларуси и ОИМ НАН Беларуси. Под его руководством подготовлено десять кандидатов и пять докторов технических наук.

Валерий Константинович Шелег награжден почетными грамотами Национальной академии наук Беларуси, Министерства по чрезвычайным ситуациям, Высшей аттестационной комиссии, Государственного комитета по науке и технологиям, нагрудным знаком «За заслуги в стандартизации», в 2007 г. удостоен персональной надбавки Президента Республики Беларусь за выдающийся вклад в социально-экономическое развитие Республики Беларусь.

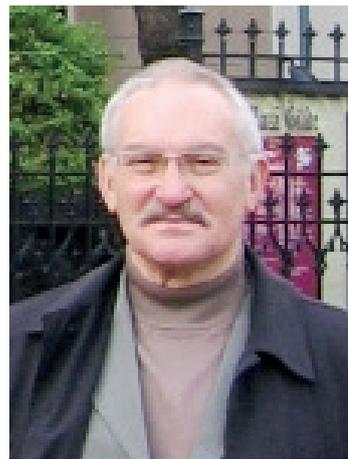
В день Вашего славного юбилея примите от нас, уважаемый Валерий Константинович, самые наилучшие пожелания крепкого здоровья, долгих лет жизни, большого личного счастья, свершения всех надежд.

Редакция журнала «Литье и металлургия»  
Ассоциация литейщиков и металлургов

# С юбилеем!

## Леонид Ефимович РОВИН

(к 80-летию со дня рождения)



19 июня исполнилось 80 лет Леониду Ефимовичу Ровину – выдающемуся инженеру-литейщику, кандидату технических наук, известному специалисту в области энерго- и ресурсосберегающих металлургических технологий, пылегазоочистки и ваграночной плавки, доценту кафедры «Металлургия и технология обработки материалов» Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого.

В 1963 г. Л. Е. Ровин окончил механико-технологический факультет Белорусского политехнического института по специальности «Машины и технология литейного производства» и был направлен на работу в качестве инженера кафедры. Одной из первых работ молодого специалиста был перевод 20-тонных вагранок Минского тракторного завода на круглосуточный режим работы с «горячим» простоем в третью смену. В 1965 г. по его проекту была проведена модернизация и перевод 10-тонных коксовых вагранок Минского завода Октябрьской Революции на коксогозовый режим. В 1969 г. Л. Е. Ровин закончил аспирантуру и приступил к работе на кафедре в качестве ассистента.

В 1972 г. Леонид Ефимович защитил кандидатскую диссертацию и организовал первую в СССР отраслевую лабораторию очистки газовых выбросов в литейном производстве – «НИЛЮгаз». Под его руководством лабораторией были разработаны и внедрены десятки установок мокрой пылегазоочистки и систем тонкой очистки газов для вагранок, дуговых печей и конвертеров. В общей сложности более 100 заводов в СССР были оснащены такими установками и системами, многие из этих установок работают и в настоящее время.

В 1983 г. Л. Е. Ровин был избран по конкурсу доцентом Гомельского политехнического института. С 1992 по 2000 г., продолжая работать на кафедре, возглавлял профком ГПИ. При его активном участии в 1995 г. Гомельский политехнический институт получил статус Государственного технического университета и в том же году вузу было присвоено имя Павла Осиповича Сухого. В 1995 г. за большой вклад в развитие отношений между ОКБ Сухого и ГГТУ Л. Е. Ровин был награжден Почетной грамотой и юбилейной медалью ОКБ Сухого.

В 1995 г. Леонид Ефимович был избран заведующим кафедрой «Машины и технология литейного производства» ГГТУ им. П. О. Сухого и руководил ею до 2010 г. Более полувека Л. Е. Ровин занимается преподавательской деятельностью, за это время им подготовлено более 1000 инженеров-литейщиков, которые трудятся сегодня практически на всех предприятиях Беларуси, а также на многих заводах России, Украины, Прибалтики, США, Германии, Австралии и других стран. Помимо учебной работы, подготовки студентов, магистрантов и аспирантов, Леонид Ефимович ведет активную научно-исследовательскую работу, является автором более 100 учебно-методических работ, свыше 300 научных публикаций, 40 патентов и авторских свидетельств. Под его руководством выполнены десятки фундаментальных научно-исследовательских работ по важнейшим госбюджетным темам в области ресурсо- и энергосбережения. Его разработки отмечены дипломами и медалями престижных международных выставок и конкурсов. Леонид Ефимович пишет стихи и сочиняет музыку, а свой отпуск до сих пор предпочитает проводить в путешествиях на байдарке по белорусским рекам и озерам.

От всей души желаем Вам, дорогой Леонид Ефимович, крепкого здоровья, благополучия и дальнейших творческих успехов.

Редакция журнала «Литье и металлургия»  
и Ассоциация литейщиков и металлургов  
Республики Беларусь.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-23-26>  
УДК 621.745.35

Поступила 12.04.2021  
Received 12.04.2021

## НАНОСТРУКТУРНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

*Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бурули, 11. E-mail: stetsenko.52@bk.ru*

*А. В. СТЕЦЕНКО, МОУВО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь, пр. Мира, 43*

*На основе термодинамических расчетов показано, что кристаллизация металлов является равновесным наноструктурным процессом. Вначале из элементарных нанокристаллов формируются тригональные или тетрагональные структурообразующие нанокристаллы. Затем из них образуются центры кристаллизации. Далее из них и тетрагональных или тригональных структурообразующих нанокристаллов формируются тетрагональные или гексагональные дендриты. Их формы зависят от степени разветвленности дендритов. Наиболее разветвленные из них (компактные дендриты) являются тетрагональными или гексагональными кристаллами.*

**Ключевые слова.** Наноструктурная кристаллизация, металлы, термодинамика, тригональные нанокристаллы, тетрагональные нанокристаллы, дендриты.

**Для цитирования.** Марукович, Е.И. Наноструктурная кристаллизация металлов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 23–26. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-23-26>.

## NANOSTRUCTURAL CRYSTALLIZATION OF METALS

*E. I. MARUKOVICH, V. Yu. STETSENKO, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: stetsenko.52@bk.ru*

*A. V. STETSENKO, Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus, 43, Mira ave.*

*Based on thermodynamic calculations, it is shown that metal crystallization is an equilibrium nanostructural process. At the beginning, trigonal or tetragonal structure-forming nanocrystals are formed from elementary nanocrystals. Then crystallization centers are formed from them. Further, tetragonal or hexagonal dendrites are formed from them and tetragonal or trigonal structure-forming nanocrystals. Their forms depend on the degree of branching of dendrites. The most branched of them (compact dendrites) are tetragonal or hexagonal crystals.*

**Keywords.** Nanostructured crystallization, metals, thermodynamics, trigonal nanocrystals, tetragonal nanocrystals, dendrites.

**For citation.** Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A.V. Nanostructural crystallization of metals. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 2, pp. 23–26. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-23-26>.

При кристаллизации металлов в изотермических условиях происходят изменения энтальпии, энтропии и поверхностной энергии гетерогенной системы. Поэтому для математического описания процесса необходимо использовать термодинамику. Тогда изменение энергии Гиббса при кристаллизации жидкого металла будет выражаться следующим уравнением:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S + \Delta\Pi, \quad (1)$$

где  $\Delta H$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta\Pi$  – изменения энтальпии, энтропии и поверхностной энергии при кристаллизации жидкого металла;  $T$  – температура этого процесса.

Известно, что  $\Delta H$ ,  $T$  и  $\Delta S$  связаны уравнением:

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T}. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) следует, что изменение энергии Гиббса при кристаллизации металлов будет определяться уравнением:

$$\Delta G = \Delta\Pi. \quad (3)$$

Величина  $\Delta\Pi$  выражается следующим уравнением:

$$\Delta\Pi = \Pi_r - \Pi_{ж}, \quad (4)$$

где  $\Pi_T$  и  $\Pi_{ж}$  – поверхностные энергии твердой и жидкой фаз.

Если считать, что жидкие металлы состоят из термодинамически нестабильных (неравновесных) кластеров, не имеющих межфазных границ, то величина  $\Pi_{ж}=0$ . Тогда  $\Delta\Pi = \Pi_T > 0$  и значение  $\Delta G$  также будет больше нуля. Это означает, что процесс кристаллизации металлов термодинамически невозможен. Но он реален. Кроме того, кристаллизация металлов происходит в термодинамически равновесных условиях [1]. В этом случае  $\Delta G=0$ , а  $\Pi_{ж}$  должно быть равной  $\Pi_T$ . Для выполнения такого условия жидкие металлы должны состоять не из кластеров, не имеющих межфазных границ, а из термодинамически стабильных (равновесных) нанокристаллов, обладающих поверхностной энергией. Такое представление о металлических расплавах обосновано теоретически и подтверждено экспериментально методом SANS (малоуглового рассеяния нейтронов) [1–5]. Поэтому процесс кристаллизации металлов является наноструктурным. В нем вначале из элементарных нанокристаллов (ЭН) формируются структурообразующие нанокристаллы (СН). Затем из них образуется компактный центр кристаллизации (ЦК). Далее из ЦК и СН формируется дендритный кристалл (ДК). Схема такого процесса представлена на рис. 1.

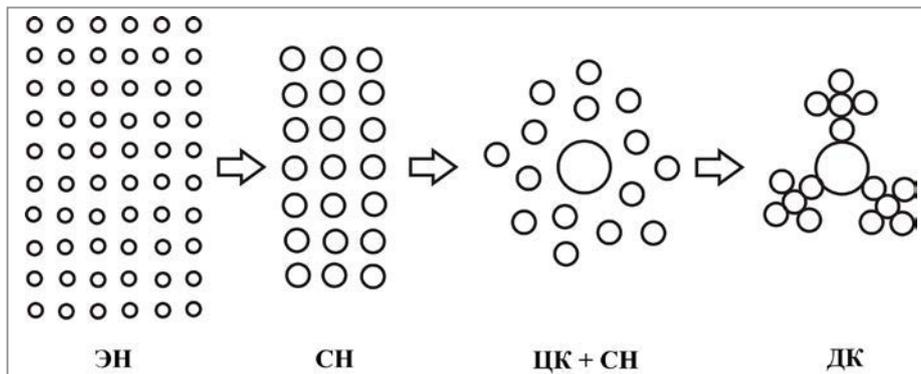


Рис. 1. Схема формирования дендритного кристалла

Формирование дендритного кристалла можно выразить следующим уравнением:

$$\text{ЦК} + \text{СН} + A = \text{ДК} + Q, \quad (5)$$

где  $A$  – свободные атомы;  $Q$  – теплота кристаллизации.

Жидкий металл на 96% состоит из ЭН и на 4% – из атомов [1–5]. Последние являются связующими элементами для формирования СН, ЦК и ДК. При этом выделяется теплота кристаллизации.

В качестве СН можно принять тригональные и тетрагональные нанокристаллы, которые имеют наиболее компактные формы. Схема их формирования показана на рис. 2.

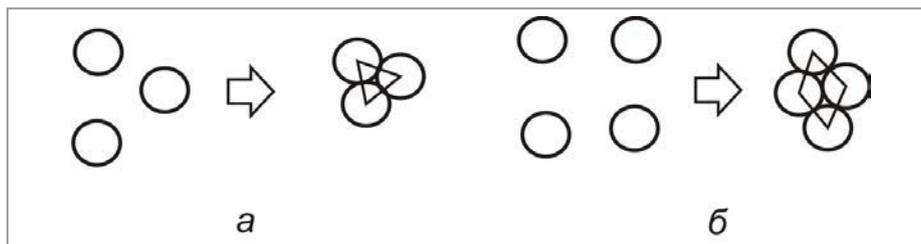


Рис. 2. Схема формирования тригонального (а) и тетрагонального (б) СН

Изменение энергии Гиббса при образовании СН определяется формулой (3). Обозначим поверхностную энергию одного ЭН –  $\Pi_{ЭН}$ . Тогда изменения энергии Гиббса при формировании тригонального и тетрагонального СН будут равны  $3\Pi_{ЭН} - 3\Pi_{ЭН} = 0$  и  $4\Pi_{ЭН} - 4\Pi_{ЭН} = 0$  соответственно. Следовательно, образование СН при кристаллизации металлов является термодинамически равновесным процессом.

Если нанокристаллы условно заменить точками, то символом тригонального СН будет служить равнобедренный треугольник, а символом тетрагонального СН – ромб (рис. 2). Тогда процесс формирования ЦК из тригональных и тетрагональных СН схематично можно представить следующим образом (рис. 3).

Изменения энергии Гиббса при формировании ЦК из тригональных и тетрагональных СН, согласно рис. 3, будут равны  $21\Pi_{ЭН} - 21\Pi_{ЭН} = 0$  и  $20\Pi_{ЭН} - 20\Pi_{ЭН} = 0$  соответственно. Следовательно, образование ЦК при кристаллизации металлов является термодинамически равновесным процессом.

Дендритными кристаллами металлов являются тетрагональные и гексагональные дендриты. Они образуются из ЦК и СН с помощью связующих свободных атомов. Схема формирования тетрагонального дендрита представлена на рис. 4.

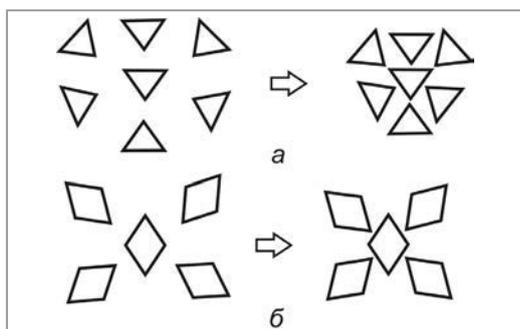


Рис. 3. Схема формирования ЦК из тригональных (а) и тетрагональных (б) СН

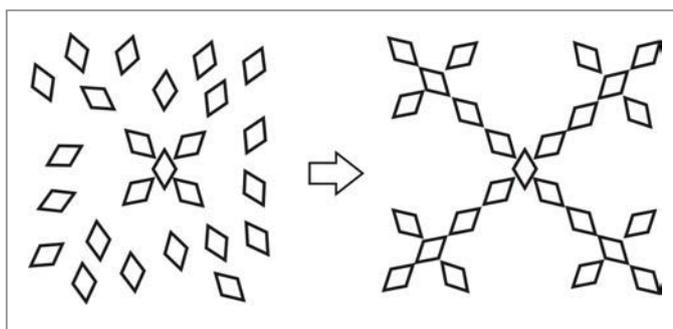


Рис. 4. Схема формирования тетрагонального дендрита

Изменение энергии Гиббса при формировании тетрагонального дендрита, согласно рис. 4, будет равно  $100P_{ЭН} - 100P_{ЭН} = 0$ . Следовательно, образование таких дендритов при кристаллизации металлов является термодинамически равновесным процессом.

Схема формирования гексагонального дендрита показана на рис. 5.

Изменение энергии Гиббса при формировании гексагонального дендрита, согласно рис. 5, будет равно  $111P_{ЭН} - 111P_{ЭН} = 0$ . Следовательно, образование таких дендритов при кристаллизации металлов является термодинамически равновесным процессом.

Формы гексагональных и тетрагональных дендритов металла зависят от степени их разветвленности. На нее большое влияние оказывают растворенные в расплаве газы, поверхностно-активные примеси (ПАП), а также интенсивность теплоотвода. Чем больше разветвлен дендрит, тем он более компактен и похож на кристалл. Схема формирования компактного тетрагонального дендрита представлена на рис. 6.

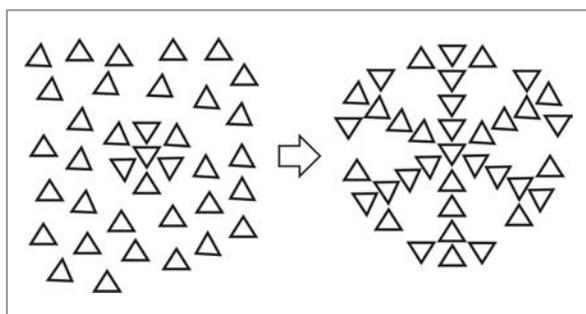


Рис. 5. Схема формирования гексагонального дендрита

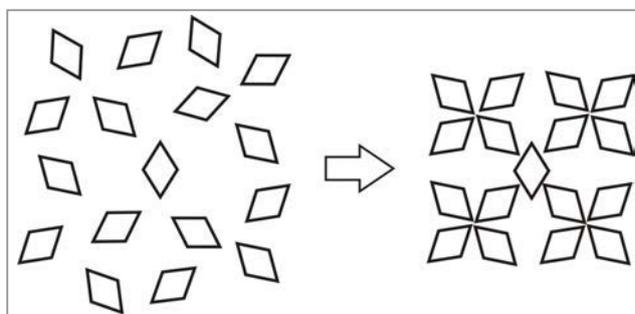


Рис. 6. Схема формирования компактного тетрагонального дендрита

Такой дендрит является кристаллом кубической формы. Компактный гексагональный дендрит – гексагональный кристалл. Газы, которые выделяются на дендрите, препятствуют его разветвлению. Это приводит к формированию в отливке крупнокристаллической структуры. Аналогично действуют ПАП. Для повышения разветвленности дендритов и получения мелкокристаллической структуры в жидкие металлы необходимо вводить модификаторы. Они дегазируют расплав, связывают ПАП, предотвращают выделение газов на ветвях дендритов. Повышенная интенсивность теплоотвода увеличивает скорость затвердевания жидких металлов. Она уменьшает демодифицирующее действие ПАП и газов на структуру отливок и увеличивает количество центров кристаллизации. В результате ускоренной кристаллизации металлов в них формируется мелкокристаллическая структура. Повышенная скорость затвердевания расплава является универсальным и наиболее эффективным модифицирующим действием на структуру отливок.

Таким образом, наноструктурная кристаллизация металлов является термодинамически равновесным процессом и заключается в образовании из элементарных нанокристаллов тригональных или тетрагональных структурообразующих нанокристаллов, из которых формируются центры кристаллизации, тетрагональные и гексагональные дендриты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Термодинамические основы кристаллизации металлов // Литье и металлургия. 2020. № 2. С. 8–11.
2. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Термодинамические основы плавления металлов // Литье и металлургия. 2020. № 1. С. 14–17.
3. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Структура металлического расплава // Литье и металлургия. 2020. № 1. С. 18–20.
4. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Наноструктурная теория металлических расплавов // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 7–9.
5. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В.** О броуновском движении в жидкостях // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 75–77.

## REFERENCES

1. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Termodinamicheskie osnovy kristallizacii metallov [Thermodynamic foundations of metal crystallization]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 2, pp. 8–11.
2. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Termodinamicheskie osnovy plavleniya metallov [Thermodynamic bases of metals melting]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 1, pp. 14–17.
3. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Struktura metallichesкого расплава [Metal melt structure]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 1, pp. 18–20.
4. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Nanostrukturnaya teoriya metallicheskih rasplavov [Nanostructural theory of metal melts]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 7–9.
5. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** O brounovskom dvizhenii v zhidkostyah [About Brownian movement in liquids]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 4, pp. 75–77.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-27-31>  
УДК 621.74

Поступила 19.04.2021  
Received 19.04.2021

## ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛГМ-ПРОЦЕССА

А. А. ЛИСОВОЙ, И. С. ТКАЧЕНКО, А. Н. ХУДЕШЕНКО, Фирма ООО «Завод АКС», г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: [spblenal@mail.ru](mailto:spblenal@mail.ru)

*В статье сообщается об инновационном комплекте оборудования для ЛГМ-процесса, представлены схемы механизированной и автоматической формовочных линий и возможности роботизации формообразования ЛГМ-процесса.*

**Ключевые слова.** Литье по газифицируемым моделям, инновационное оборудование, автоматизация, литейное производство.

**Для цитирования.** Лисовой, А. А. Импортозамещающее оборудование для ЛГМ-процесса / А. А. Лисовой, И. С. Ткаченко, А. Н. Худешенко // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 27–31. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-27-31>.

## IMPORT-SUBSTITUTING EQUIPMENT FOR THE LOST FORM CASTING PROCESS

A. A. LISOVOI, I. S. TKACHENKO, A. N. KHUDESHEENKO, LLC "AKS Plant", St. Petersburg, Russia. E-mail: [spblenal@mail.ru](mailto:spblenal@mail.ru)

*The article reports on an innovative set of equipment for the LFC process, presents schemes of mechanized and automatic molding lines and the possibility of robotization of the LFC process forming.*

**Keywords.** Lost form casting, innovative equipment, automation, foundry production.

**For citation.** Lisovoi A. A., Tkachenko I. S., Khudeshenko A. N. Import-substituting equipment for the lost form casting process. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 2, pp.27–31. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-27-31>.

Отечественное литейное производство требует инновационных подходов к проектированию и производству авторских моделей формообразующего, плавильного и термического оборудования. Развитие отечественного машиностроения зависит от рейтинга литейного производства на международном рынке, а успешное развитие литейного производства и высокое качество литых заготовок возможно только при глубокой интеграции всех литейных переделов в информационные системы. Качество продукции, себестоимость и вопросы окружающей среды на фоне усиливающихся за последние годы экономических изменений, а также оптимальное соотношение цена–качество определяют в настоящее время конкурентоспособность технологических процессов, изделий и компаний. Главным условием успешного развития промышленного предприятия является радикальное повышение научно-технического уровня производства на основе создания и внедрения наиболее эффективных технологий, машин и оборудования. На фоне роста затрат на сырьевые материалы, энергоносители, оплату труда и соблюдения экологической безопасности особо важное значение приобретает повышение эффективности технологических процессов и качества продукции. Применение инновационных технологий и оборудования в машиностроении в целом и в литейном производстве оказывает решающее влияние на повышение производительности труда, улучшение качества продукции, ресурсосбережение, экономию энергоносителей и улучшение экологической ситуации промышленных регионов. Наиболее приемлемым, привлекательным с точки зрения требований настоящего времени и весьма перспективным технологическим процессом в литейном производстве является ЛГМ-процесс (Литье по газифицируемым моделям). Производство отливок по пенополистирольным моделям не является новшеством, но активно не развивалось. В последнее десятилетие произошли значительные изменения качества исходного материала, технологического процесса и конструкторских решений для комплекса оборудования, что позволяет считать ЛГМ-процесс инновационным и востребованным. ООО «Завод АКС» (Санкт-Петербург) является ведущим предприятием в России, изготавливающим оснастку для единичного производства и комплекс оборудования

для серийного и массового производства отливок по ЛГМ-процессу. По требованию заказчика АКС выполняет проекты реконструкции и создания новых литейных цехов для ЛГМ-процесса. На рис. 1 показана механизированная линия фирмы «АКС» производительностью 12 форм в час с размером опок 800x800x1000.



Рис. 1. Механизированная линия ЛГМ

Прямые энергозатраты в машиностроении, а также энергоресурсы, овеществленные в сырье и материалы, затраченные на производство продукции во всех отраслях промышленности, зависят от материалоемкости продукции. В современных международных экономических отношениях проблема экономии

энергоносителей и ресурсосбережение приобретает особо серьезное значение для всего народного хозяйства. В послании Федеральному Собранию 2019 г. Президент России В. В. Путин сказал: «В России сейчас формируется колоссальный гарантированный спрос на промышленную и высокотехнологичную продукцию». «Для того чтобы выйти на высокие темпы роста, нужно решить системные проблемы в экономике. Главная проблема, в числе приоритетных, – это обеспечение опережающего темпа роста производительности труда». Необходимое условие для повышения производительности труда отечественного литейного производства до мирового уровня – внедрение систем комплексной автоматизации литейных процессов и сокращения доли влияния непредвиденного человеческого фактора. Основными путями повышения эффективности производства за счет совершенствования технологических процессов являются: внедрение инновационных технологий; комплексная автоматизация процессов; автоматический контроль и регулирование технологического процесса; оптимизация технологических режимов; повышение производительности труда; сокращение потерь энергоресурсов; оптимальное использование вторичных ресурсов.

Оптимизация процессов позволяет сократить потребление энергии и материальных ресурсов, уменьшить расходы на обслуживание, высвободить дополнительные площади, а также повысить надежность и качество работы инженерных и технологических систем. Совокупность конструкторских решений, автоматизация и роботизация технологических процессов, экономических, экологических и людских факторов, воплощенных в формообразующий агрегат, – вот что такое современная инновационная автоматическая линия фирмы АКС для ЛГМ-процесса (рис. 2).

Две такие линии производительностью до 60 форм в час поставлены в Японию по их техническому заданию.



Рис. 2. Автоматическая линия

Еще одна новинка компании «Завод АКС» – линейка автоматов для производства пенополистирольных моделей. Данное оборудование позволяет полностью автоматизировать процесс изготовления моделей для ЛГМ-процесса, существенно увеличить производительность и снизить время изготовления пенополистирольных моделей.



Рис. 3. Автомат ФА

В наше время все более популярным и перспективным становится понятие «ИНДУСТРИЯ 4,0». Это продолжение промышленных революций. С 2011 г. началась и развивается четвертая промышленная революция – это искусственный интеллект, который и носит название «ИНДУСТРИЯ 4,0». Четвертая промышленная революция и «ИНДУСТРИЯ 4,0» становятся не просто словами, за ними стоят реальные проекты, которые входят в нашу жизнь, – это объединение достижений промышленности и цифровых технологий, приводящих к созданию цифровых производств и «умных заводов», где все устройства, машины, продукция и люди общаются между собой посредством цифровых технологий и интернета. «ИНДУСТРИЯ 4,0» охватывает всевозможные направления и технологии, объединение которых сделает производство максимально автоматизированным и конкурентоспособным, а следовательно, номером 1 на мировом рынке [2]. Обеспечение высокой конкурентоспособности отечественной промышленности во многом зависит от эффективности промышленных предприятий. Анализ технико-экономических показателей предприятий мировых лидеров говорит о том, что дальнейший рост эффективности производств возможен только при применении инновационных технологий, оборудования и решений. И это реально при проведении комплексной инновационной модернизации литейного производства с широким использованием систем автоматизации и роботизации технологических процессов. Именно эти условия и принципы осуществляются известной фирмой ЗАВОД «АКС» при создании высокопроизводительного оборудования и проектирования литейных цехов по ЛГМ-процессу [2].

Оборудование нового поколения фирмы ООО «АКС» выгодно отличается от предыдущих моделей собственного производства и аналогичных образцов зарубежного производства:

- простотой и надежностью автоматизации и контроля тепловых процессов;
- роботизацией механических процессов на всех переделах;
- повышенным дифференцированным КПД (79–85 %);
- гарантированной шероховатостью поверхности отливок не выше Rz40;
- повышением точностных параметров моделей и снижением припусков на 10–15 %;
- меньшей материалоемкостью всего комплекса оборудования на 9–12 %;
- сокращением строймонтажных работ (при реконструкции) до 30 %;
- снижением энергозатрат до 23–29 %;
- значительным улучшением санитарно- гигиенических условий на рабочих местах;
- улучшением экологической обстановки в административном районе завода.

Более подробно с продукцией и возможностями фирмы ООО «Завод АКС» можно ознакомиться на сайте: [www.aksspb.com](http://www.aksspb.com)

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лопухов И. В. Коммуникационные технологии умного предприятия в рамках концепции Индустрия 4,0 и Интернета вещей // Современные технологии автоматизации. 2015. № 2.
2. Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. СПб: НПО «Профессионал», 2007.

#### REFERENCES

1. Lopuhov I. V. Kommunikacionnye tehnologii umnogo predpriyatija v ramkah koncepcii Industrija 4,0 i Interneta veshhej [Communication technologies of a smart enterprise within the framework of the concept of Industry 4.0 and the Internet of Things]. *Sovremennye tehnologii avtomatizacii = Modern automation technologies*, 2015, no. 2.
2. Shuljak V. S. *Lit'e po gazificiruemym modeljam* [Casting on gasified models]. Sankt-Peterburg, NPO «Professional» Publ., 2007.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-32-36>

Поступила 19.02.2021

Received 19.02.2021

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТЕРЖНЕВЫХ ОТЛИВОК ПРИ ЛИТЬЕ В ОБЛИЦОВАННЫЙ КОКИЛЬ

Д. А. ВОЛКОВ, А. Д. ВОЛКОВ, А. В. ЕФИМЕНКО, ОАО «БЕЛНИИЛИТ», г. Минск, Беларусь, ул. Машиностроителей, 28. E-mail: belniilit@belniilit.by

*Проведены экспериментальные и исследовательские работы по разработке параметров технологии литья отливок с внутренними полостями, оформляющимися песчаным стержнем, методом литья в облицованный кокиль с вертикальным разъемом. Выявлено влияние литниковых систем с центральным стояком и боковыми стояками на толщину проливаемости стенки отливки и механические характеристики сплава чугуна, в том числе и лигатурами.*

**Ключевые слова.** Литье в облицованный кокиль, оснастка, вертикальный разъем, фасонная отливка, песчаный стержень, образцы, литниковая система, полый шар, физико-механические характеристики.

**Для цитирования.** Волков, Д. А. Исследование технологических параметров стержневых отливок при литье в облицованный кокиль / Д. А. Волков, А. Д. Волков, А. В. Ефименко // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 32–36. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-32-36>.

## INVESTIGATION OF THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF CORED CASTINGS WHEN IN A LINED COQUILLE

D. A. VOLKOV, A. D. VOLKOV, A. V. EFIMENKO, OJSC "BELNIILIT", Minsk, Belarus, 28, Mashinostroiteley str. E-mail: belniilit@belniilit.by

*The article presents a number of experimental and research works on the development of the parameters of the casting technology for castings with internal cavities formed by a sand rod, by casting in a lined coquille (chill mould) with a vertical connector. The influence of gating systems with a central riser and side risers on the thickness of the casting wall shedding and on the mechanical characteristics of the cast iron alloy, including ligatures, is revealed.*

**Keywords.** Casting in a lined coquille (chill mould), tooling, vertical connector, shaped casting, sand rod, samples, gating system, hollow ball, physical and mechanical characteristics.

**For citation.** Volkov D. A., Volkov A. D., Efimenko A. V. Investigation of the technological parameters of cored castings when in a lined coquille. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 2, pp. 32–36. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-32-36>.

В настоящее время, когда в литейном производстве происходит спад выпуска продукции, тенденция к освоению новой номенклатуры отливок за счет универсальности действующих технологий приобретает приоритетный характер. В Республике Беларусь одной из таких современных технологий является технология литья в облицованный кокиль с вертикальным разъемом, которая применялась как специальная для экспорта заготовок гильз двигателей внутреннего сгорания КамАЗ-730 и ЗиЛ-110 и других бесстержневых отливок ответственного назначения, но с простой конфигурацией. В то же время в странах СНГ и развитых странах серийно не изготавливают литьем в облицованный кокиль качественные фасонные стержневые отливки сложной конфигурации, поэтому возникла необходимость проведения ряда экспериментальных и исследовательских работ по разработке параметров технологии литья отливок с внутренними сложнопрофильными полостями методом литья в облицованный кокиль.

Проведение таких работ будет способствовать расширению рынка производителей отливок ответственного назначения, увеличению заказов, в том числе и на экспорт, так как литье в облицованный кокиль по сравнению с обычными видами литья имеет меньший пригар (с 1 на 0,4 мм), меньший припуск на механическую обработку (с 5 на 3 мм) и более высокие физико-механические характеристики.

В данной работе предусматривается ряд научно-технических задач: разработать экспериментальную пробу-отливку, в которой до 90 % внутреннего объема занимает песчаный стержень; разработать и изготовить опытный облицованный кокиль с вертикальным разъемом и универсальной многоярусной

литниковой системой; провести эксперименты по заполнению жидким металлом неventилируемых полостей форм проб-отливок с песчаными стержнями; исследовать качество поверхностей облицовочного слоя кокилей и песчаных стержней после покрытия противопригарными составами на водной основе; исследовать качество металла путем проведения физико-механических испытаний на отдельно отлитых образцах в опытном кокиле после металлургического улучшения расплава специальными лигатурами; опробовать технологию улучшения качества отливок путем применения керамических фильтров в литейной чаше.

В конфигурацию пробы-отливки была заложена форма полых шаров диаметром 100 мм с целью равномерного отвода тепла при кристаллизации от поверхности шара, чтобы в условиях неventилируемости отливки причинами возможного образования дефектов на поверхности отливки были только возгоны, образуемые от контакта расплава с поверхностью песчаного стержня внутри отливки, а не с фасонной поверхностью облицованного кокиля.

Для более точных результатов физико-механические характеристики сплава будут определяться на прилитых образцах стержневой отливки в том же кокиле для проб-отливок, на этапе заливки – через центральный стояк и на отдельно отлитых образцах на этапе заливки – через боковые стояки. Для определения влияния на качество поверхности отливки толщина облицовочного слоя предусматривалась 5 мм по технологии литья гильз цилиндров и 10 мм как экспериментальная для фасонных отливок.

Толщины стенок проб-отливок составляют: 10 мм для нижнего яруса, 4 и 6 мм – для верхних ярусов. Достигаются они за счет простановки стержней с разными диаметрами (рис. 1). Выбор толщины стенок проб-отливок при литье в песчано-глинистые формы связан с общепринятыми нормами конструирования чугуновых отливок. Как правило, для корпусных фасонных отливок преобладает толщина стенок 10–15 мм, а в отдельных местах – не менее 5 мм.

Для проведения экспериментов был разработан и изготовлен опытный кокиль с габаритными размерами плоскости разъема 625x450 мм (рис. 2). В кокиле предусмотрена универсальная многоярусная литниковая система, состоящая из центральной чаши, стояка и двух вентилируемых боковых литников, которые могут использоваться как прилитые образцы или стояки при боковой заливке.

Плавку проводили на ранее отработанном составе шихты с содержанием чугуновой стружки 20% и стального лома 10%. Обработку магниевой лигатурой FiMag5762 проводили в ковше с крышкой («сэндвич»-процесс), что касается бариевой лигатуры FiBar2025, то металл обрабатывали путем засыпки на струю металла при переливе из печи в заливочный ковш.

В качестве материала набивного тигля использовали футеровочный материал (огнеупорную кварцевую смесь Silika Mix7A05), который не требует предварительного смешивания с борной кислотой перед набивкой тигля.

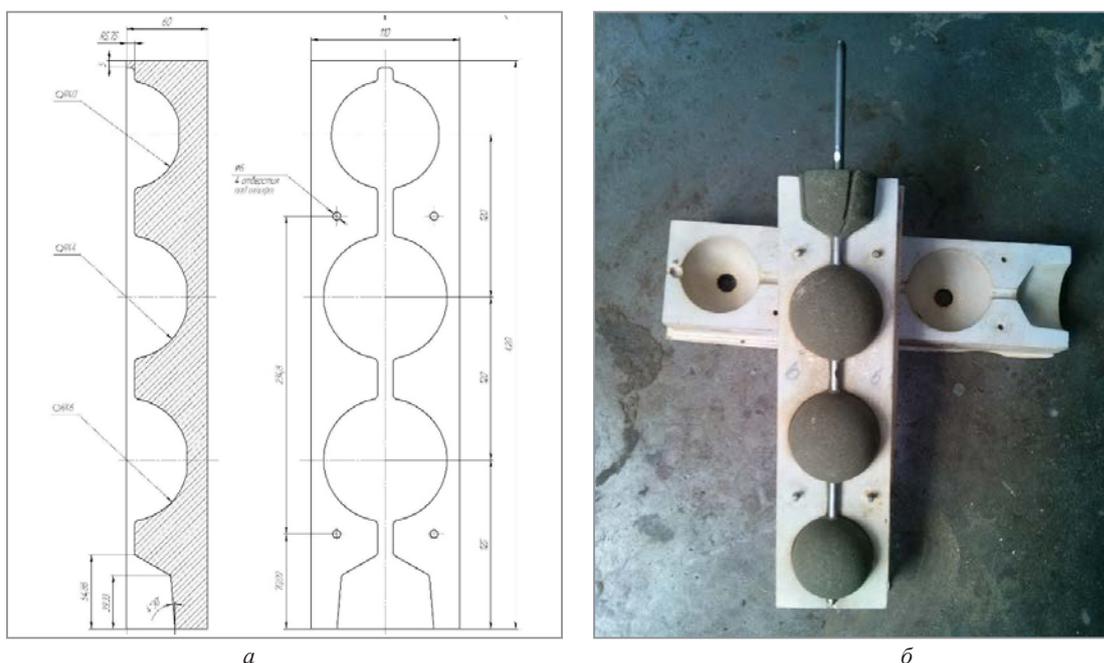


Рис. 1. Чертеж стержневого ящика для изготовления стержней для проб-отливок с толщиной стенок 10 мм, 6 и 4 мм (а) и стержневой ящик и стержень из ХТС (б)

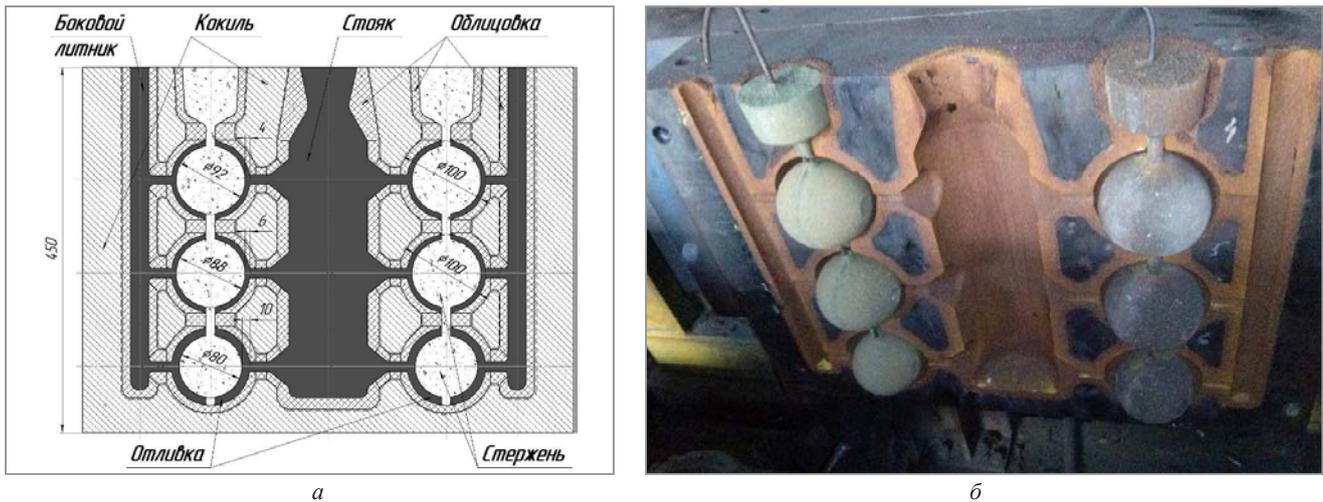


Рис. 2. Технологическая схема простановки стержней в облицованном кокиле для проб-отливок с толщиной стенок 10 мм, 6 и 4 мм (а); облицованный кокиль с универсальной литниковой системой для получения стержневых проб-отливок в виде полых шаров с прилитыми образцами и простановка стержней из ХТС в облицованном кокиле (б)

Толщина облицовочного слоя – 5 и 10 мм. В качестве облицовочной смеси используется плакированная смесь, изготовленная ОАО «Лидский механический завод» по заказу ОАО «БЕЛНИИЛИТ». Смесь поставляется в готовом виде и состоит из наполнителя – кварцевого песка  $1K_1O_2016$  (100%), связующего СФ-011 – СФ-015М в количестве 4,5–5,0% от массы песка, уротропина – 0,38–0,45% от массы песка, стеарата кальция – 0,1–0,2% от массы песка.

Для предотвращения усадочных дефектов на облицовочный слой наносили противопопригарное покрытие на водной основе.

В традиционных технологиях противопопригарное покрытие наносится на нагретые поверхности кокилей или на поверхности песчаных форм с последующей сушкой. Но это физически совершенно иные состояния и они не могут быть приравнены к нагретому облицовочному слою, так как в данном случае мы имеем комбинированное состояние: нагретый кокиль – нагретая облицовка (песчанно-смоляная прослойка) и предыдущий опыт может быть использован как чисто информативный материал.

В качестве противопопригарных покрытий использовали различные составы от трех поставщиков: противопопригарные покрытия на водной основе трех составов поставщика «Арназан»; покрытие антипригарное быстросохнущее с кислым наполнителем ТУ ВУ 100196035.016–2009 производства НПП «ЭВТЕКТИКА» на основе изопропилового спирта; состав противопопригарный водно-дисперсионный ППС-2 по ТУ ВУ 100114701.012–2006 поставщика ООО «АВТОСИБ».

Температура кокиля при заливке – 230–250 °С. На первом этапе при заливке через центральный стояк были получены три куста (в каждом шесть отливок и два прилитых образца) стержневых отливок (рис. 3, а, б): первый – из серого чугуна без внепечной обработки; второй – с применением бариевой лигатуры; третий – с применением магниевой лигатуры.

Прилитые образцы отрезали и подвергали механической обработке с целью проведения испытаний и определения физико-механических характеристик, получения металлографических снимков и определения химического состава.

Полученные стержневые отливки толщиной стенок 10 мм, 6 и 4 мм разрезали для определения равномерной толщины слоя и ударным методом разрушали для изучения излома на наличие отбела (рис. 3, в).

По результатам разрушений отливок были отмечены отдельные следы отбела без применения лигатуры и отсутствия отбела с применением бариевой лигатуры 0,5% и магниевой лигатуры 1,5%.

Для увеличения выхода годного металла, так как заливку ранее проводили через массивный центральный стояк с целью гарантированного, как при литье в песчаные формы, получения прилитых образцов и проб-отливок на втором этапе была опробована уменьшенная (упрощенная – без прилитого образца) литниковая система (рис. 4, а). Заливку проводили через боковые стояки с теми же размерами питателей, как при заливке в центральный стояк 10 мм, с толщиной стенок проб-отливок 10 мм, 4 и 3 мм с целью определения минимальной толщины стенки, и более жесткой арматурой диаметром в сечении 10 мм. При этом для удобства заливки применяли песчаную литейную чашу. Заливку проводили с модифицированием и без него через боковые литниковые многоярусные системы.



Рис. 3. Куст стержневых отливок в облицованном кокиле (заливка через центральный стояк) (а); стержневые пробы-отливки с литниковой системой (б); разрезанные шаровые отливки, полученные литьем через центральный стояк с толщиной стенок 10 мм, 6 и 4 мм (в)

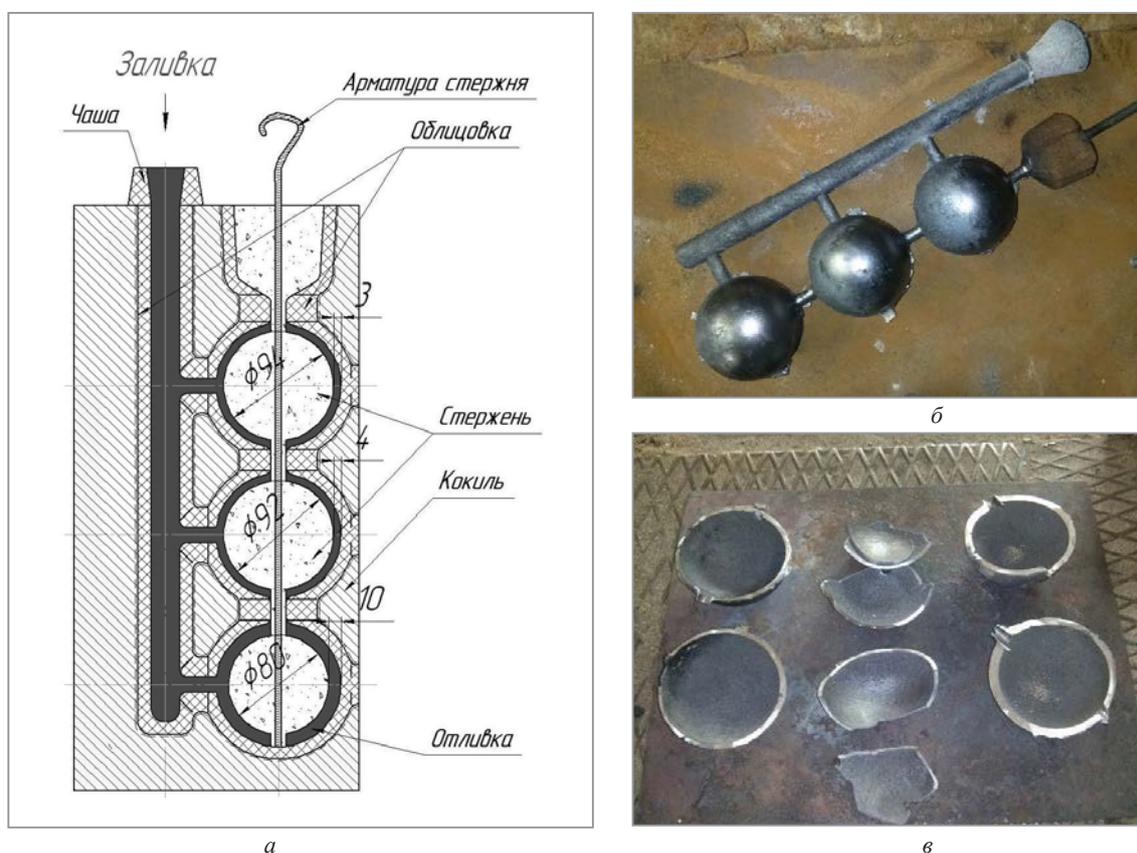


Рис. 4. Технологическая схема простановки стержней в облицованный кокиль для получения отдельных трех проб-отливок от одного стояка (с уменьшенной литниковой системой без прилитых образцов) (а); стержневые отливки в виде полых шаров, полученные уменьшенной литниковой системой (б); изломы ирезы образцов стержневой отливки в виде полого шара, полученного методом литья в облицованный кокиль с уменьшенной литниковой системой (в)

Полученные стержневые отливки разрезали и ударным методом разрушали для получения излома (рис. 4, б, в). На всех изломах с применением лигатур и без наблюдалось отсутствие отбела, поэтому в дальнейшем заливку проводили без модифицирования.

Для сравнения были взяты изломы образцов альтернативных отливок, полученные методом литья в окрашиваемый кокиль с песчаным стержнем (Сковородка) с толщиной стенки 5–6 мм, в которых на изломе был отбел без обработки барием и без отбела, обработанные лигатурой с содержанием бария и высоким содержанием углерода.

Приведенные результаты позволяют предполагать возможное получение тонкостенных отливок толщиной до 3–4 мм при литье в облицованный кокиль без применения лигатур при массовом производстве

(например, изготовление чугунной посуды) с применением в шихте не менее 20% стружки и снижением содержания углерода с 3,9%, которые используются для приготовления чугунной посуды, до 3,4%.

Отдельно отлитые образцы при заливке через боковые стояки также подвергали механической обработке с целью проведения испытаний и определения физико-механических характеристик, получения металлографических снимков и определения химического состава.

Физико-механические характеристики прилитых и отдельно отлитых образцов (рис. 5), отобранных на этапах с заливкой через центральный стояк и с заливкой через боковые стояки, приведены в табл. 1, 2.



Рис. 5. Прилитые и отдельно отлитые образцы, выбранные для исследований и проведения сравнительных результатов (а); образцы после испытаний (б)

Таблица 1. Физико-механические характеристики отдельно отлитых образцов

Номер образца	Способ получения, с применением модификатора	Количество, %	Способ заливки	Твердость НВ	Предел прочности, МПа	
					при первом испытании	при втором испытании
0	Бариевого FiBar 2025	0,5	Через центральный стояк	211	233	-
1	Бариевого FiBar 2025	0,5	Боковая	199	246	219
2	Бариевого FiBar 2025	0,5	Боковая	195	220	259
3	Цериевого FiBarCe	0,5	Боковая	187	207	240
4	Цериевого FiBarCe	0,5	Боковая	187	223	229
5	Магниевого FiMag 5762	1,5	Боковая	260	536	706
6	Магниевого FiMag 5762	1,5	Через центральный стояк	Разрыв в нерасчетной части образца		
7	СЧ20 без применения модификатора	-	Боковая	202	191	-
8	СЧ20 без применения модификатора	-	Боковая	187	202	-
9	СЧ20 без применения модификатора	-	Через центральный стояк	255	257	-

Таблица 2. Химический состав отдельно отлитых образцов

Номер образца	Способ получения, с применением модификатора	Количество, %	Способ заливки	Химический состав, %							
				C	Si	Mn	Mg	P	S	Cr	Cu
0	Бариевого FiBar 2025	0,5	Через центральный стояк	3,25	2,26	0,83		0,02	0,016	0,03	0,11
1	Бариевого FiBar 2025	0,5	Боковая	3,4	2,22	0,56		0,03	0,015	0,035	0,03
2	Бариевого FiBar 2025	0,5	Боковая	3,35	2,39	0,56		0,03	0,015	0,04	0,09
3	Цериевого FiBarCe	0,5	Боковая	3,4	2,57	0,56		0,03	0,015	0,03	0,06
4	Цериевого FiBarCe	0,5	Боковая	3,3	2,6	0,53		0,03	0,015	0,04	0,06
5	Магниевого FiMag 5762	1,5	Боковая	3,3	2,22	0,56	0,29	0,02	0,014	0,03	0,07
6	Магниевого FiMag 5762	1,5	Через центральный стояк	Разрыв в нерасчетной части образца							
7	СЧ20 без применения модификатора	-	Боковая	3,5	2	0,56		0,03	0,02	0,046	0,09
8	СЧ20 без применения модификатора	-	Боковая	3,5	2	0,57		0,03	0,02	0,047	0,05
9	СЧ20 без применения модификатора	-	Через центральный стояк	3,3	1,9	1,28		0,03	0,02	0,042	0,25



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-37-41>  
УДК 620.3; 621.74

Поступила 30.04.2021  
Received 30.04.2021

## МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

П. А. ВИТЯЗЬ, Национальная академия наук Беларуси, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 66  
Н. А. СВИДУНОВИЧ, Д. В. КУИС, Белорусский государственный технологический университет,  
г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а. E-mail: KuisDV@belstu.by

Ю. А. НИКОЛАЙЧИК, С. Л. РОВИН, Белорусский национальный технический университет, г. Минск,  
Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: foundry@bntu.by

*Представлена третья статья цикла, посвященного вопросам применения наноматериалов и нанотехнологий в промышленности в целом и, в первую очередь, в металлургии, материаловедении и литейном производстве. В этой статье рассматриваются вопросы использования наноматериалов при совершенствовании черных и цветных сплавов методами микролегирования и модифицирования, а также синтеза новых композиционных материалов. Представлены результаты исследований и С-В-Fe-композиты, полученные в Белорусском государственном технологическом университете, способ модифицирования серого чугуна микродобавками абразивных шламов быстрорежущих сталей, предлагаемый специалистами БНТУ и ОАО «МТЗ», и алюминиевые сплавы, модифицированные наноструктурированными карбид- и нитридсодержащими порошками, разработанные белорусскими, болгарскими и российскими учеными.*

**Ключевые слова.** Наноструктурированные порошки, литейные сплавы, композиты, модифицирование, фуллерены, карбиды, нитриды.

**Для цитирования.** Витязь, П. А. Модифицирование литейных сплавов наноструктурированными материалами / П. А. Витязь, Н. А. Свидуневич, Д. В. Куис, Ю. А. Николайчик, С. Л. Ровин // *Литье и металлургия*. 2021. № 2. С. 37-41. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-37-41>.

## MODIFICATION OF CAST ALLOYS NANOSTRUCTURED MATERIALS

P. A. VITIAZ, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 66, Nezavisimosti ave.

N. A. SVIDUNOVICH, D. V. KUIS, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str. E-mail: KuisDV@belstu.by

Yu. A. NIKALAICHYK, S. L. ROVIN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: foundry@bntu.by

*The third article of the series devoted to the application of nanomaterials and nanotechnologies in industry in general and, first of all, in metallurgy, materials science and foundry is presented. This article deals with the use of nanomaterials for the improvement of ferrous and non-ferrous alloys by micro-alloying and modifying methods, as well as the synthesis of new composite materials. The results of research on C-B-Fe composites obtained at the Belarusian State Technological University, a method for modifying gray cast iron with micro-additives of abrasive slurries of high-speed steels, proposed by specialists of BNTU and OJSC «MTW», and aluminum alloys modified with nanostructured carbide- and nitride-containing powders developed by Belarusian, Bulgarian and Russian scientists are presented.*

**Keywords.** Nanostructured powders, cast alloys, composites, modification, fullerenes, carbides, nitrides.

**For citation.** Vitiaz P. A., Svidunovich N. A., Kuis D. V., Nikalaichyk Yu. A., Rovin S. L. Modification of cast alloys nanostructured materials. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 37-41. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-37-41>.

*Если вода – простые капельки, неотличимые друг от друга и покрывающие миля за милей поверхность Земли, – способна породить волны и пену, гром прибоя и странные узоры на граните набережной; если все богатство жизни – это всего лишь свойство сгустков атомов, то сколько же еще в них скрыто возможностей?*

Лауреат Нобелевской премии по физике  
Р. П. Фейнман

### Введение

Наноматериалами можно назвать практически любые объекты, вещества или их композиции, размеры структурных элементов которых лежат в «нанодиапазоне» (от 1 до 100 нм). Внедрение наноматериалов – важнейший движитель современной научно-технической революции и развития промышленности.

Первый плюс наноструктурных композиций – возможность суперминиатюризации, приводящей к тому, что на единице площади можно разместить на несколько порядков больше функциональных устройств.

В отличие от обычных материалов, мельчайшие частицы которых содержат более  $10^8$  структурных единиц, частицы наноматериалов могут состоять всего из десятков атомов. Следовательно, наносистемы имеют существенно большую долю атомов, находящихся на поверхности. Например, в поликристаллическом материале с размером зерна порядка 10 мкм только 1/10000 часть атомов принадлежит границе зерна, тогда как при уменьшении размера зерна до 3–4 нм доли атомов, занимающих регулярные позиции в кристаллической решетке и находящихся на границе *нанокристалла*, становятся практически одинаковыми. Эта особенность наноструктурных материалов сильно влияет на их химические и физические свойства (транспортные, каталитические, механические, оптические и др.).

Кроме того, проявление *квантово-размерных эффектов* приводит к резкому изменению основных характеристик наноматериала и появлению новых, зачастую уникальных свойств. Эти эффекты начинают особенно резко проявляться, когда размеры частиц становятся сопоставимы с корреляционным радиусом того или иного физического явления (например, с длиной свободного пробега электронов или фононов, длиной когерентности в сверхпроводнике, размерами магнитного домена или зародыша твердой фазы и др.).

Характерной и важнейшей особенностью наночастиц является также отсутствие дефектов. Это делает, в частности, полупроводниковые наночастицы (*квантовые точки*) идеальными элементами совершенных энергосберегающих лазерных и светоизлучающих элементов. А композиты на базе *углеродных нанотрубок* позволяют создавать конструкции, которые многократно легче и в десятки раз прочнее конструкций из легированных сталей [1–3].

Концепция формирования и развития *наноиндустрии* в Республике Беларусь и план мероприятий по ее реализации утверждены постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 18.02.2013 № 113.

### Результаты применения наноматериалов для модифицирования и микролегирования литейных сплавов

В последнее время появилось достаточно много публикаций, посвященных созданию и применению новых углеродсодержащих материалов на основе фуллеренов, обладающих уникальными свойствами [2–4].

Однако цена фуллеренов остается пока еще очень высокой и их промышленное применение в технике – вопрос не самого ближайшего будущего. Соответственно поиск замены дорогостоящего фуллерена на более дешевый фуллеренсодержащий материал при создании новых материалов является весьма актуальной задачей.

В работе, выполненной учеными БГТУ, была поставлена задача использовать вместо фуллеренов фуллеренсодержащую сажу и многостенные нанотрубки [5–10].

В качестве исходных компонентов для приготовления шихты использовали порошки карбонильного железа с добавками ряда углеродных материалов, изготовленных в США (очищенные и неочищенные нанотрубки, фуллереновая сажа + катализатор Y-Ni, фуллереновая сажа S-106) и в России (дуговая углеродная сажа и фуллерены  $C_{60}$  и  $C_{70}$ ), в соотношении 3, 5 и 10 мас. % С.

Образцы изготавливали методом высокотемпературной интенсивной пластической деформации и легировали бором. В результате были получены сверхлегкие изотропно высокотвердые боруглеродные аморфнонанокристаллические С-В-Fe-композиты с высокой трещиностойкостью, упругостью и износостойкостью. Микротвердость включений супертвердых частиц в полученных композитах составила до 100 ГПа, аморфной углеродной фазы-основы – в пределах 29–89 ГПа, частиц на основе Fe-C – 9,2–10,8 ГПа. Удельный вес композита: С–10%, В–10%, Fe – 2,13–2,168 г/см<sup>3</sup>.

Технология позволяет в широком диапазоне изменять структуру формируемого материала, обеспечивая высокую твердость, износостойкость и режущую способность инструмента. Это открывает возможности создания принципиально новых композиционных инструментальных материалов с уникальными свойствами, с использованием относительно недорогих наноуглеродных материалов, таких, как фуллереновая сажа и экстрагированная фуллереновая сажа.

Разработанный специалистами БНТУ и Минского тракторного завода способ модифицирования серого чугуна микро- и ультрадисперсными добавками материала, полученного в результате магнитной сепарации абразивных шламов быстрорежущих сталей, позволил на 20–25 % увеличить прочность, выровнять твердость по сечению и стабилизировать качество ответственных отливок моторной группы [11, 12].

В ГНУ ИПМ НАН Беларуси разработаны технология и оборудование для модифицирования литейных алюминиевых сплавов наноструктурированными порошками (рис. 1).

Технология введения инертных инокуляторов в доэвтектические силумины состоит из двух этапов: на первом этапе инокуляторы в смеси с флюсами или без них вводили колокольчиком, а на втором осуществляли механическое перемешивание для более равномерного распределения частиц в объеме сплава.

Установлено, что введение в сплав АК9ч наноструктурированного порошка ( $TiC + SiC + TiN$ ) повышает предел прочности с 168,6 до 208,3 МПа (на 23,5%), относительное удлинение – с 1,0 до 1,6% (на 60%), твердость НВ – с 76,3 до 92,2 (на 20,8%), износостойкость – на 30%.

Введение в сплав АК5М2 наноструктурированного порошка ( $Al_2O_3 + TiO_2 + NiO$ ) повышает предел прочности с 159,7 до 199,1 МПа (на 24,8%), относительное удлинение – с 2,0 до 2,6% (на 30%), твердость НВ – с 66,3 до 81,5 (на 22,9%).

В результате проведенных исследований влияния термосиловых параметров на морфологию и распределение в сплаве модифицирующих инокуляторов определены оптимальные параметры процесса: температура заливки – 1150–1250 °С; температура кристаллизатора – 110–120 °С; гравитационный коэффициент  $Gk$  – 180–220 °С; количество флюса в композиции – 10–15%; рекомендуемая частота вращения мешалки при замешивании инокуляторов в расплав – 60–100 об/мин.

Разработанные сплавы предназначены для повышения механических свойств, износостойкости поверхностей трения, снижения коэффициента термического расширения деталей двигателей внутреннего сгорания (поршней, головок и блоков цилиндров, картеров), деталей сельхозмашин, компрессоров железнодорожных вагонов и городского пассажирского транспорта и т.п. [13].

Интересные результаты по влиянию наночастиц, введенных в расплав алюминиевых сплавов на микроструктуру и свойства отливок, были получены учеными из Болгарии. Введение в расплав наночастиц высокотемпературных соединений – нитридов и карбидов, а также нанопорошков алмаза позволило существенно повысить свойства литейных алюминиевых сплавов за счет улучшения микроструктуры и снижения пористости.

Были исследованы отливки из трех алюминиевых сплавов, а именно отливка «Лодка» энергетического назначения (рис. 2) из сплава  $AlSi_7Mg$ , поршень двигателя внутреннего сгорания для гоночных мотоциклов и картингов объемом 50 см<sup>3</sup> из сплава  $AlSi_1_2Cu_2MgNi$  и анодный протектор из сплава  $AlZn_4$ . Составы сплавов приведены в таблице.



Рис. 1. Оборудование для ввода модификаторов и механического перемешивания расплава

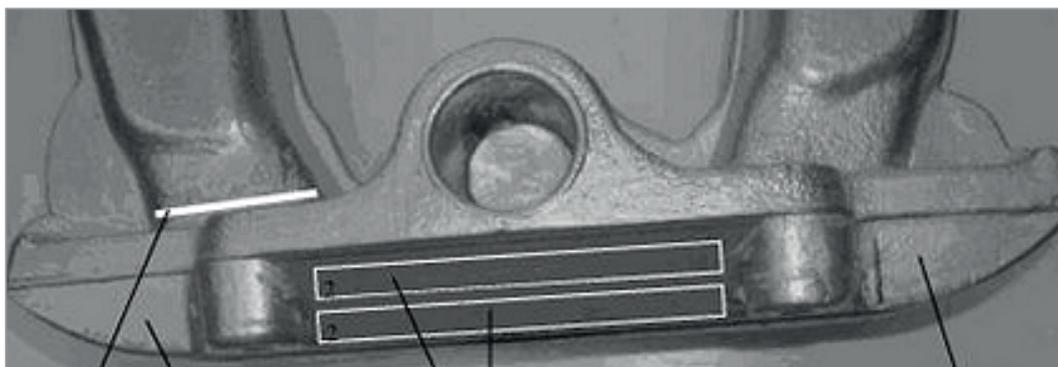


Рис. 2. Отливка «Лодка» из сплава  $AlSi_7Mg$  –деталь высоковольтных ЛЭП

Химический состав исследованных сплавов, мас. % (Al – ост.)

Сплав	Si	Mg	Ti	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Sn	Ni	Cd	In
AlSi <sub>7</sub> Mg	7,73	0,34	0,02	0,53	0,05	0,03	0,10	0,08	0,05	–	–	–
AlSi <sub>12</sub> Cu <sub>2</sub> MgNi	12,73	0,87	0,19	0,39	3,30	0,12	0,10	0,003	0,003	1,75	–	–
AlZn <sub>4</sub>	0,08	–	–	0,18	0,05	–	3,00	–	0,10	–	0,1	0,03

Технология получения сплавов, модифицированных наночастицами, включала в себя:

- плавку алюминиевого сплава в электропечи сопротивления;
- дегазацию жидкого металла при 730–740 °С путем продувки аргоном через графитовую трубку с расходом 1 л/мин в течение 3–5 мин;
- введение наночастиц, завернутых в алюминиевую фольгу и капсулированных в алюминиевом картридже, в расплав при температуре 720–740 °С и механическое перемешивание Ti-миксером в течение 3–5 мин (скорость вращения – до 150 мин<sup>-1</sup>);
- разливку в металлическую форму, разогретую до 150–160 °С.

Отливки для поршней диаметром 45 мм и массой 0,17 кг из сплава AlSi<sub>12</sub>Cu<sub>2</sub>MgNi производятся методом литья под давлением. После получения расплава по указанной выше схеме отливки изготавливали на машине литья под давлением с соблюдением следующего режима:

- температура формы и пуансона – 150–160 °С;
- давление прессования при кристаллизации – 188 МПа;
- время от окончания заливки до приложения давления – 3–4 с;
- время приложения давления – 20 с.

Введение 0,05% композиции (AlN+Al+Cu) и 0,1% (SiC+Cu) в сплав AlSi<sub>7</sub>Mg позволило значительно улучшить микроструктуру, повысить качество и надежность отливок: пористость снизилась на 70%, предел текучести увеличился на 7% и удлинение – на 60%, количество циклов испытаний на усталостную выносливость при нагрузке 70–80 МПа достигло 10<sup>7</sup> [14].

Наноразмерные порошки высокотемпературных (2000–3000 °С) соединений нитридов, карбидов, боридов получают обычно путем плазмохимического синтеза и покрывают металлическим протектором. При достижении гомогенного введения нанопорошков создаются условия локального переохлаждения и объемной кристаллизации, и наночастицы становятся активными центрами кристаллизации. Наночастицы увеличивают долю поверхностной энергии в общем энергетическом балансе сплава, который определяет фазовые превращения. Исследования сплавов металлов, обогащенных наночастицами, показывают, что их механические свойства (предел прочности и относительное удлинение), а также сопротивление коррозии и абразивному износу значительно повышаются [15].

Большинство наночастиц имеют низкую смачиваемость, что затрудняет их усвоение расплавами. Одним из способов решения этой проблемы является покрытие наночастиц металлическим протектором. Такого типа нанопорошки (TiCN, SiC, TiN, AlN), пассивированные олеиновой кислотой для защиты от атмосферных воздействий, производятся Институтом теоретической и прикладной механики Сибирского отделения РАН.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Нанотехнологии. Азбука для всех / Под ред. Ю. Д. Третьякова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 368 с.
2. **Витязь, П. А.** Основы нанотехнологий и наноматериалов / П. А. Витязь, Н. А. Свидунович. Минск: Выш. шк., 2010. 302 с.
3. **Витязь, П. А.** Наноматериаловедение / П. А. Витязь, Н. А. Свидунович, Д. В. Куис. Минск: Выш. шк., 2015. 511 с.
4. **Свидунович, Н. А. и др.** Выбор и применение материалов. В 5-ти т. Минск: Беларуская навука, 2020. 425 с.
5. **Kuis D. V., Urbanovich V. S., Svidunovich N. A., Okatova G. P., Oichenko V. M.** Influence of B and Fe on the structure and the properties of superhard composite on the basis of nano-carbon at high pressure // 13th Biennial International Conference Advancad Carbon Nanostructures: abstracts of invited lectures and contributed papers, St. Peterburg, July 3–5, 2017. P. 169.
6. **Окатова, Г. П.** Структура и свойства нанокompозита на основе железа и нанодисперсного углерода / Г. П. Окатова, Н. А. Свидунович, Д. В. Куис и др. // Химия и химическая технология. Сер. Изв. выс. учеб. завед. 2010. Т. 53. Вып. 10. С. 90–99.
7. **Kuis D. V., Okatova G. P., Svidunovich N. A. et al.** Structure formation of composite based on nanocarbon with the addition of iron-doped amorphous boron in conditions of high pressures and tetnperatures // Nanoscience and Technology: An International Journal. 2019. Vol. 10. No 4. P. 339–353.
8. **Rakovets A. S., Kuis D. K., Svidunovich N. A., Lezhnev S. N.** Effects of complex modifiers containing nanocarbon additives on the structure and properties of high-strength cast iron // Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 2020. Vol. 55. No. 3. P. 559–562.
9. **Раковец, А. С.** Образование сверхтвердой фазы в композитах на основе нанодисперсных углеродных материалов с добавками железа и бора / А. С. Раковец, Д. В. Куис, Н. А. Свидунович, С. Н. Лежнев // Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. В 2-х ч. Минск: БНТУ, 2020. Вып. 41. Ч. 2. С. 77–87.

10. Раковец, А. С. Модифицирование высокоуглеродистых сплавов на основе железа с наноструктурными присадками / А. С. Раковец, Д. В. Куис, Н. А. Свидуневич // *Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр.* В 2-х ч. Минск: БНТУ. 2020. Вып. 41. Ч. 2. С. 88–96.
11. Рудницкий, Ф. И. Модифицирование чугунов ультрадисперсными добавками / Ф. И. Рудницкий, С. А. Куликов // *Литье и металлургия.* 2017. № 1. С. 11–15.
12. Рудницкий, Ф. И. Использование энергии поверхности ультрадисперсных частиц при разработке наномодифицирующих комплексов / Ф. И. Рудницкий, С. А. Куликов, В. А. Шумигай // *Металлургия машиностроения.* 2019. № 6. С. 9–13.
13. Разработка перспективных нанотехнологий в ГПНО порошковой металлургии / А. Ф. Ильющенко // *Наноструктурные материалы: Беларусь–Россия–Украина. НАНО-2014: сб. пленар. докл. IV Междунар. науч. конф. Минск, 7–10 окт. 2014.* Минск: Беларуская навука, 2015. 256 с.
14. Dimitrova R., Stanev S., Velikov A., Cherepanov A., Lazarova R., Bojanova N. Investigation of AlSi7Mg casting refined with SiC nano-powder. *J. Mater. Sci. Technol.* 20(4), 319–326 (2012)
15. Razavi M., Rahimpour M. R., Rajabi-Zamani A. H. Effect of nanocrystalline TiC powder addition on the hardness and wear resistance of cast iron. *Mater. Sci. Eng., A* 454–455, 144–147 (2007).

## REFERENCES

1. *Nanotehnologii. Azbuka dlja vseh* [Nanotechnology. ABC for everyone]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008, 368 p.
2. Vitjaz' P.A., Svidunovich N.A. *Osnovy nanotehnologii i nanomaterialov* [Fundamentals of Nanotechnology and Nanomaterials]. Minsk, Vyshhejskaja shkola Publ., 2010, 302 p.
3. Vitjaz' P.A., Svidunovich N.A., Kuis D.V. *Nanomaterialovedenie* [Nanomaterials Science]. Minsk, Vyshhejskaja shkola Publ., 2015, 511 p.
4. Svidunovich N.A., Vitjaz' P.A., Vojtov I.V., Kuis D.V., Mjurek M.N. *Vybor i primenenie materialov* [Selection and application of materials]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2020, 425 p.
5. Kuis D.V., Urbanovich V.S., Svidunovich N.A., Okatova G.P., Oichenko V.M. Influence of B and Fe on the structure and the properties of superhard composite on the basis of nano-carbon at high pressure. 13th Biennial International Conference Advancad Carbon Nanostructures: abstracts of invited lectures and contributed papers, St. Peterburg, July 3–5, 2017, 169 p.
6. Okatova G.P., Svidunovich N.A., Kuis D.V., Urbanovich V.S., Ojchenko V.M., Korzhenevskij A.P. Struktura i svojstva nanokompozita na osnove zheleza i nanodispersnogo ugljeroda [Structure and properties of a nanocomposite based on iron and nanodispersed carbon]. *Himija i himicheskaja tehnologija = Chemistry and chemical technology*, 2010, vol. 53, vyp. 10, pp. 90–99.
7. Kuis D.V., Okatova G.P., Svidunovich N.A., Rakavets A.S., Urbanovich V.S., Sedov A.I., Leztynev S.N., Panin E.A. Structure formation of composite based on nanocarbon with the addition of iron-doped amorphous boron in conditions of high pressures and tetnperatures. *Nanoscience and Technology: An International Journal*, 2019, vol. 10, Issue 4, pp. 339–353.
8. Rakovets A.S., Kuis D.V., Svidunovich N.A., Lezhnev S.N. Effects of complex modifiers containing nanocarbon additives on the structure and properties of high-strength cast iron. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 559–562.
9. Rakovets A.S., Kuis D.V., Svidunovich N.A., Lezhnev S.N. Obrazovanie sverhtverdoj fazy v kompozitah na osnove nanodispersnyh ugljerodnyh materialov s dobavkami zheleza i bora [Formation of a superhard phase in composites based on nanodispersed carbon materials with additions of iron and boron]. *Metallurgija: respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers.* Minsk, BNTU Publ., 2020, vyp. 41, part 2, pp. 77–87.
10. Rakovec A.S., Kuis D.V., Svidunovich N.A. Modificirovanie vysokouglerodistyh splavov na osnove zheleza s nanostrukturnymi prisadkami [Modification of high-carbon iron-based alloys with nanostructured additives]. *Metallurgija: respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers.* Minsk, BNTU Publ., 2020, vyp. 41, part 2, pp. 88–96.
11. Rudnickij F.I., Kulikov S.A. Modificirovanie chugunov ul'tradispersnymi dobavkami [Modification of cast irons with ultrafine additives]. *Lit'je i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2017, no. 1, pp. 11–15.
12. Rudnickij F.I., Kulikov S.A., Shumigaj V.A. Ispol'zovanie jenerгии poverhnosti ul'tradispersnyh chastic pri razrabotke nanomodificirujushih kompleksov [Using the surface energy of ultradispersed particles in the development of nanomodifying complexes]. *Metallurgija mashinostroenija = Metallurgy of mechanical engineering*, 2019, no. 6, pp.9–13.
13. Il'jushhenko A.F. Razrabotka perspektivnyh nanotehnologii v GPNO poroshkovej metallurgii [Development of promising nanotechnologies in the GPNO powder metallurgy]. *Nanostrukturnye materialy: Belarus'–Rossija–Ukraina = Nanostructured materials: Belarus – Russia – Ukraine, NANO-2014: sbornik plenarnyh dokladov IV Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, Minsk, 7–10 okt. 2014* [NANO – 2014: collection of plenary reports of the IV International Scientific Conference, Minsk, October 7–10. 2014]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2015, 256 p.
14. Dimitrova R., Stanev S., Velikov A., Cherepanov A., Lazarova R., Bojanova N. Investigation of AlSi7Mg casting refined with SiC nano-powder. *J. Mater. Sci. Technol.* 20(4), 319–326 (2012).
15. Razavi M., Rahimpour M. R., Rajabi-Zamani A. H. Effect of nanocrystalline TiC powder addition on the hardness and wear resistance of cast iron. *Mater. Sci. Eng., A* 454–455, 144–147 (2007).



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-42-48>  
УДК 669.16

Поступила 30.04.2021  
Received 30.04.2021

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛИ И СПЛАВОВ ДЛЯ ПЕРЕСМОТРА УСТАРЕВШИХ ГОСТ

А. А. КАЗАКОВ, Д. В. КИСЕЛЕВ, Е. И. КАЗАКОВА, ООО «Тиксомет», г. Санкт-Петербург, Россия.  
E-mail: [spblenal@mail.ru](mailto:spblenal@mail.ru)

*Текущее состояние ГОСТ, регламентирующих качество структуры сталей и сплавов, значительно отстало от прогресса в составах и технологиях получения современных сталей и сплавов. На примере микроструктурной полосчатости стали показано, как можно преодолеть это отставание и довести разработанную в России методику до уровня межгосударственного ГОСТ.*

*Рассмотрены другие решенные с помощью анализатора изображений задачи количественной оценки структурных составляющих сталей и сплавов, которые могут стать основой отраслевых, национальных и межгосударственных стандартов: микроструктурная неоднородность листового проката; неметаллические включения в стали, включая автоматизацию ГОСТ 1778-70, методы оценки с использованием методики ASTM E1245 и статистики экстремальных значений, а также автоматического анализа частиц; центральная осевая неоднородность слэба; ликвационная полоса в листовом прокате; доля грубых бейнитных блоков для описания свойств современных трубных сталей; структура швов после многопроходной сварки; металлургическое качество жаропрочных никелевых сплавов; структура сплавов, обработанных в полутвердом состоянии; структура доэвтектических силуминов; неметаллические включения в алюминиевых сплавах (метод PoDFA); структура высокопрочного чугуна; распределение зерен по размерам.*

**Ключевые слова.** Устаревшие ГОСТ, металлографические методы, структура сталей и сплавов, количественная металлография, анализ изображения.

**Для цитирования.** Казаков, А. А. Количественные методы оценки микроструктуры стали и сплавов для пересмотра устаревших ГОСТ / А. А. Казаков, Д. В. Киселев, Е. И. Казакова // *Литье и металлургия*. 2021. № 2. С. 42–48. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-42-48>.

## QUANTITATIVE METHODS FOR ASSESSING THE MICROSTRUCTURE OF STEEL AND ALLOYS FOR REVISING OUTDATED GOST STANDARDS

A. A. KAZAKOV, D. V. KISELEV, E. I. KAZAKOVA, LLC "Tiksomet", St. Petersburg, Russia.  
E-mail: [spblenal@mail.ru](mailto:spblenal@mail.ru)

*The current state of GOST, which regulates the quality of the structure of steels and alloys, has significantly lagged behind the progress in the compositions and technologies for obtaining modern steels and alloys. Using the example of microstructural banding of steel, it is shown how to overcome this gap and bring the methodology developed in Russia to the level of interstate GOST.*

*Other problems of quantitative evaluation of structural components of steels and alloys that can become the basis of industry, national and interstate standards are considered: microstructural heterogeneity of sheet metal; non-metallic inclusions in steel, including automation of GOST 1778-70, evaluation methods using the ASTM E1245 methodology and statistics of extreme values, as well as automatic particle analysis; central axial inhomogeneity of a slab; liquation strip in sheet metal; the proportion of coarse bainite blocks used to describe the properties of modern pipe steels; the structure of joints after multi-pass welding; the metallurgical quality of heat-resistant nickel alloys; the structure of alloys treated in a semi-solid state; the structure of pre-eutectic silumins; non-metallic inclusions in aluminum alloys (PoDFA method); the structure of high-strength cast iron; grain size distribution.*

**Keywords.** Outdated GOST, metallographic methods, structure of steels and alloys, quantitative metallography, image analysis.

**For citation.** Kazakov A. A., Kiselev D. V., Kazakova E. I. Quantitative methods for assessing the microstructure of steel and alloys for revising outdated GOST standards. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 42–48. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-42-48>.

Многие отечественные ГОСТ, регламентирующие качество структуры стали, были разработаны еще в 70-х годах прошлого века и с тех пор не пересматривались. Между тем, с тех пор произошли радикальные изменения в составе сталей и технологии их получения, а, значит, такие же изменения произошли в их структуре.

Практически все ГОСТ основаны на субъективной визуальной оценке с помощью стандартных шкал, тогда как уже десятки лет в металлографических лабораториях на предприятиях используют автоматизированные анализаторы изображений, работающие с цифровыми камерами и способные «оцифровывать» структуру для ее количественного описания [1]. Основы стереологической металлографии были созданы в России в 50–70-х годах прошлого века С. А. Салтыковым, однако первые стандарты по количественной металлографии, базирующиеся на его работах и работах его последователей во всем мире, появились в США в начале 2000 годов, например, ASTM E1245 и ASTM E1268. Таким образом, научно-технические разработки, выполненные в России, остаются невостребованными в нашей стране, но активно используются за рубежом. Позже эти разработки возвращаются в Россию, но с уже приоритетом стандартов других стран.

Приведем один из последних примеров, когда металлографические методики, впервые разработанные в России, много позже вернулись в нашу страну из-за рубежа как переводные стандарты других стран. Эти новые ГОСТ нередко повторяют те ошибки, которые допустили западные разработчики, не в полной мере понимая техническое существо методик, изложенных в русскоязычной литературе. Речь идет об оценке микроструктурной полосчатости в стали.

ГОСТ 5640-68 предусматривает визуальную оценку полосчатости с помощью стандартных шкал, которые в этом ГОСТ приведены только для феррито-перлитных сталей, актуальных для середины прошлого века, тогда как сегодня большинство современных трубных, корабельных и арксталей имеют феррито-бейнитную или более сложную структуру. Трудно представить, как на заводах проводили прямо-сдаточные испытания этих сталей, если в документации этих испытаний ссылаются на ГОСТ 5640-68.

В 2007 г. по результатам работ с ОАО «ВНИИСТ» и многими трубными заводами специалистами ООО «Тиксомет» были разработаны стандартные шкалы для феррито-бейнитных сталей, а на основе фундаментальных стереологических подходов, следующих из критического анализа работ С. А. Салтыкова, разработана количественная методика оценки микроструктурной полосчатости с помощью автоматического анализатора изображения [2]. Заметим, что эта методика «оцифровывает» любую полосчатость, включая предусмотренную ГОСТ 5640-68 феррито-перлитную, а также феррито-бейнитную или более сложную. Важно только, чтобы структурные составляющие объединялись в полосы, отличные по уровню серого от окружающей их металлической матрицы. К сожалению, эта работа осталась без внимания, когда в 2011 г. техническим комитетом по стандартизации ТК 145 «Методы контроля металлопродукции» американский стандарт десятилетней давности ASTM E1268-01 [3] был переведен на русский язык и назван ГОСТ Р 54570-2011. «Сталь. Методы оценки степени полосчатости или ориентации микроструктур».

Детальный анализ ASTM E1268-01, опубликованный сначала в отечественной литературе [2], а позднее вместе с автором этого стандарта в США [4, 5], показал, что использованные в нем критерии не могут описать полосчатость. Как написано в стандарте, «индекс анизотропии не может различить, где структура ориентирована вдоль прокатки, а где она полосчатая». Поэтому ASTM E1268-01, несмотря на правильно выбранный метод оценки (направленные секущие), не способен количественно оценить полосчатость, поэтому ее описывали словесно. В этом смысле старый ГОСТ 5640-68, в котором есть шестиступенчатая визуальная оценка полосчатости с помощью соответствующей шкалы, является более прогрессивным стандартом, чем ASTM E1268-01 или его русский аналог ГОСТ Р 54570-2011.

После публикаций в США [4, 5] методики количественного описания полосчатости стали, разработанной в России [2], американский комитет ASTM по металлографии E-04 весной 2018 г. инициировал пересмотр ASTM E1268-01. Изменения были внесены последовательно в двух новых редакциях ASTM E1268-18 [6] и ASTM E1268-19 [7], причем в последней со ссылкой на российский приоритет этой методики. Таким образом, разработанный в России в 2007 г. метод количественной оценки полосчатости [2] стал основой ASTM E1268 в 2018–2019 гг. [6, 7].

Такая ситуация с устаревшими ГОСТ в России сложилась потому, что у нас нет государственной программы или иного механизма пересмотра стандартов. Этой работой по собственной инициативе, поддержанной заводами, занимаются профильные технические комитеты, действующие при ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина», у которых нет ни достаточных технических ресурсов, ни системной финансовой поддержки. Время от времени за счет долевого участия нескольких заводов инициируется пересмотр того или иного стандарта. Так, в декабре 2020 г. после двух лет публичного обсуждения со всеми заинтересованными техническими специалистами профильных предприятий и организаций был

принят, а в 2021 г. опубликован ГОСТ 5640-2020 [8], где использованы новые стандартные шкалы для феррито-бейнитных сталей и количественная методика оценки полосчатости с помощью анализа изображения, заимствованные из работ [2, 4]. К сожалению, эта методика в ГОСТ 5640-2020 введена факультативно, тогда как в ASTM E1268-19 она стала основой стандарта.

В последние 20 лет для поиска закономерностей «структура-свойства» проводятся системные исследования по оцифровке структуры сталей и сплавов различного назначения [1, 2, 4–30]. Кроме уже упомянутой полосчатости, реализованной в ASTM E1268-19 [7] и ГОСТ 5640-2020 [8], это касается количественной оценки других структурных составляющих сталей и сплавов: микроструктурной неоднородности в листовом прокате [9–11]; неметаллических включений в стали [12–17], включая не только автоматизацию ГОСТ 1778-70 [12], но новые методы оценки с использованием ASTM E1245 [13] и статистики экстремальных значений [14, 15], автоматического анализа частиц для объективной оценки их химического состава [16, 17]; центральной осевой неоднородности сляба и ликвационной полосы в листовом прокате [18, 19]; доли грубых бейнитных блоков для описания свойств современных трубных сталей [20, 21]; структуры швов после многопроходной сварки [22, 23]; металлургического качества суперсплавов [24]; структуры сплавов, обработанных в полутвердом состоянии [25]; структуры доэвтектических силуминов [26, 27]; оценки неметаллических включений в алюминиевых сплавах методом PoDFA [28], структуры высокопрочного чугуна [29]; распределения зерен по размерам [30]. Остановимся кратко на некоторых из них.

Разработана методика оценки анизотропии микроструктуры по толщине листового проката, основанная на текстурном анализе изображения [9]. Методика предусматривает оценку анизотропии на двух размерных уровнях: в ближнем и дальнем окружении, которые характеризуют вытянутость вдоль линии прокатки мелких и крупных структурных элементов соответственно. Выполнен сравнительный автоматизированный комплексный анализ микроструктурной неоднородности листового проката из низколегированных хладостойких сталей арктического применения толщиной 25, 50 и 70 мм, изготовленного по технологии термомеханической обработки с различными температурно-деформационными параметрами [10]. Полученные результаты количественной оценки микроструктурной неоднородности по толщине листового проката использованы для ее детальной интерпретации с учетом металлургической наследственности сляба и особенностей технологии двухстадийной термомеханической обработки с ускоренным охлаждением [11].

Разработана методика автоматического разделения неметаллических включений по всем типам, предусмотренным методом Ш6 ГОСТ 1778-70 [12]. На основе результатов «оцифровки» эталонных шкал, а также с учетом уравнений, положенных в основу их создания, обоснованы формулы для пересчета объемного процента включений в балл, соответствующей шкалы ГОСТ 1778-70. Таким образом, ГОСТ 1778-70 гармонизирован с ASTM E1245. Балл назначается на основе стереологических параметров, измеренных для каждого из найденных типов включений при панорамных исследованиях с помощью автоматического анализатора изображений.

Разработана методика оценки загрязненности неметаллическими включениями (НВ) кованой обечайки из сверхкрупного слитка массой 420 т. Методика основана на отдельной оценке мелких эндогенных и крупных экзоэндогенных НВ согласно гипотезе о том, что крупные составляют не более 5% от общего числа всех найденных НВ. Для оценки мелких эндогенных НВ использован стандарт ASTM E 1245, а для крупных экзоэндогенных – модифицированный ГОСТ 1778-70 применительно к панораме всей поверхности образца площадью 300 мм<sup>2</sup>. Такой подход позволил существенно повысить точность измерений загрязненности НВ в поковках из сверхкрупных слитков массой до 420 т стали 15X2НМФА кл. 1 [13].

Рассмотрены практические примеры использования методов статистики экстремальных значений, реализованной в ASTM E 2283, для оценки НВ в сталях ответственного назначения. Предложена оригинальная методика интерпретации результатов измерений, полученных по стандарту ASTM E 2283, позволяющая расширить границы его применимости на экзогенные включения. Показано, что методику ASTM E2283 можно применять не только для прогнозирования максимально возможных эндогенных НВ, но и для выявления случайных одиночных экзогенных включений среди всех обнаруженных НВ, а также для прогнозирования размеров максимально возможных экзогенных включений, если последние имеют системный источник попадания в расплав и описываются соответствующим распределением Гумбеля [14, 15].

На примере высокопрочной низколегированной стали [16] и рельсовой стали [17] показаны новые возможности автоматизированного метода анализа частиц для оценки загрязненности стали неметаллическими

включениями. Базы данных по составу включений с большим количеством анализируемых частиц в сочетании с методами термодинамического моделирования позволяют определить природу включений с учетом всего многообразия теплофизических, гидродинамических и физико-химических процессов, протекающих в жидкой и затвердевающей стали. Полученные данные по количеству и составу включений обеспечивают адекватное описание процессов раскисления и модифицирования стали по ходу технологического передела и могут быть использованы для совершенствования технологии ее производства.

Для оценки ликвационной полосы в листовом прокате использованы как прямые металлографические методы обработки изображений с помощью преобразования Фурье, так и метод микротвердости, позволяющий косвенно оценить концентрации сегрегаций, наследуемых в полосе от осевой неоднородности литой заготовки [18]. Выявлена корреляция между классом ликвационной полосы в листе и характером распределения сегрегационных точек в осевой зоне сляба. Широкая зона сегрегаций в осевой зоне сляба всегда приводит к высокому классу ликвационной полосы в листе при любой объемной доле точек сегрегации в слябе. В узкой центральной зоне осевой сегрегации сляба класс ликвационной полосы в листе линейно возрастает с увеличением объемной доли точек сегрегации [19].

Для объективной количественной оценки всех видов структурной неоднородности в современных сталях для трубопроводов разработан и установлен на десятках предприятий и компаний анализатор изображения Thixomet PRO [20]. Структурная неоднородность, оцениваемая по объемной доле и размеру вытянутых блоков бейнита реечной морфологии [21], адекватно описывает все механические свойства трубных сталей с пределом текучести от 485 до 625 Н/мм<sup>2</sup> [20].

Установлены закономерности «структура–свойства» для нижних слоев сварного соединения при многопроходной электродуговой автоматической сварке порошковой проволокой в среде защитных газов на примере штрипса категории прочности X70 (09Г2ФБЮ) толщиной до 25 мм. Объемная доля аллотриоморфного феррита измерена на панорамных изображениях под поверхностью разрушения образцов на ударный изгиб. Сформулированы требования к его доле, гарантирующей высокую ударную вязкость нижних слоев сварного соединения [22, 23].

Оценка металлургического качества паспортной шихтовой заготовки жаропрочного никелевого сплава проводится по комплексным критериям, позволяющим по уровню серого, морфологии и характера взаимного расположения распознать оксидные пленки, нитридные кластеры и шлаковые глобулы. Рейтинговый балл металлургического качества турбинных лопаток рассчитывается с учетом количества, размера и трудности удаления из расплава этих загрязнений [24].

Разработаны металлографические методы оценки структуры алюминиевых сплавов после их обработки в полутвердом состоянии: распределение пористости, концентрации кремния, фактора формы зерен  $\alpha$ -Al по сечению литой заготовки, а также многосвязности 3D-структуры этих сплавов [25].

Разработаны методики количественной оценки микроструктуры и установлены количественные закономерности «структура-свойства» для промышленных доэвтектических медистых силуминов [26, 27]. Методики основаны на анализе панорамных изображений и позволяют оценить дисперсность дендритной структуры, размер интерметаллидных включений, объемную долю эвтектики, ее морфологию, согласующуюся со шкалой микроструктур силуминов Американского общества литейщиков, а также пористость, согласующуюся с баллом по ГОСТ 1583-93.

Разработан и реализован в виде программного модуля анализатора изображений Thixomet Pro алгоритм автоматизированного определения загрязненности алюминиевых сплавов неметаллическими включениями по методике PoDFA [28]. Адаптивный алгоритм сегментации изображений позволяет автоматически распознавать скопления включений на фоне неравномерной по освещенности металлической матрицы, включая участки с рельефом металла, как со стороны металла на границе металл – фильтр, так и в порах фильтра, заполненных металлом на глубину до 0,5 мм. Скопления включений разных типов разделены автоматически по их оптическим и морфологическим признакам. Высокопроизводительный алгоритм кластеризации, основанный на построении евклидовой карты расстояний, позволяет в режиме реального времени группировать включения даже на полноразмерных панорамных изображениях всей поверхности шлифа с учетом объединения включений по методике PoDFA.

Все эти методики реализованы в анализаторе изображения Thixomet и установлены в нескольких сотнях металлографических лабораторий России. Каждый день эти методики используются на предприятиях, но полученные результаты «оцифрованных» структур используют только в исследовательских целях, так как для их использования в приемо-сдаточных испытаниях отсутствует соответствующая нормативная база (ГОСТ).

Важной составляющей количественной металлографии является метрологическая ценность полученных результатов измерений. В России существует формальная процедура включения анализатора изображений в реестр средств измерений, основанная на измерениях объект-микрометра при разных увеличениях. Но реальные измерения микроструктуры всегда связаны с более сложными измерениями, чем линейные. Поэтому измерение объект-микрометра следует использовать только для калибровки анализатора, а для оценки точности измерений микроструктуры необходимо проводить межлабораторные круговые сличения, которые являются также и признанной практикой проверки работоспособности любого металлографического стандарта. Если методика измерений правильная, то результаты «оцифровки» структуры должны быть статистически одинаковые при измерении одних и тех же изображений в любой лаборатории, оснащенной приборами и программным обеспечением, прошедшими межлабораторные круговые сличения. Организатор этих сличений рассылает в разные металлографические лаборатории изображения структур, где каждая из них «оцифровывается» согласно методике, принятой в стандарте. Далее все первичные результаты «оцифровки» от всех лабораторий поступают организатору межлабораторных круговых сличений, который их обрабатывает, определяя средние значения и доверительный интервал по каждой группе структур. Эти обобщенные результаты рассылаются всем участникам, которые сами смогут оценить метрологическую ценность полученных ими результатов «оцифровки» структуры.

Все пересмотренные или вновь создаваемые ГОСТ, посвященные количественной металлографии, должны быть проверены в межлабораторных круговых сличениях. Поэтому для каждого типа структур нужно приготовить серию их цифровых изображений, которые будут использованы для процедуры сличения.

Цифровая металлография с использованием анализаторов изображений, прошедших межлабораторные круговые сличения, существенно упростит приемо-сдаточные испытания между поставщиком и потребителем металлопродукции, когда технические эксперты будут сравнивать цифры, характеризующие качество микроструктуры, а не спорить, какому баллу по их субъективному мнению соответствует данная микроструктура.

Сейчас на государственном уровне в России объявлен курс на «цифровую экономику», поэтому выполненные за последние 20 лет работы [1, 2, 4–31] по «цифровой металлографии» могли бы обрести статус отраслевых стандартов и ГОСТ, которые внесут значимый вклад в реализацию этой государственной программы.

Статья написана по материалам заявки на грант РНФ № 19–73–20075 «Цифровые технологии в металлографии для оценки структуры материалов», которая была не поддержана на конкурсе 2019 года «Проведение исследований на базе существующей научной инфраструктуры мирового уровня» Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Kazakov A. A., Kiselev D.** Industrial Application of Thixomet Image Analyzer for Quantitative Description of Steel and Alloys. *Metallogr., Microstruct., Anal.*, 2016. Vol. 5. No. 4. p. 294–301, <http://dx.doi.org/10.1007/s13632-016-0289-6>.
2. Разработка методики количественной оценки микроструктурной полосчатости низколегированных трубных сталей с помощью автоматического анализа изображений. А. А. Казаков, Д. В. Киселев, С. В. Андреева и др. *Черные металлы*. 2007. № 7–8. С. 31–37.
3. ASTM E1268-01(2016), Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2016. [www.astm.org](http://www.astm.org).
4. **Kazakov A., Kiselev D., Kazakova E., Vander Voort G. F., Chigintsev L.** Quantitative Description of Microstructural Banding in Steels. *Materials Performance and Characterization*, <https://doi.org/10.1520/MPC20160009>. ISSN 2165–3992.
5. **Kazakov A., Vander Voort G. F., Kiselev D., Kazakova E.** ASTM E1268: From Improvement to the New Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures by Automatic Image Analysis, 100 Years of E04 Development of Metallography Standards, ASTM STP1607. <http://dx.doi.org/10.1520/STP1607201702063>.
6. ASTM E1268-18, Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, [www.astm.org](http://www.astm.org).
7. ASTM E1268-19, Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, [www.astm.org](http://www.astm.org).
8. ГОСТ 5640-2020 СТАЛЬ. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры проката стального плоского, <http://protect.gost.ru/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=0&month=9&year=-1&search=&id=239643>.
9. Методика оценки микроструктурной неоднородности по толщине листового проката из хладостойкой низколегированной стали арктического применения / А. А. Казаков, Д. В. Киселев, О. В. Сыч, Е. И. Хлусова // *Черные металлы*. 2020. № 9. С. 11–19.

10. Quantitative Assessment of Microstructural Inhomogeneity by Thickness of Hot-Rolled Plates Made of Cold-Resistant Low-Alloy Steel for Arctic Applications / A. A. Kazakov, D. V. Kiselev, O. V. Sych, E. I. Khlusova. *CIS Iron and Steel Review*. 2020. Vol. 20. P. 41–49.
11. Количественная оценка структурной неоднородности в листовом прокате из хладостойкой низколегированной стали для интерпретации технологических особенностей его изготовления / А. А. Казаков, Д. В. Киселев, О. В. Сыч, Е. И. Хлусова // *Черные металлы*. 2020. № 11. С. 4–14.
12. Разработка методики количественной оценки загрязненности низколегированных трубных сталей неметаллическими включениями с помощью автоматического анализа изображений / А. А. Казаков, Д. В. Киселев, С. В. Андреева, А. А. Мясников, С. В. Головин, В. А. Егоров // *Черные металлы*. 2007. № 7–8. С. 24–31.
13. Количественная оценка неметаллических включений для поковок из сверхкрупных слитков / А. А. Казаков, А. И. Житенев, Э. Ю. Колпишон, М. А. Салынова // *Черные металлы*. 2018. № 7. С. 50–56.
14. Extension of ASTM E2283 standard practice for the assessment of large exogenous nonmetallic inclusions in super duty steels / A. A. Kazakov, A. I. Zhitenev, M. A. Salinova. *CIS Iron and Steel Review*. 2019. Vol. 18. P. 20–26.
15. **Казаков А.А., Житенев А.И., Салынова М.А.** Расширение возможностей статистики экстремальных значений для оценки природы крупных неметаллических включений в сталях ответственного назначения // *Черные металлы*. 2019. № 8. С. 46–50.
16. Исследование природы неметаллических включений в стали с помощью автоматического анализатора частиц / А. А. Казаков, Д. А. Любочко, С. В. Рябшук, Л. С. Чигинцев // *Черные металлы*. 2014. № 4 (988). С. 37–42.
17. **Kazakov A., Zhitenev A., Ryaboshuk S.** Interpretation and Classification of Non-Metallic Inclusions // *Materials Performance and Characterization*, <https://doi.org/10.1520/MPC20160040>. ISSN 2165–3992.
18. Методика оценки ликвационной полосы листового проката / А. А. Казаков, Л. С. Чигинцев, Е. И. Казакова, С. В. Рябшук, С. И. Марков // *Черные металлы*. 2009. № 12. С. 17–22.
19. Assessment of central heterogeneity in slab to forecast centerline segregation in plate steel / A. A. Kazakov, E. I. Kazakova, A. A. Kur // *CIS Iron and Steel Review*. 2018. Vol. 16. P. 49–52.
20. Microstructural quantification for pipeline steel structure-property relationships / A. Kazakov, D. Kiselev, O. Pakhomova // *CIS Iron and Steel Review*. 2012. P. 4–12.
21. Investigation of the Origin of Coarse-Grained Bainite in X70 Pipeline Steels by EBSD Technique / N. Zolotarevsky, E. Kazakova, A. Kazakov, S. Petrov, S. Panpurin // *Materials Performance and Characterization*. <https://doi.org/10.1520/MPC20160031>.
22. Structural Investigation and Control of Multi-Pass Gas-Shielded Flux-Cored Arc Weldments / A. Kazakov, E. Kazakova, M. Karasev, D. Lubochko // *Materials Performance and Characterization*, <https://doi.org/10.1520/MPC20160035>.
23. Влияние структуры на свойства нижних слоев сварных швов при многопроходной электродуговой сварке стали 09Г2ФБЮ порошковой проволокой в среде защитных газов / А. А. Казаков, М. В. Карасев, Е. И. Казакова // *Сварка и диагностика*. 2017. № 4. С. 47–54.
24. **Kazakov A. A., Kiselev D. V.** Metallurgical Quality Characterization of Nickel-Based Superalloys // *CIS Iron and Steel Review*. 2007. No. 1–2. P. 40–43.
25. **Kazakov A. A., Luong N. H.** Characterization of Semisolid Materials Structure // *Mater. Character.* 2001. Vol. 46. No. 2–3. P. 155–161.
26. Quantitative Characterization of Hypoeutectic Aluminum–Silicon–Copper As-Cast Alloy Microstructures / Kazakov A., Kur A., Kazakova E., Kiselev D. // *Materials Performance and Characterization*. <https://doi.org/10.1520/MPC20160025>.
27. Разработка количественных методов оценки структуры доэвтектических силуминов для прогнозирования их механических свойств // А. А. Казаков, А. А. Кур, Д. В. Киселев, Е. Б. Лазутова // *Цветные металлы*. 2014. № 4. С. 39–43.
28. **Казаков А.А., Киселев Д.В., Кур А.А.** Автоматизированная оценка неметаллических включений в алюминиевых сплавах по методике PoDFA с помощью анализа изображений // *Цветные металлы*. 2019, № 3(915), С. 43–51.
29. **Казаков А.А., Андреева С.В., Киселев Д.В.** Количественная оценка параметров структуры высокопрочного чугуна как основа прогнозирования механических свойств // *Тр. СПбГТУ*. 2009. № 510. С. 200–208.
30. **Vander Voort G. F., Pakhomova O., Kazakov A.** Evaluation of Normal Versus Non-Normal Grain Size Distributions // *Materials Performance and Characterization*. <https://doi.org/10.1520/MPC20160001>. ISSN 2165–3992.

## REFERENCES

1. **Kazakov A.A., Kiselev D. V.** Industrial Application of Thixomet Image Analyzer for Quantitative Description of Steel and Alloys. *Metallogr., Microstruct., Anal.*, 2016, Vol.5, No. 4, pp. 294–301, <http://dx.doi.org/10.1007/s13632-016-0289-6>.
2. **Kazakov A.A., Kiselev D.V., Andreeva S.V., Chigincev L.S., Golovin S.V., Egorov V.A., Markov S.I.** Razrabotka metodiki kolichestvennoj ocenki mikrostrukturnoj poloschatosti nizkolegirovannyh trubnyh stalej s pomoshh'ju avtomaticheskogo analiza izobrazhenij [Development of a technique for quantitative assessment of microstructural banding of low-alloy pipe steels using automatic image analysis]. *Chernye metalli = Black metals*, 2007, no. 7–8, pp. 31–37.
3. ASTM E1268–01(2016), Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, [www.astm.org](http://www.astm.org).
4. **Kazakov A.A., Kiselev D.V., Kazakova E.I., Vander Voort G.F., Chigintsev L.** Quantitative Description of Microstructural Banding in Steels. *Materials Performance and Characterization*, <https://doi.org/10.1520/MPC20160009>. ISSN 2165–3992.
5. **Kazakov A.A., Vander Voort G.F., Kiselev D.V., Kazakova E.I.** ASTM E1268: From Improvement to the New Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures by Automatic Image Analysis” 100 Years of E04 Development of Metallography Standards, ASTM STP1607. <http://dx.doi.org/10.1520/STP1607201702063>.
6. ASTM E1268-18, Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, [www.astm.org](http://www.astm.org).
7. ASTM E1268-19, Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, [www.astm.org](http://www.astm.org).

8. GOST5640-2020. STAL. Stal'. Metallograficheskij metod ocenki mikrostruktury prokata stal'nogo ploskogo [State Standart 5640-2020. STEEL. Steel. Metallographic method for evaluating the microstructure of flat steel rolled products].
9. **Kazakov A.A., Kiselev D.V., Sych O.V., Hlusova E.I.** Metodika ocenki mikrostrukturnoj neodnorodnosti po tolshhine listovogo prokata iz hladostojkoj nizkolegirovannoj stali arkticheskogo primenenija [Methods for assessing the microstructural heterogeneity in thickness of sheet products made of cold-resistant low-alloy steel for Arctic applications]. *Chernye metally = Black metals*, 2020, no. 9, pp. 11-19.
10. **Kazakov A.A., Kiselev D.V., Sych O.V., Khlusova E.I.** Quantitative Assessment of Microstructural Inhomogeneity by Thickness of Hot-Rolled Plates Made of Cold-Resistant Low-Alloy Steel for Arctic Applications, *CIS Iron and Steel Review*, 2020, Vol. 20, pp. 41-49.
11. **Kazakov A.A., Kiselev D.V., Sych O.V., Hlusova E.I.** Kolichestvennaja ocenka strukturnoj neodnorodnosti v listovom prokate iz hladostojkoj nizkolegirovannoj stali dlja interpretacii tehnologicheskikh osobennostej ego izgotovlenija [Quantitative Assessment of Structural Inhomogeneity in Cold-Resistant Low-Alloy Steel Sheets for Interpretation of the Technological Features of Its Manufacturing]. *Chernye metally = Black metals*, 2020, no. 11, pp. 4-14.
12. **Kazakov A.A., Kiselev D.V., Andreeva S.V., Mjasnikov A.A., Golovin S.V., Egorov V.A.** Razrabotka metodiki kolichestvennoj ocenki zagryzannosti nizkolegirovannyh trubnyh stalej nemetallicheskimii vkljuchenijami s pomoshh'ju avtomaticheskogo analiza izobrazhenij [Development of a method for quantitative assessment of contamination of low-alloy pipe steels with non-metallic inclusions using automatic image analysis]. *Chernye metally = Black metals*, 2007, no. 7-8, pp. 24-31.
13. **Kazakov A.A., Zhitenev A.I., Kolpishon Je. Ju., Salynova M.A.** Kolichestvennaja ocenka nemetallicheskih vkljuchenij dlja pokovok iz sverhkrupnyh slitkov [Quantification of nonmetallic inclusions for extra large ingot forgings]. *Chernye metally = Black metals*, 2018, no.7, pp. 50-56.
14. **Kazakov A.A., Zhitenev A.I., Salynova M.A.** Extension of ASTM E2283 standard practice for the assessment of large exogenous nonmetallic inclusions in super duty steels. *CIS Iron and Steel Review*, 2019, vol. 18, pp. 20-26.
15. **Kazakov A.A., Zhitenev A.I., Salynova M.A.** Rasshirenie vozmozhnostej statistiki jekstremal'nyh znachenij dlja ocenki prirody krupnyh nemetallicheskih vkljuchenij v staljah otvetstvennogo naznacheniya [Expanding the capabilities of extreme value statistics for assessing the nature of large non-metallic inclusions in critical steels]. *Chernye metally = Black metals*, 2019, no. 8, pp.46-50.
16. **Kazakov A.A., Ljubochko D.A., Rjaboshuk S.V., Chigincev L.S.** Issledovanie prirody nemetallicheskih vkljuchenij v stali s pomoshh'ju avtomaticheskogo analizatora chastic [Investigation of the nature of non-metallic inclusions in steel using an automatic particle analyzer]. *Chernye metally = Black metals*, 2014, no. 4 (988), pp. 37-42.
17. **Kazakov A.A., Zhitenev A., Ryaboshuk S.** Interpretation and Classification of Non-Metallic Inclusions. *Materials Performance and Characterization*. <https://doi.org/10.1520/MPC20160040>. ISSN 2165-3992.
18. **Kazakov A.A., Chigincev L.S., Kazakova E.I., Rjaboshuk S.V., Markov S.I.** Metodika ocenki likvacionnoj polosity listovogo prokata [Methodology for evaluating liquation strip of sheet metal]. *Chernye metally = Black metals*, 2009, no. 12, pp. 17-22.
19. **Kazakov A.A., Kazakova E.I., Kur A.A.** Assessment of central heterogeneity in slab to forecast centerline segregation in plate steel. *CIS Iron and Steel Review*, 2018, vol. 16, pp. 49-52.
20. **Kazakov A.A., Kiselev D.V., Pakhomova O.** Microstructural quantification for pipeline steel structure-property relationships. *CIS Iron and Steel Review*, 2012, pp. 4-12.
21. **Zolotarevsky N., Kazakova E., Kazakov A., Petrov S., Panpurin S.** Investigation of the Origin of Coarse-Grained Bainite in X70 Pipeline Steels by EBSD Technique. *Materials Performance and Characterization*, <https://doi.org/10.1520/MPC20160031>.
22. **Kazakov A., Kazakova E., Karasev M., Lubochko D.** Structural Investigation and Control of Multi-Pass Gas-Shielded Flux-Cored Arc Weldments. *Materials Performance and Characterization*, <https://doi.org/10.1520/MPC20160035>.
23. **Kazakov A.A., Karasev M.V., Kazakova E.I.** Vlijanie struktury na svojstva nizhnih sloev svarnyh shvov pri mnogoprohodnoj jelektrodugovoj svarke stali 09G2FBJu poroshkovej provolokoj v srede zashhitnyh gazov [Influence of the structure on the properties of the lower layers of welded joints in multipass electric arc welding of steel 09G2FBYU with flux-cored wire in a shielding gas environment]. *Svarka i diagnostika = Welding and diagnostics*, 2017, no.4, pp. 47-54.
24. **Kazakov A. A., Kiselev D. V.** Metallurgical Quality Characterization of Nickel-Based Superalloys. *CIS Iron and Steel Review*, 2007, no. 1-2, pp. 40-43.
25. **Kazakov A. A., Luong N.H.** Characterization of Semisolid Materials Structure. *Mater. Character.*, 2001, vol. 46, no. 2-3, pp. 155-161.
26. **Kazakov A., Kur A., Kazakova E., Kiselev D.** Quantitative Characterization of Hypoeutectic Aluminum-Silicon-Copper As-Cast Alloy Microstructures. *Materials Performance and Characterization*. <https://doi.org/10.1520/MPC20160025>.
27. **Kazakov A.A., Kur A.A., Kiselev D.V., Lazutova E.B.** Razrabotka kolichestvennyh metodov ocenki struktury dojevtkticheskikh siluminov dlja prognozirovaniya ih mehanicheskikh svojstv [Development of quantitative methods for assessing the structure of hypoeutectic silumins to predict their mechanical properties]. *Cvetnye metally = Non-ferrous metals*, 2014, no. 4, pp. 39-43.
28. **Kazakov A.A., Kiselev D. V., Kur A.A.** Avtomatizirovannaja ocenka nemetallicheskih vkljuchenij v aluminievych splavah po metodike PoDFA s pomoshh'ju analiza izobrazhenij [Automated assessment of non-metallic inclusions in aluminum alloys by PoDFA method using image analysis]. *Cvetnye metally = Non-ferrous metals*, 2019, no. 3(915), pp. 43-51.
29. **Kazakov A.A., Andreeva S.V., Kiselev D.V.** Kolichestvennaja ocenka parametrov struktury vysokoprochnogo chuguna kak osnova prognozirovaniya mehanicheskikh svojstv [Quantitative Assessment of the Structure Parameters of Ductile Iron as a Basis for Predicting Mechanical Properties]. *SPbGTU Publ.*, 2009, no. 510, pp. 200-208.
30. **Vander Voort G. F., Pakhomova O., Kazakov A.** Evaluation of Normal Versus Non-Normal Grain Size Distributions. *Materials Performance and Characterization*. <https://doi.org/10.1520/MPC20160001>. ISSN 2165-3992.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-49-53>  
УДК 669

Поступила 28.04.2021  
Received 28.04.2021

## ОПТИКО-ЭМИССИОННОЙ МЕТОД СПЕКТРОМЕТРИИ С ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ФОСФОРА В ВОДНО-МАСЛЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ

Н. А. ЗМЕЕВА, О. Ю. ВИНОКУРОВА, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: [nhim.plus@bmz.gomel.by](mailto:nhim.plus@bmz.gomel.by). Тел.: +(375 2334) 54343

*Разработана методика определения массовой концентрации фосфора в водно-масляной эмульсии, применяемой для волочения проволоки, методом оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Фосфор попадает в эмульсию после травления проволоки в растворе ортофосфорной кислоты, которая удаляет оксиды, появившиеся в процессе образования латуни. Он является одним из определяемых показателей, который дополнительно характеризует состояние эмульсии в период эксплуатации. При этом образуется нерастворимая фосфатная пленка. Образовавшийся слой пленки фосфатов не должен быть излишне толстым, так как он негативно сказывается при дальнейшей переработке (дополнительный фактор загрязнения эмульсии на тонком волочении).*

*Наиболее перспективным методом определения вредных примесей в эмульсии, в том числе фосфора, является оптико-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой. Метод основан на распылении анализируемой пробы в аргоновой плазме, возбуждаемой высокочастотным электромагнитным полем. Для определения массовой концентрации фосфора необходимо выполнить градуировку спектрометра с индуктивно-связанной плазмой. Для проверки правильности градуировки используется контрольный образец, который готовят из государственного стандартного образца (ГСО) состава водного раствора фосфат-ионов. Далее необходимо подготовить рабочие пробы растворов водно-масляной эмульсии. Затем проводят измерения массовой концентрации фосфора в анализируемой пробе на оптико-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Ultima Expert (HORIBA, Франция).*

*Показатели точности, расширенная неопределенность результатов измерений для метода рассчитаны в соответствии с СТБ ИСО 5725-2.*

**Ключевые слова.** Эмульсия, фосфор, массовая концентрация, волочение проволоки, фосфаты, оксиды, оптико-эмиссионный спектрометр, индуктивно-связанная плазма, интенсивность спектральной линии, длина волны, предел чувствительности, монохроматор, аргон, градуировка, прецизионность, повторяемость, воспроизводимость.

**Для цитирования.** Змеева, Н. А. Оптико-эмиссионной метод спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой определения массовой концентрации фосфора в водно-масляной эмульсии / Н. А. Змеева, О. Ю. Винокурова // *Литье и металлургия*. 2021. № 2. С. 49–53. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-49-53>.

## OPTICAL-EMISSION SPECTROMETRY METHOD WITH INDUCTIVELY COUPLED PLASMA FOR DETERMINING THE MASS CONCENTRATION OF PHOSPHORUS IN AN OIL-WATER EMULSION

N. A. ZMEEVA, O. Yu. VINOKUROVA, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, Zhlobin City, Gomel Region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: [nhim.plus@bmz.gomel.by](mailto:nhim.plus@bmz.gomel.by). Tel. (+375 2334) 54343

*A method for determining the mass concentration of phosphorus in a water-oil emulsion used for wire drawing by inductively coupled plasma optical emission spectrometry has been developed. Phosphorus enters the emulsion after etching the wire in a solution of orthophosphoric acid, which removes oxides that have appeared in the process of forming brass. It is one of the determined indicators that additionally characterizes the state of the emulsion during operation.*

*This creates an insoluble phosphate film. The resulting phosphate film layer should not be too thick, as it has a negative effect on further processing (an additional factor of contamination of the emulsion on thin drawing).*

*The most promising method for determining harmful impurities in an emulsion, including phosphorus, is optical emission spectrometry with inductively coupled plasma. The method is based on the sputtering of the analyzed sample in an argon plasma excited by a high-frequency electromagnetic field. To determine the mass concentration of phosphorus, it is necessary to perform calibration of the inductively coupled plasma spectrometer. To check the correctness of the calibration, a control sample is used, which is prepared from the state standard sample (SSS) of the composition of an aqueous solution of phosphate ions. Next, it is necessary to prepare working samples of solutions of water-oil emulsion.*

*Then, the mass concentration of phosphorus in the analyzed sample is measured using an inductively coupled plasma optical emission spectrometer Ultima Expert (HORIBA, France).*

*Accuracy indicators, extended uncertainty of measurement results for the method are calculated in accordance with STB ISO 5725-2.*

**Keywords.** *Emulsion, phosphorus, mass concentration, wire drawing, phosphates, oxides, optical emission spectrometer, inductively coupled plasma, spectral line intensity, wavelength, sensitivity limit, monochromator, argon, calibration, precision, repeatability, reproducibility.*

**For citation.** *Zmeeva N. A., Vinokurova O. Yu. Optical-emission spectrometry method with inductively coupled plasma for determining the mass concentration of phosphorus in an oil-water emulsion. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 2, pp. 49–53. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-49-53>.*

Водно-масляная эмульсия, применяемая для волочения, проходит контроль параметров в соответствии с требованиями, предъявляемыми к рабочему раствору водно-масляной эмульсии [1]. Одним из определяемых показателей является массовая концентрация фосфора, который дополнительно характеризует состояние эмульсии в период эксплуатации.

Фосфор попадает в эмульсию после травления проволоки в растворе ортофосфорной кислоты, которая удаляет оксиды, появившиеся в процессе образования латуни. После полного удаления оксидов цинка и меди с поверхности латуни в ванне идет образование пленки нерастворимых фосфатов на поверхности проволоки [2]. Слой пленки фосфатов не должен быть излишне толстым, так как он негативно сказывается при дальнейшей переработке проволоки (дополнительный фактор загрязнения эмульсии на тонком волочении).

Помимо прочего, фосфорсодержащие компоненты входят в состав самой водно-масляной эмульсии, что является дополнительным фактором присутствия фосфора в эмульсии.

Цель настоящей работы – определение массовой концентрации фосфора в водно-масляном растворе эмульсии.

Наиболее перспективным методом определения вредных примесей в водно-масляной эмульсии, в том числе фосфора, является оптико-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП) [3]. К преимуществам ИСП относятся высокая концентрация электронов порядка  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а также высокая температура (более 600 К), что позволяет практически полностью атомизировать любые анализируемые вещества [4].

Метод основан на распылении анализируемой пробы в аргоновой плазме, возбуждаемой высокочастотным электромагнитным полем. При этом происходит возбуждение входящих в состав пробы атомов химических элементов. Эмиссионный спектр анализируемой пробы снимается в диапазоне от 120 до 800 нм [5]. Интенсивность спектральной линии на длине волны 213,618 нм в полученном эмиссионном спектре анализируемой пробы прямо пропорциональна концентрации атомов фосфора в анализируемой пробе.

На основании построенной эмпирической зависимости интенсивности спектральной линии [5] фосфора на длине волны 213,618 нм от концентрации фосфора рассчитывается концентрация фосфора в анализируемой пробе. Определение массовой концентрации фосфора в водно-масляной эмульсии состоит из подготовки к выполнению измерений и порядка выполнения измерений. Для определения массовой концентрации фосфора необходимо выполнить градуировку [5] спектрометра с индуктивно-связанной плазмой, используя градуировочные растворы с массовой концентрацией фосфора 1,0; 3,0; 5,0; 10,0 мг/дм<sup>3</sup>. Для этого взвешивают навеску 4,3930 г калия фосфорнокислого однозамещенного, количественно переносят в мерную колбу вместимостью 1000 см<sup>3</sup>, растворяют навеску, доводят объем раствора до метки дистиллированной водой, тщательно перемешивают. Получают матричный раствор с концентрацией фосфора 1000 мг/дм<sup>3</sup>. Из него готовят градуировочные растворы с соответствующей концентрацией фосфора (рис. 1).

Для проверки правильности градуировки используется образец контроля, который готовят из ГСО состава водного раствора фосфат-ионов с массовой концентрацией фосфат-ионов 1,0 г/дм<sup>3</sup>. Отбирают 5 см<sup>3</sup> раствора, переносят количественно в мерную колбу вместимостью 50 см<sup>3</sup>, объем доводят до метки дистиллированной водой, перемешивают. Из полученного раствора отбирают аликвоту 10 см<sup>3</sup> в колбу на 100 см<sup>3</sup>, также доводят до метки дистиллированной водой и тщательно перемешивают. Опорное значение массовой концентрации фосфора в полученном образце контроля соответствует 3,28 мг/дм<sup>3</sup>.

Необходимо подготовить рабочие пробы растворов водно-масляной эмульсии. Для этого отбирают пипеткой 1,0 см<sup>3</sup> анализируемого раствора, переносят количественно в мерную колбу вместимостью 250 см<sup>3</sup>, доводят объем раствора до метки дистиллированной водой, тщательно перемешивают.

Затем проводят измерения массовой концентрации фосфора в анализируемой пробе на оптико-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Ultima Expert (HORIBA, Франция).

Спектрометр Ultima Expert характеризуется большим количеством аналитических показателей: точность, повторяемость, воспроизводимость, селективность, чувствительность и предназначен для

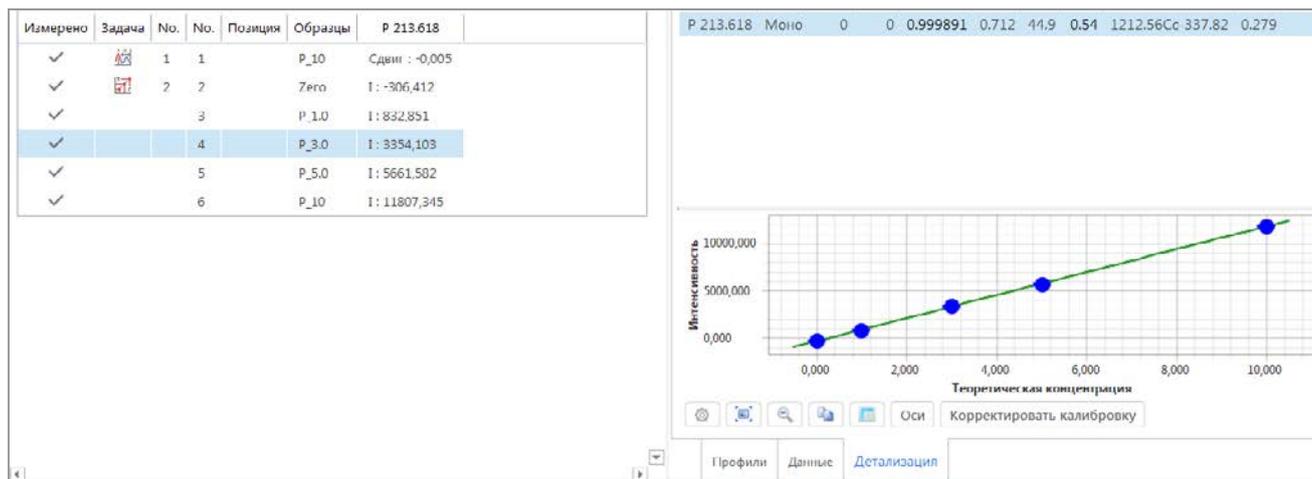


Рис. 1. График градуировки

измерения массовой концентрации химических элементов при анализе жидкостей с высокой степенью чувствительности в условиях реального производственного процесса. Монохроматор Ultima Expert использует оптическую схему Черни-Тернера с фокусным расстоянием монохроматора 1 м [6], с двумя дифракционными решетками (рис. 2).

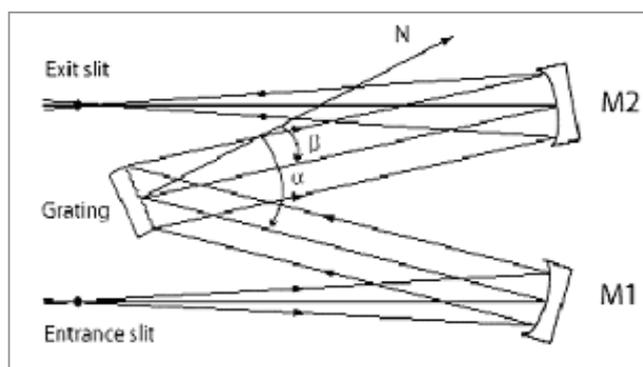


Рис. 2. Оптическая схема

Монохроматор включает в себя регулируемую входную щель, два вогнутых зеркала M1 и M2, плоскую решетку, вращающуюся на своей оси, регулируемую выходную щель, два фотоэлектронных умножителя. Дифракционная решетка изготовлена из стеклянной подложки, покрытой светочувствительной пленкой, на которую голографическим способом нанесено большое количество линий (от 1800 до 4320 линий/мм).

Точность прибора оценивается разностью между средним измеренным значением и фактическим значением концентрации элемента. Главным образом она зависит от калибровочной кривой и пробоподготовки.

Предел чувствительности выражается формулой, в расчете которой участвуют среднеквадратическое отклонение относительно холостой пробы и фоновая эквивалентная концентрация. Расчет осуществляется автоматически в программе оптико-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Ultima Expert.

Массовую концентрацию фосфора  $X$ , мг/дм<sup>3</sup>, в водно-масляной эмульсии вычисляют по формуле:

$$X = A \cdot 250, \quad (1)$$

где  $A$  – показания спектрометра по массовой концентрации фосфора, мг/дм<sup>3</sup>;

250 – коэффициент пересчета, учитывающий разбавление пробы.

Для пересчета массовой концентрации фосфора в массовую концентрацию фосфат-ионов  $X_1$ , мг/дм<sup>3</sup>, применяется формула:

$$X_1 = X \cdot 3,06, \quad (2)$$

где 3,06 – коэффициент пересчета с массовой концентрации фосфора на массовую концентрацию фосфат-ионов, мг/дм<sup>3</sup>.

Показатели точности, расширенная неопределенность результатов измерений [7] для метода рассчитаны в соответствии с СТБ ИСО 5725–2 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений» приведены в таблице.

**Показатели прецизионности, пределы повторяемости и воспроизводимости, расширенная неопределенность результатов измерений массовой концентрации фосфора в эмульсии**

Диапазон измерений, мг/дм <sup>3</sup>	Стандартное отклонение повторяемости $S_p$ , мг/дм <sup>3</sup>	Предел повторяемости $r$ , мг/дм <sup>3</sup>	Стандартное отклонение воспроизводимости $S_R$ , мг/дм <sup>3</sup>	Предел воспроизводимости $R$ , мг/дм <sup>3</sup>	Расширенная неопределенность результатов измерений $U(X)$ , мг/дм <sup>3</sup>
От 0 до 1000 вкл.	4,64	13,0	7,01	19,6	14,0
От 1000 до 2000 вкл.	6,59	18,5	13,91	39	27,8

Определение фосфора в эмульсии проводили на восьми эмульсионных станциях с периодичностью один раз в неделю в течение года. Опытным путем было установлено, что с увеличением срока эксплуатации эмульсии количество фосфора в водно-масляном растворе уменьшается [ГОСТ 18309-2014. Вода. Методы определения фосфорсодержащих веществ. М.: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2016].

Концентрация фосфора в эмульсии на основе концентрата Multidraw VSV 77R и Multidraw STC 05 приведена на рис. 3, 4.

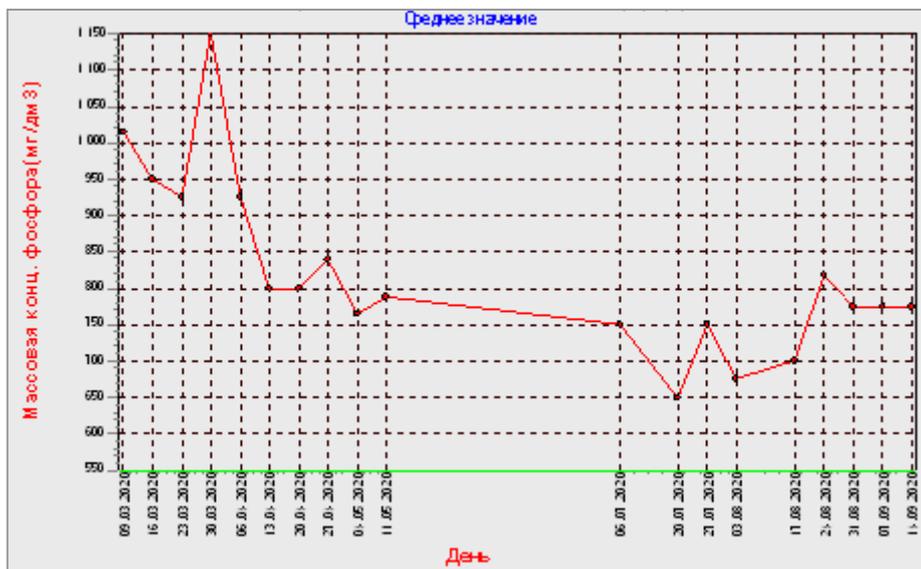


Рис. 3. Концентрация фосфора в эмульсии на основе концентрата Multidraw VSV 77R

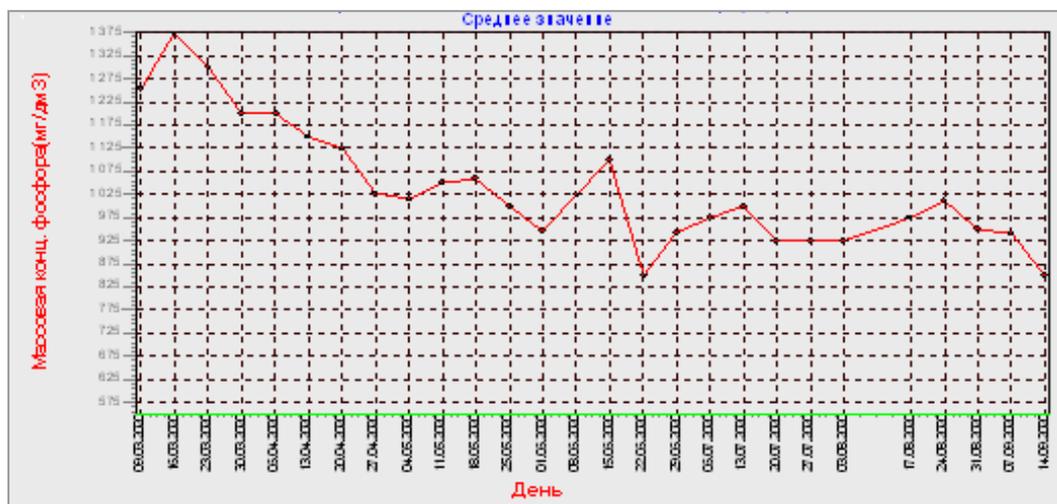


Рис. 4. Концентрация фосфора в эмульсии на основе концентрата Multidraw STC 05

### Выводы

Метод определения фосфора на оптико-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой не требует длительной пробоподготовки, что дает возможность уменьшить время выдачи результатов. Методика апробирована на образцах водно-масляной эмульсии и рекомендуется для определения содержания фосфора, который характеризует состояние эмульсии в период эксплуатации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Юхвец, А. И. Волоочильное производство / А. И. Юхвец. Ч. 1. М.: Metallurgija, 1965.
2. Перлин, И. Л. Теория волочения / И. Л. Перлин, Н. З. Ерманок. 2-изд. М.: Metallurgija, 1971.
3. Томпсон М. Практическое руководство по спектрометрическому анализу с индуктивно-связанной плазмой / М. Томпсон, Д. Уолш. М.: Недра, 1988.
4. Васильев, В. П. Аналитическая химия / В. П. Васильев. В 2-х ч. Ч. 2. Физико-химические методы анализа. М.: Высш. шк., 1989.
5. Гармаш, А. В. Введение в спектроскопические методы анализа. Оптические методы анализа / А. В. Гармаш. М., 1995.
6. Пейсахсон, И. В. Оптика спектральных приборов / И. В. Пейсахсон. Л., 1970.
7. Дворкин, В. И. Метрология и обеспечение качества количественного химического анализа / В. И. Дворкин. М.: Химия, 2001.

### REFERENCES

1. Juhvec A. I. *Volochil'noe proizvodstvo* [Drawing production]. Moscow, Metallurgija Publ., 1965, vol. 1, 375 p.
2. Perlin I. L., Ermanok M. Z. *Teorija volochenija* [Drawing theory] Moscow, Metallurgija Publ., 1971, 448 p.
3. Tompson M., Uolsh D. *Prakticheskoe rukovodstvo po spektrometricheskomu analizu s induktivno-svjazannoj plazmoj* [A Practical Guide to Inductively Coupled Plasma Spectrometric Analysis]. Moscow, Nedra Publ., 1988.
4. Vasil'ev V. P. *Analiticheskaja himija. Fiziko-himicheskie metody analiza* [Analytical chemistry. Physicochemical methods of analysis]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., vol. 2, 1989.
5. Garmash A. V. *Vvedenie v spektroskopicheskie metody analiza. Opticheskie metody analiza* [Introduction to spectroscopic methods of analysis. Optical analysis methods]. Moscow, 1995.
6. Pejsahson I. V. *Optika spektral'nyh priborov* [Spectral instrument optics]. Leningrad, 1970.
7. Dvorkin V. I. *Metrologija i obespechenie kachestva kolichestvennogo himicheskogo analiza* [Metrology and quality assurance of quantitative chemical analysis]. Moscow, Himija Publ., 2001, 263 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-54-60>  
УДК 669.112

Поступила 28.04.2021  
Received 28.04.2021

## ВЛИЯНИЕ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ГИДРОСБИВА НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРОКАТА

Н. А. ГЛАЗУНОВА, Ю. А. ПОТАПЕНКО, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: nmv.czl@bmz.gomel.by. Тел.: (+375 2334) 54343.

Для обеспечения конкурентоспособности металлопроката на современном рынке решающим фактором является качество поверхности проката (без зачистки допускаются дефекты глубиной не более 0,2 мм). Прокатный передел служит источником образования мелких поверхностных дефектов, большинство из которых получено в процессе деформации непрерывнолитой заготовки (НЛЗ, заготовка) на станах горячей прокатки при наличии участков с неудаленной печной окалиной. Это является основной причиной образования таких видов поверхностных дефектов, как вкатанная окалина, рябизна, раковины от окалины, что снижает качество поверхности проката и увеличивает отсортировку металла с поверхностными дефектами. Кроме того, не удаленная с поверхности НЛЗ окалина оказывает отрицательное влияние не только на качество металлопродукции, но и на работу прокатного оборудования.

Одно из направлений, позволяющее в условиях производства добиться высокого качества поверхности сортового проката, – эффективное удаление окалины с поверхности исходной заготовки перед горячей деформацией. Удаление окалины с поверхности заготовки производится на установке гидросбива окалины, но не всегда происходит ее удовлетворительное (полное) удаление.

Для определения причины некачественного удаления окалины перед горячей деформацией исследовали эффективность работы установки гидросбива и состояние поверхности границы раздела металл – окалина.

**Ключевые слова.** Заготовка, прокат, нагрев, поверхность, окалина, классификация, качество, проба, форма, вид, исследование, дефект, окисление, удаление, гидросбив.

**Для цитирования.** Глазунова, Н. А. Влияние работы установки гидросбива на качество поверхности проката / Н. А. Глазунова, Ю. А. Потепенко // *Литье и металлургия*. 2021. № 2. С. 54–60. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-54-60>.

## INFLUENCE OF THE HYDRAULIC PUMP UNIT ON THE QUALITY OF THE ROLLED SURFACE

N. A. GLAZUNOVA, Yu. A. POTAPENKO, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, Zhlobin City, Gomel Region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: nmv.czl@bmz.gomel.by. Tel. (+375 2334) 54343.

To ensure the competitiveness of rolled metal in the modern market, the decisive factor is the quality of the rolled surface (defects with a depth of no more than 0.2 mm are allowed without stripping). Rolling processing is a source of formation of small surface defects, most of which are obtained in the process of deformation of a continuously cast billet (hereinafter referred to as CCB, billet) at hot rolling mills in the presence of areas with non-removed furnace scale. This is the main reason for the formation of such types of surface defects as rolled scale, ripple, scale shells, which reduces the quality of the rolled surface and increases the sorting of metal with surface defects. In addition, the scale not removed from the surface of the CCB has a negative impact not only on the quality of metal products, but also on the operation of rolling equipment.

One of the directions that allows to achieve high quality of the surface of long products in production conditions is the effective removal of scale from the surface of the initial billet before hot deformation. Scale removal from the surface of the workpiece is carried out on the installation of a hydraulic descaling unit, but not always a satisfactory (complete) scale removal occurs.

To determine the cause of poor – quality scale removal before hot deformation, the efficiency of the hydraulic descaling unit and the state of the metal – scale interface surface were investigated.

**Keywords.** Billet, rolled products, heating, surface, scale, classification, quality, sample, shape, type, study, defect, oxidation, removal, hydraulic descaling.

**For citation.** Glazunova N. A., Potapenko Yu. A. Influence of the hydraulic pump unit on the quality of the rolled surface. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 54–60. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-54-60>.

В современных экономических условиях возросшей конкуренции на рынке металлопродукции решающим фактором является качество поверхности проката (без зачистки допускаются дефекты глубиной

не более 0,2 мм). Однако не всегда финансовые вложения оправдывают себя и позволяют добиться улучшения качества. Одним из направлений, обеспечивающим выпуск качественной прокатной продукции, является эффективное удаление окалины с поверхности заготовок перед горячей деформацией.

В металлургической промышленности окалина, образующаяся на поверхности горячего металла, создает довольно серьезные проблемы. Образование окалины на поверхности металла происходит в течение всего производственного процесса. По месту образования в технологическом процессе различают первичную и вторичную окалину. Первичная (или печная) окалина образуется при нагреве заготовки в печи перед деформацией. Характер и количество образующейся окалины зависит от типа печной атмосферы, температуры и длительности нагрева [1]. Вторичная окалина образуется в процессе горячей деформации (проката), в результате взаимодействия поверхности металла с окружающей средой. Ее характер и количество зависит от качества материала, температуры и длительности процесса деформации. Особенно вредна первичная окалина, полученная при нагреве заготовок в окислительной атмосфере, которая оказывает непосредственное влияние на качество поверхности проката. Поэтому предпрокатный нагрев и прокатка являются не менее важными, формирующими качество, технологическими операциями, чем выплавка и разливка стали. Окалина по своим физическим свойствам отличается от основного металла, и поэтому она оказывает отрицательное влияние не только на качество металлопродукции, но и на работу прокатного оборудования. Прокатный передел является источником образования собственных дефектов, большинство из которых относится к разряду поверхностных [2]. В процессе деформации заготовки на станах горячей прокатки при наличии участков с неудалившейся печной окалиной происходит образование целого ряда поверхностных дефектов. В соответствии с ГОСТ 21014-88 дефекты классифицируются как:

- **вкатанная окалина** – дефект поверхности в виде вкраплений остатков окалины, вдавленной в поверхность металла при деформации;
- **рябизна** – дефект поверхности в виде мелких углублений, образующих полосы или сетку, наблюдаемых после удаления вкатанной окалины (глубина рябизны от вдавленной окалины может достигать 1,0–1,5 мм);
- **раковины от окалины** – дефект поверхности в виде отдельных углублений, частично вытянутых вдоль направления прокатки, образующихся при выпадении вкатанной окалины (отличаются от рябизны большими размерами и меньшим количеством).

Одним из направлений, позволяющим в условиях производства добиться высокого качества поверхности сортового проката, является эффективное удаление первичной окалины с поверхности исходной заготовки перед горячей деформацией.

Наиболее эффективным способом удаления окалины с поверхности заготовки является гидравлический. Гидравлическое удаление окалины (гидросбив, hydraulicdescaling) – удаление окалины с поверхности металла при горячей прокатке водой под высоким давлением. При гидросбиве происходит удаление окалины водой, подающейся на поверхность заготовки через специальные форсунки под давлением до 80–140 атм. После выдачи из нагревательной печи металла, покрытого окалиной, происходит резкое охлаждение его поверхности, в результате чего слой окалины покрывается сеткой трещин. Воздействие струи воды, подаваемой под высоким давлением, приводит к раскливанию блоков окалины и их отрыву от поверхности металла [3].

Но не всегда происходит удовлетворительное удаление печной окалины с поверхности заготовки.

Для определения причины некачественного удаления окалины перед горячей деформацией исследовали состояние поверхности границы раздела металл-окалина и эффективность работы установки гидросбива.

### Исследование состояния поверхности границы раздела металл-окалина

При нагреве поверхность стали окисляется и покрывается слоем окалины. Окисление металла при нагреве – это процесс двухсторонней диффузии химических реакций взаимодействия окисляющих газов с железом, легирующими элементами и примесями с поверхности образовавшегося слоя окалины внутрь через этот слой и в обратном направлении.

В случаях, когда проникновение оксидов в глубь металла по границам зерен отсутствует или весьма незначительно и между сталью и окалиной имеется четкая граница (рис. 1), при гидросбиве и пластической деформации окалиноудаление происходит без особых затруднений, при этом поверхность отрыва достаточно гладкая.

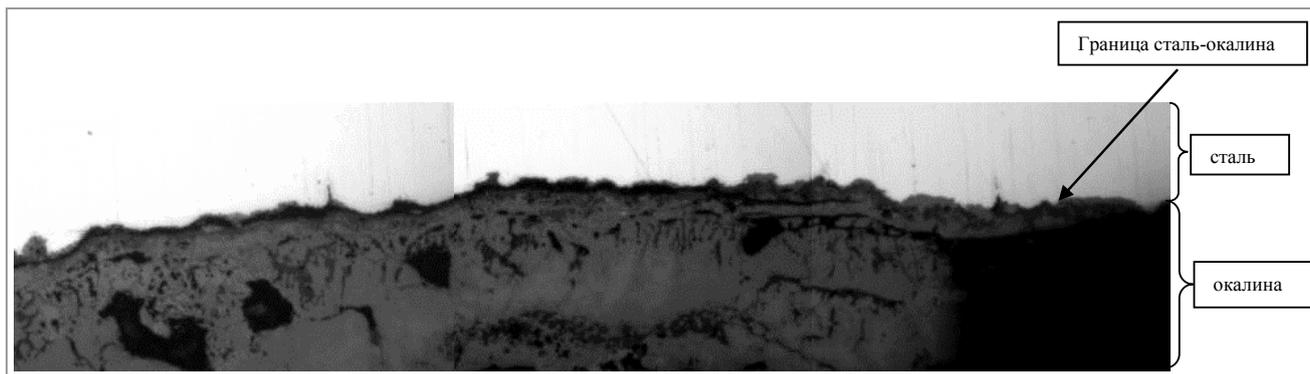


Рис. 1. Четкая граница между сталью и окалиной на образце заготовки после нагрева под прокатку по соответствующему режиму.  $\times 500$

Наиболее сильно вдавливание окалины, образование оспин и рябизны проявляется в случаях, когда твердость окалины выше твердости металла. В очаге деформации окалина резко охлаждается и растрескивается. Охлаждаясь, она становится более твердой и вдавливается в примыкающие к ней слои металла [2]. При высокотемпературном окислении легированной стали в окалину переходит небольшая часть легирующих элементов. Наличие в составе окалины таких элементов, как Si, Cr, Mn, Ni, также способствует увеличению твердости окалины.

При нагреве стали в восстановительной атмосфере при коэффициенте расхода окислителя  $< 1$  образующаяся плотная окалина удаляется значительно трудней и повышает вероятность образования вкатанной окалины и рябизны.

Весьма нежелательным является появление в окалине жидкой фазы, сопровождающейся ионизацией границ зерен стали, проникновением окалины между ними, интенсивно происходит рост смешанной зоны (окалина + металл) и, как следствие, ее прочность сцепления с металлом возрастает [4].

Исследовали фрагмент заготовки после нагрева в нагревательной печи с нарушением режима (завышена температура и время нагрева), на поверхности которой после прохождения через установку гидросбива остались значительное количество так называемой «липкой окалины» (рис. 2, *а*) и участки расплавленной окалины (рис. 2, *б*), имеющей прочную связь с металлической поверхностью.



Рис. 2. Поверхность заготовки после гидросбива: *а* – с неудалившейся окалиной; *б* – участки расплавленной окалины

В зоне с неудалившейся окалиной исследовали поверхность с помощью оптического микроскопа. При исследовании выявили, что между окалиной и металлом имеется слой так называемой «липкой» окалины из-за проникновения оксидов в глубь металла по границам зерен, четкая линия раздела окалина-металл полностью отсутствует (рис. 3).

Соблюдение технологии нагрева (отсутствии перегрева стали и подплавления окалины) позволило предотвратить образование «липкой окалины» и уменьшить сцепление окалины с поверхностью металла, что значительно улучшило условия удаления окалины с поверхности заготовки на установке гидросбива перед горячей деформацией (рис. 4, *в*).

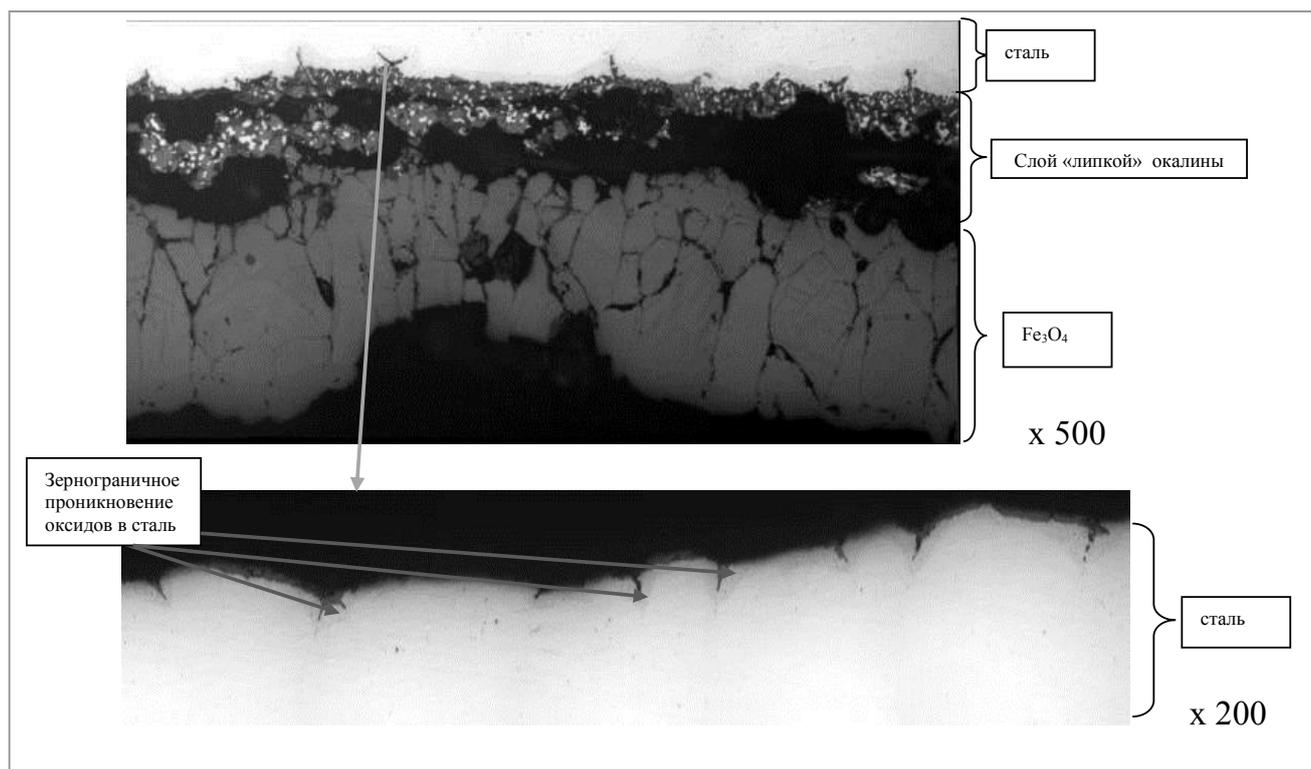


Рис. 3. Поверхностная окалина в поперечном сечении микрошлифа заготовки, которая не удалась после прохождения через установку гидросбива

### Эффективность работы установки гидросбива

При массовом выявлении дефектов «вкатанная окалина» на поверхности горячекатаной заготовки провели работу по определению причин их образования. При соблюдении режимов нагрева под прокатку и условий деформации проверили работу и состояние оборудования установки гидросбива. Для этого прокатали непрерывнолитые заготовки одной марки стали по трем режимам: нагретые по соответствующему режиму без удаления печной окалины, полностью отключив установку гидросбива (рис. 4, *а*); с неудовлетворительной работой установки гидросбива (недостаточное давление воды) (рис. 4, *б*); с удовлетворительной работой установки гидросбива для удаления окалины (рис. 4, *в*).



Рис. 4. Внешний вид непрерывнолитой заготовки после нагрева перед деформацией:  
*а* – отключена установка гидросбива; *б* – неудовлетворительная работа установки гидросбива;  
*в* – удовлетворительная работа установки гидросбива

Когда процесс прокатки заготовки проводили с отключенной установкой гидросбива, окалина полностью сохранилась на поверхности заготовки (рис. 4, *а*). При недостаточном давлении воды наблюдается не полное удаление окалины (рис. 4, *б*). Когда процесс прокатки заготовки проводили с удовлетворительно работающей установкой гидросбива, наблюдается полное удаление окалины с поверхности заготовки (рис. 4, *в*).

Поверхность горячекатаного проката исследовали визуально и магнитопорошковым методом. На прокате после полного удаления гидросбивом окалины поверхностные дефекты не выявлены. На заготовках, прокатанных с неудовлетворительной работой установки гидросбива и с отключенной системой гидросбива, визуальными различимых дефектов не обнаружено. После исследования поверхности проката магнитопорошковым методом выявлены короткие штрихообразные поверхностные дефекты, место расположения которых отмечено маркером (рис. 5, 6).

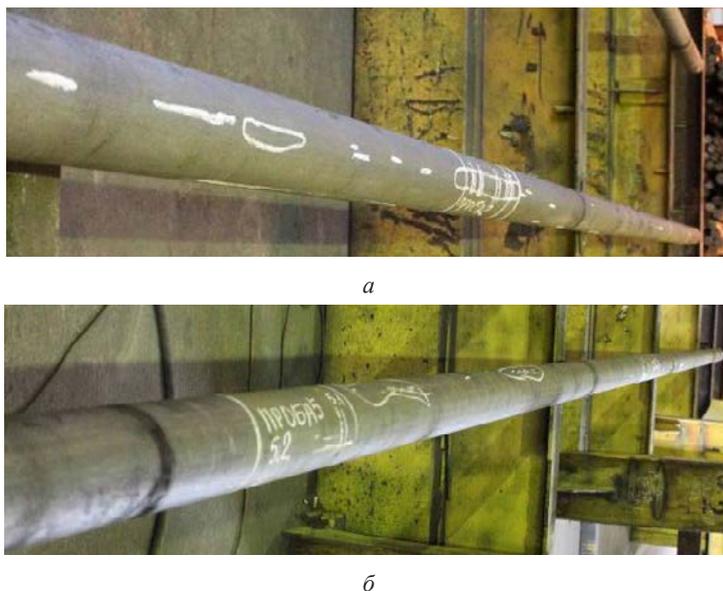


Рис. 5. Расположение дефектов на поверхности горячекатаного металла:

*а* – прокатанного без удаления окалины с поверхности НЛЗ;

*б* – прокатанного после неполного удаления с поверхности НЛЗ печной окалины гидросбивом

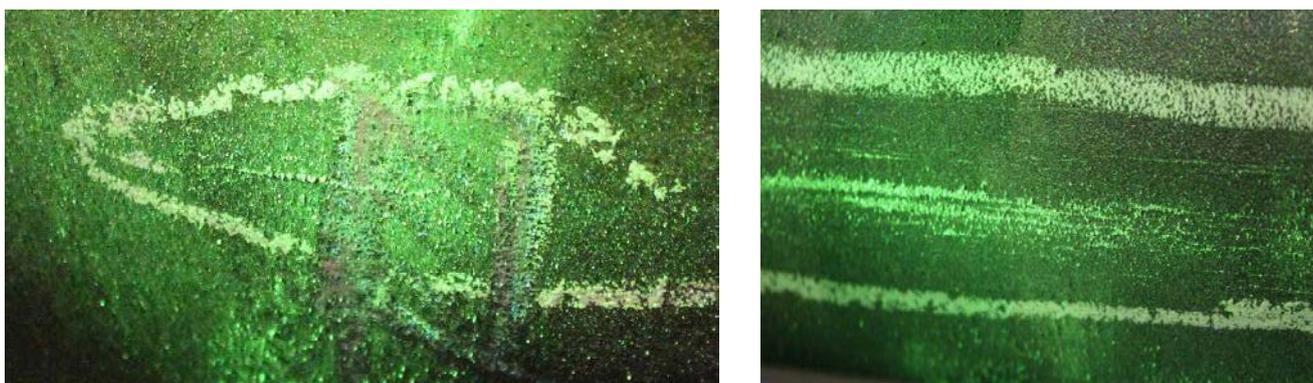


Рис. 6. Внешний вид дефектов на поверхности горячекатаного металла при исследовании магнитопорошковым методом

В зоне выявленных дефектов исследовали поверхность, макро- и микроструктуру.

На поверхности горячекатаных проб после удаления поверхностной окалины методом горячего травления в 50%-ном растворе СНl наблюдаются групповые продольные штрихообразные несплошности, вытянутые вдоль направления деформации различной протяженностью (рис. 7).

При исследовании поперечных макро- и микрошлифов обнаружены групповые и единичные полости, заполненные окалиной. В зоне дефектов наблюдается незначительное поверхностное обезуглероживание [Справочник-атлас «Дефекты стальных заготовок и металлопродукции». Минск: Государственное предприятие «СтройМедиаПроект», 2019]. Дефекты классифицированы по ГОСТ 21014-88 как «вкатанная окалина» глубиной залегания в исследуемых сечениях на пробе с неудовлетворительным удалением окалины до 1,0 мм; на пробе, прокатанной без гидросбива, – до 1,5 мм (рис. 8–11).



Рис. 7. Поверхность горячекатаного проката после удаления поверхностной окалины:

*a* – от пробы, прокатанной без гидросбива; *б* – от пробы, прокатанной с неудовлетворительным удалением окалины гидросбивом

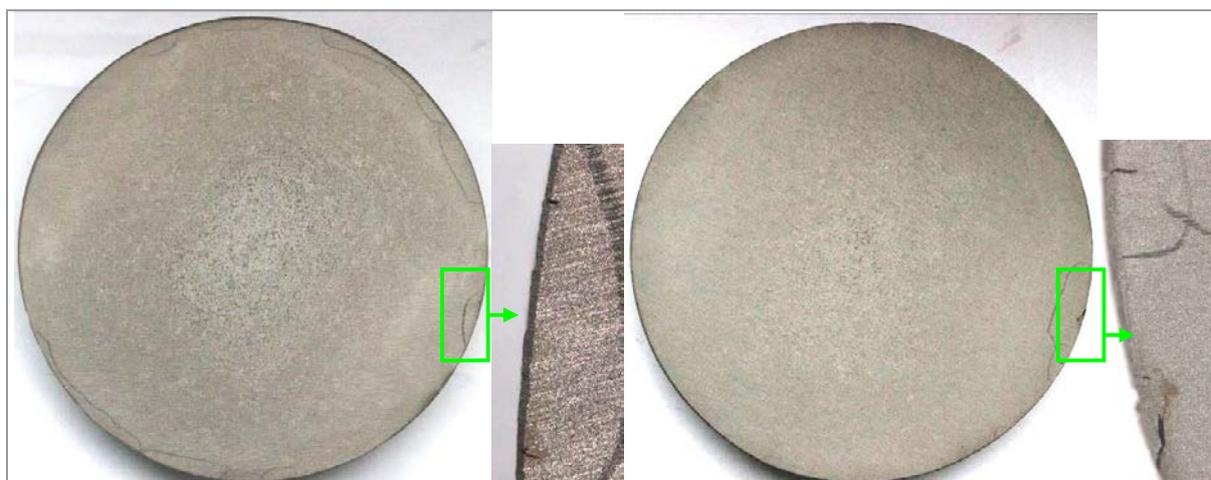


Рис. 8. Дефекты в поперечном сечении макротемплетов

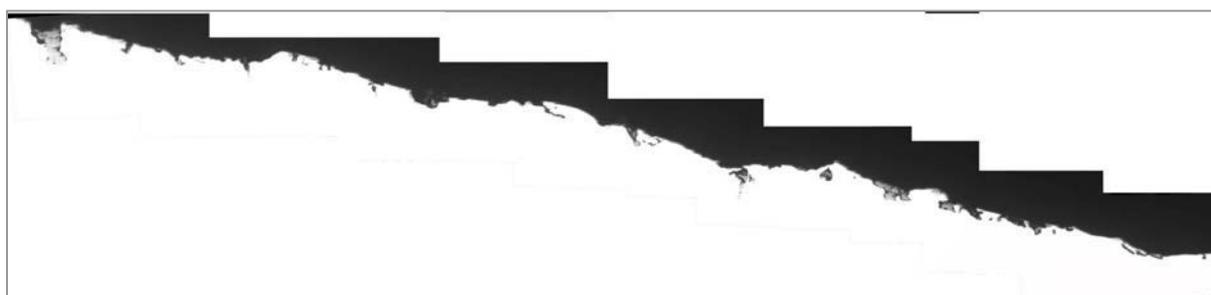


Рис. 9. Дефекты «вкатанная окалина» на поверхности проката в поперечном сечении микрошлифа. х 200

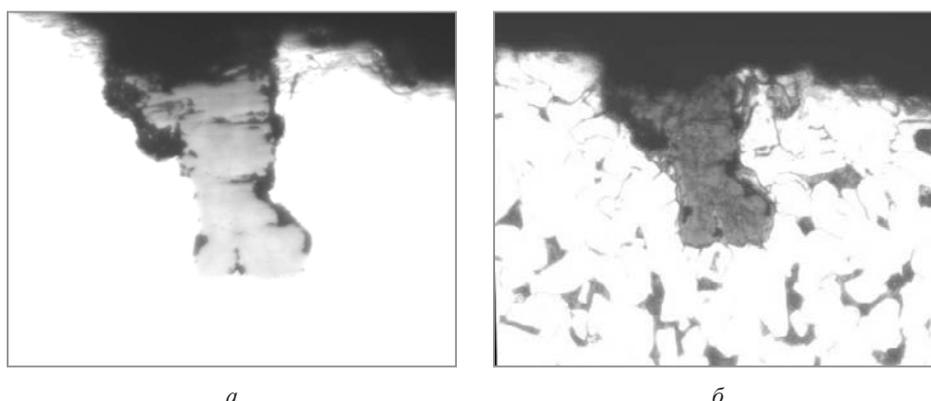


Рис. 10. Поверхностные дефекты «вкатанная окалина» в поперечном сечении микрошлифа пробы, прокатанной с неудовлетворительным удалением окалины гидросбивом: *a* –шлиф не травлен; *б* – после травления в реактиве «Nital». *a, б* – х 200

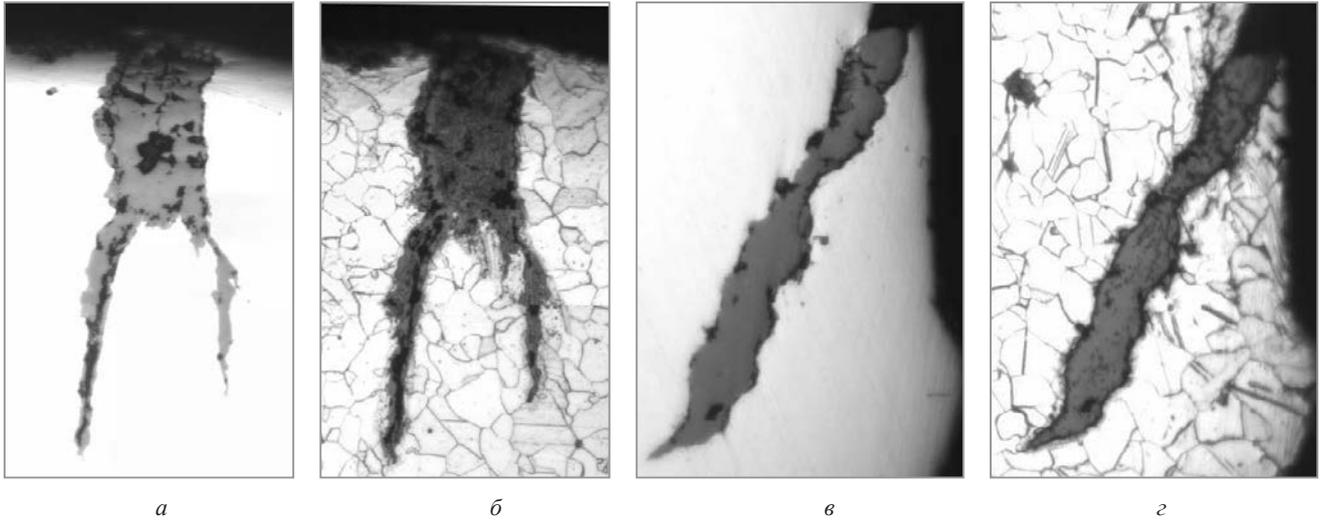


Рис. 11. Поверхностные дефекты «вкатанная окалина» в поперечном сечении микрошлифа пробы, прокатанной без удаления окалины гидросбивом: а, в – шлиф не травлен; б, з – после травления в реактиве «Nital». а – з – х 200

### Выводы

1. Основное влияние на образование прокатных дефектов «вкатанная окалина», «рябизна» и раковины от окалины оказывает качество удаления печной окалины с поверхности заготовки перед горячей деформацией.

2. При неудовлетворительной работе установки гидросбива, а также при удовлетворительной работе установки гидросбива, но при несоблюдении режима нагрева заготовки перед деформацией и получении трудноудаляемой так называемой «липкой» окалины происходит неполное удаление окалины, что в дальнейшем приводит к массовой отсортировке проката по поверхностным дефектам «вкатанная окалина», «рябизна» и раковины от окалины.

3. При удовлетворительной работе установки гидросбива и соблюдении оптимального режима нагрева заготовок перед деформацией дефекты «вкатанная окалина», «рябизна» и раковины от окалины не образуются.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Грудев А. П., Машкин Л. Ф., Ханин М. И. Технология прокатного производства. М.: Metallurgija, 1994.
2. Северденко В. П., Макушок Е. М., Раввин А. Н. Окалина при горячей обработке металлов давлением. М.: Metallurgija, 1977.
3. Михеев В. А., Павлов А. М. Гидросбив окалины в прокатных цехах. М.: Metallurgija, 1964.
4. Лебедев А. Н. Исследование химического состава и температур плавления окалины // Изв. вузов. Черная металлургия. 1986. № 10.

### REFERENCES

1. Grudev A. P., Mashkin L. F., Hanin M. I. *Tehnologija prokatnogo proizvodstva* [Technology of rolling production]. Moscow, Metallurgija Publ., 1994.
2. Severdenko V. P., Makushok E. M., Ravvin A. N. *Okalina pri gorjachej obrabotke metallov davleniem* [Dross during hot working of metals by pressure]. Moscow, Metallurgija Publ., 1977.
3. Miheev V. A., Pavlov A. M. *Gidrosbiv okaliny v prokatnyh cehah* [Descaling in rolling shops]. Moscow, Metallurgija Publ., 1964.
4. Lebedev A. N. *Issledovanie himicheskogo sostava i temperatur plavljenija okaliny* [Investigation of the chemical composition and melting temperatures of the scale.]. *Izvestija Vuzov. Chernaja metallurgija =Proceedings of high schools. Ferrous metallurgy*, 1986, no. 10.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-61-67>  
УДК 621.771

Поступила 20.02.2021  
Received 20.02.2021

## РЕЦИКЛИНГ ПРУТКОВОГО ЛОМА НЕРЖАВЕЮЩИХ МЕТАЛЛОВ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКОЙ С ПОЛУЧЕНИЕМ В НЕМ ГРАДИЕНТНОЙ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ

*С. Н. ЛЕЖНЕВ, А. Б. НАЙЗАБЕКОВ, И. Е. ВОЛОКИТИНА, Рудненский индустриальный институт, г. Рудный, Казахстан, ул. 50 лет Октября, 38. E-mail: sergey\_legnev@mail.ru, тел. +77017725358*  
*Е. А. ПАНИН, Карагандинский индустриальный университет, г. Темуртау, Казахстан, пр. Республики, 30. E-mail: cooper802@mail.ru, тел. +77017754616*  
*Д. В. КУИС, Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а. E-mail: KuisDV@belstu.by, тел. +70172891051*

*Данная работа посвящена исследованию возможности рециклинга пруткового лома нержавеющей металлов с помощью радиально-сдвиговой прокатки. В ходе проведенных исследований по деформированию пруткового лома в виде штилек из нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н9Т на стане радиально-сдвиговой прокатки в прутке была получена микроструктура двух разных типов: на периферии – равноосная ультрамелкозернистая структура с размером зерна 0,4–0,6 мкм, в осевой зоне – ориентированная, полосчатая текстура. Данное расхождение в структуре периферийных и осевой зон совместно с результатами измерения микротвердости по сечению продеформированных на стане радиально-сдвиговой прокатки образцов из нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н9Т с суммарной степенью деформации 44,4% свидетельствуют о градиентном характере полученной микроструктуры.*

**Ключевые слова.** Рециклинг, радиально-сдвиговая прокатка, прутковый лом, нержавеющая аустенитная сталь, градиентная структура, ультрамелкозернистая структура.

**Для цитирования.** Лежнев, С. Н. Рециклинг пруткового лома нержавеющей металлов радиально-сдвиговой прокаткой с получением в нем градиентной ультрамелкозернистой структуры / С. Н. Лежнев, А. Б. Найзабеков, И. Е. Волокитина, Е. А. Панин, Д. В. Куис // Литие и металлургия. 2021. № 2. С. 61–67. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-61-67>.

## RECYCLING OF STAINLESS STEEL BAR SCRAP BY RADIAL-SHEAR ROLLING TO OBTAIN AN ULTRAFINE-GRAINED GRADIENT STRUCTURE

*S. N. LEZHNEV, A. B. NAIZABEKOV, I. E. VOLOKITINA, Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan, 38, 50 let Oktyabrya str. E-mail: sergey\_legnev@mail.ru*  
*E. A. PANIN, Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan, 30, Republic ave. E-mail: cooper802@mail.ru*  
*D. V. KUIS, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str. E-mail: KuisDV@belstu.by*

*This work is devoted to the study of the possibility of recycling bar scrap of stainless metals using radial-shear rolling. In the course of studies on the deformation of bar scrap in the form of pins made of 12X18N9T stainless austenitic steel on a radial-shear rolling mill, the resulting bar was obtained microstructure of two different types: on the periphery an equiaxed ultrafine-grained structure with a grain size of 0.4–0.6 microns was formed; in the axial zone an oriented, banded texture was obtained. This discrepancy in the structure of the peripheral and axial zones, together with the results of cross-section microhardness measurements of samples made of 12X18N9T austenitic stainless steel with a total degree of deformation of 44.4%, indicates the gradient nature of the resulting microstructure.*

**Keywords.** Recycling, radial-shear rolling, bar scrap, austenitic stainless steel, gradient structure, ultrafine-grained structure.

**For citation.** Lezhnev S. N., Naizabekov A. B., Volokitina I. E., Panin E. A., Kuis D. V. Recycling of stainless steel bar scrap by radial-shear rolling to obtain an ultrafine-grained gradient structure. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 2, pp. 61–67. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-61-67>.

Утилизация отходов как черных, так и цветных металлов является полезным процессом для экономики любой страны. Это обусловлено, во-первых, экономическими аспектами (переработка и вторичное использование данных отходов благоприятно сказываются на добыче природных ресурсов, так как потребность в них снижается и идет экономия полезных ископаемых, а также трудовых и экономических

резервов), во-вторых, экологическими аспектами (в большинстве современных металлоизделий, помимо железа, содержатся и другие химические элементы, которые при разрушении постепенно попадают в почву и грунтовые воды, а многие из них токсичны). Поэтому в любой стране уделяется особое значение развитию технологий утилизации металлов и их лома для дальнейшей переработки.

Одним из самых простых и часто применяемых способов утилизации лома черных и цветных металлов и сплавов является его переплавка и дальнейшее вторичное использование. При этом чаще всего предварительно осуществляется сортировка металлического лома по химическому составу с учетом показателя качества металла, его виду, и кроме того, содержанию в металлоломе легирующих и углеродных компонентов. Можно выделить следующие категории металлолома: лом железный; лом нержавеющей сталей; лом цветных металлов; лом драгоценных металлов.

Если говорить о металлоломе черных металлов, то в некоторых странах применяется и другой способ его переработки, а именно рециклинг металлоизделий, отслуживших свой срок различными способами горячей обработки давлением с получением готового товарного продукта [1–11]. В последнее время развивается и достаточно новый способ переработки вышедших из строя металлоизделий путем деформирования их в горячем состоянии на станах радиально-сдвиговой прокатки [12–14], так как именно радиально-сдвиговая прокатка [15] позволяет получать длинномерные изделия из различных материалов с градиентной ультрамелкозернистой структурой [16–22]. Кроме того, данный способ наиболее технологичен и прост в осуществлении по сравнению со многими другими способами обработки металлов давлением, реализующих в процессе деформирования интенсивные пластические деформации. Направление радиально-сдвиговой прокатки начало свое развитие в НИТУ «МИСиС» под руководством С. П. Галкина в начале 90-х годов [23] и представляет собой винтовую прокатку по трехвалковой схеме, схожей со схемой, которая используется для прошивки труб в трубопрокатном производстве [24]. Основным отличием схемы, предложенной С. П. Галкиным, является увеличенный до  $\alpha = 18^\circ\text{--}20^\circ$  угол подачи при обычном угле раскатки  $\beta = 5^\circ$ , что способствует при реализации радиально-сдвиговой прокатки развитию сильнейшей вихревой деформации от поверхности к центру, и возможности избежать появления растягивающих напряжений в осевой части заготовки. На основе этой схемы в НИТУ «МИСиС» также под руководством С. П. Галкина были разработаны и запущены в мелкосерийное производство ряд прокатных станов. Одним из таких станов, на котором были проведены экспериментальные исследования, является стан СВП-08. Техническая характеристика стана СВП-08 приведена в таблице.

Техническая характеристика стана СВП-08

Наименование характеристики	Значение
Скорость прокатки, мм/с	70
Частота вращения валков, об/мин	56
Крутящий момент на одном валке, Н·м	890
Усилие металла на один валок, кН	100
Угол раскатки, град	7
Угол подачи, град	20
Конусность калибра валковых групп, град	8–12
Коэффициент вытяжки	От 1,1 до 4,5
Длина заготовки, мм	100 – 2000
Длина получаемого изделия, мм	До 6000
Диаметр получаемого изделия, мм	8 – 35
Точность готового изделия, %	До 1
Отклонение от прямолинейности (кривизна)	До 1
Мощность электродвигателя, кВт	3×7,5; 1×0,75
Производительность, т/ч	От 0,1 до 2,0

Материалом для исследования был выбран прутковый металлолом в виде шпилек диаметром 36 мм из нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н9Т (0,12 % С, 18 % Cr, 9 % Ni, 2 % Mn, 0,8 % Ti), которые ранее использовали в качестве частей металлоконструкций на Темиртауском электрометаллургическом комбинате, а после окончания срока службы переплавляли. Аустенитная сталь – это особая разновидность нержавеющей стали, имеющая широкую применимость в различных отраслях промышленности из-за своих свойств: жаропрочности, холодостойкости, коррозионной и электрохимической стойкости. Поэтому данный материал широко востребован в строительстве; целлюлозно-бумажном производстве; пищевой промышленности; транспортном машиностроении (включая космическое и авиастроение); химической

промышленности; электроэнергетике и электронике и др. Технология выплавки данной стали и дальнейшего изготовления из нее различных металлоизделий и частей металлоконструкций является достаточно затратной. Поэтому нами предложено использовать технологию радиально-сдвиговой прокатки для переработки металллома, входящего в категорию «лом нержавеющей сталей», с целью получения из него высококачественного товарного продукта в виде прутков круглого поперечного сечения.

Для проведения эксперимента из стали марки 12Х18Н9Т были подготовлены образцы диаметром 36 мм и длиной 200 мм путем распилки имеющихся в наличии шпилек. Предварительно перед деформированием полученные образцы были подвергнуты гомогенизирующему отжигу.

Перед деформированием на стане радиально-сдвиговой прокатки СВП-08 прутки нагревали в трубчатой печи Nabertherm R120/1000/13 до температуры 850 °С с выдержкой 36 мин. Прокатка прутка диаметром 36 мм была осуществлена на стане радиально-сдвиговой прокатки до диаметра 20 мм за четыре прохода с шагом абсолютного обжатия по диаметру 4 мм по схеме, предложенной в работе [25] (рис. 1).

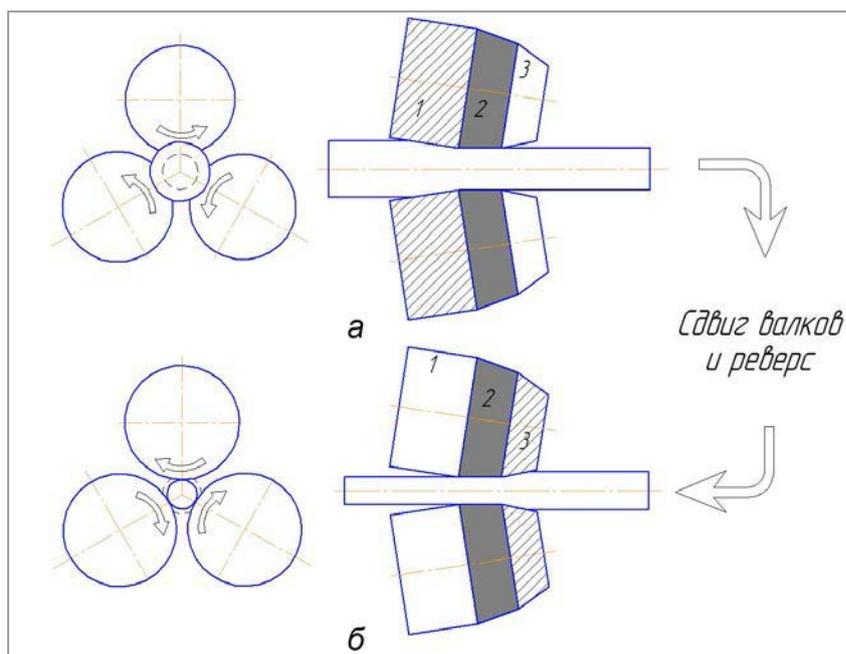


Рис. 1. Схема реверсивной радиально-сдвиговой прокатки:

*а* – прямые проходы; *б* – реверсивные проходы;

*1* – обжимной участок для прямых проходов; *2* – калибрующий участок для всех проходов; *3* – обжимной участок для реверсивных проходов

После каждого прохода, т.е. из исходного образца диаметром 36 мм и прокатанных до диаметров 32, 28, 24 и 20 мм образцов, были вырезаны цилиндры длиной 30 мм, которые в последующем использовали для подготовки микрошлифов и нарезки образцов для механических испытаний. Первая партия цилиндров длиной 30 мм была распилена вдоль на высокоточной отрезной машине Struers AccuTom-5. Первую половину образцов, а именно центральное ее сечение, использовали для подготовки ПЭМ-объектов для исследования тонкой структуры. Образцы были приготовлены электролитическим способом в следующем растворе: 600 мл Methanol, 360 мл Butylcellosolve, 60 мл Perchloric Acid. Оставшуюся вторую массивную половину использовали для измерения микротвердости по сечению прутка. Из второй партии цилиндров длиной 30 мм с помощью высокоточной отрезной машины Struers AccuTom-5 вдоль прутка были нарезаны образцы для механических испытаний в виде полосок размером 30x3x0,3 мм.

Исследование микроструктуры осуществляли на просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100 (JEOL, Япония) при ускоряющем напряжении 200 кВ. Микроструктуру исследовали в центре и на периферии сечения прутка. Механические свойства были определены путем испытания на разрыв плоских образцов на испытательной машине Instron 5966. Испытание проводили при скорости растяжения 0,5 мм/мин. Измерения микротвердости осуществляли на аппаратном комплексе на базе инвертированного микроскопа для металловедения Leica DFC290, оснащенного микротвердомером. При этом для испытания на разрыв и определения микротвердости для каждой точки эксперимента (после каждого прохода) было взято по три дублирующих образца.

Проведенный анализ микроструктуры полученных прутков диаметром 20 мм показал, что в периферийной части прутка была получена ультрамелкозернистая микроструктура с равноосными зёрнами и размером в интервале 0,4–0,6 мкм (рис. 2, а). В структуре образца видны структурные элементы, окруженные как тонкими границами, характерными для зеренной структуры, так и широкими неравновесными границами, более присущими субзеренной (ячеистой) структуре, а также области, практически свободные от дислокаций и области с повышенной плотностью дислокаций. Электронограмма имеет вид отдельных рефлексов, расположенных по окружности и имеющих азимутальное размытие. Поэтому структура может быть охарактеризована как равноосная зеренно-субзеренная.

Структура центральной зоны – это вытянутые в направлении прокатки длинные и узкие зёрна с размером 3–4 мкм (рис. 2, б). В зёрнах присутствуют отдельные очень тонкие деформационные двойники, доля которых не превышает 6%.

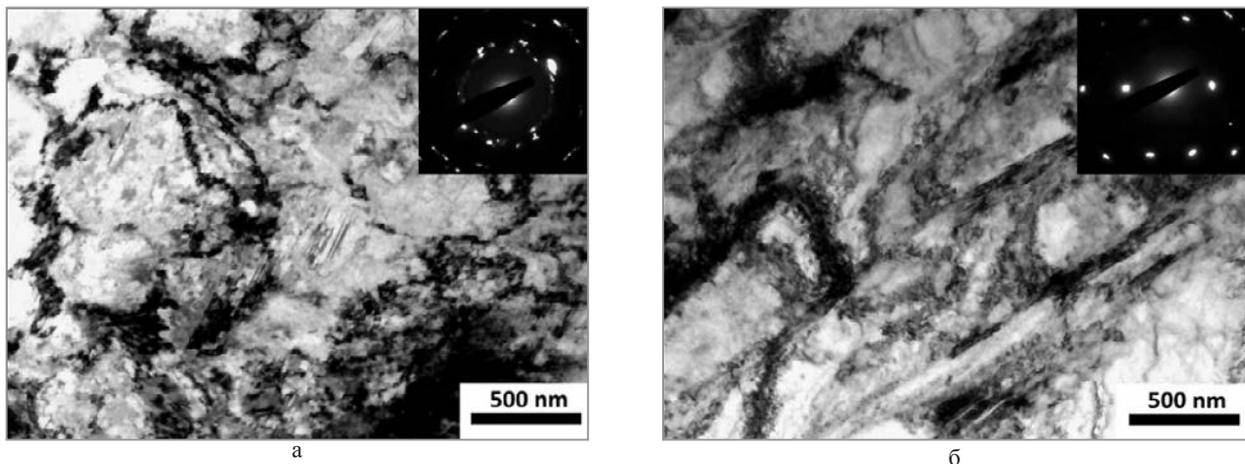


Рис. 2. Микроструктура периферийной (а) и осевой (б) частей прутка нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н9Т после радиально-сдвиговой прокатки

После металлографического анализа было проведено исследование микротвердости и механических свойств прутков из нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н9Т, полученных после каждого прохода радиально-сдвиговой прокатки, а также исходного недеформируемого образца. Результаты были усреднены по проходам и представлены на рис. 3.

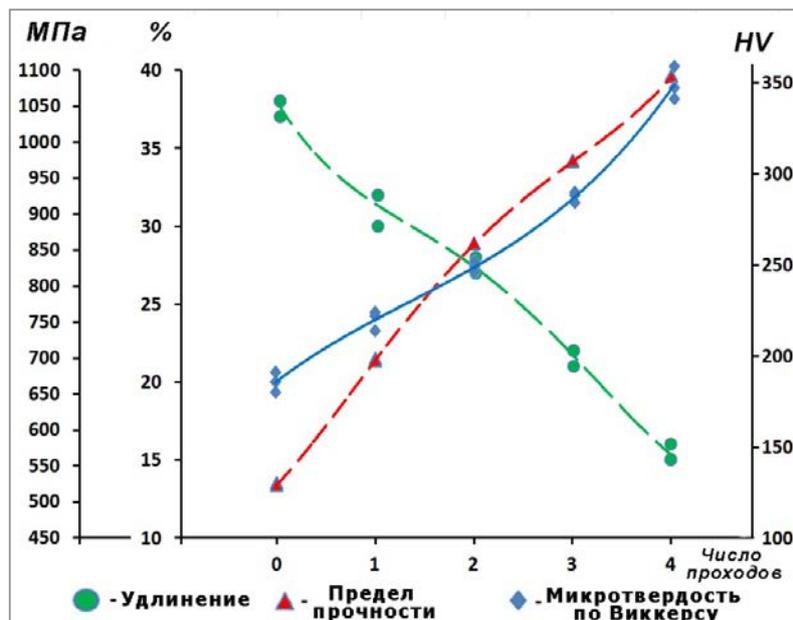


Рис. 3. Механические свойства и микротвердость нержавеющей аустенитной стали марки 12Х18Н9Т после радиально-сдвиговой прокатки по проходам

Из рисунка видно, что исходные (усредненные) значения механических свойств составляют: предел прочности – 525 МПа; относительное удлинение – 38%; микротвердость – 180 HV. После всех проходов

(суммарная степень деформации – 44,4%) на стане радиально-сдвиговой прокатки средний уровень микротвердости для стали марки 12X18H9T вырос до 341 HV (при максимальном значении 359 HV). При этом наблюдается практически плавный рост данного показателя от прохода к проходу. Механические свойства стали марки 12X18H9T также монотонно изменяются в зависимости от количества проходов, с одной только разницей: прочностные свойства растут, а пластические падают. Так, значение предела прочности ( $\sigma_B$ ) после четырех проходов выросло до значения 1092 МПа, а относительное удлинение, которое характеризует пластичности любого материала, уменьшилось до значения 15%.

С целью дополнительного подтверждения наличия структурной неоднородности в нержавеющей аустенитной стали, подвергнутой деформированию на стане радиально-сдвиговой прокатки, было проведено измерение микротвердости по сечению прокатанного до диаметра 20 мм прутка. Измерения микротвердости при этом фиксировали через каждый миллиметр сечения. Результаты измерения микротвердости приведены на рис. 4. Из рисунка видно, что результаты металлографических исследований о структурной неоднородности по сечению прутка из нержавеющей аустенитной стали марки 12X18H9T, подвергнутого радиально-сдвиговой прокатке, подтверждаются, так как наблюдается плавное снижение уровня микротвердости в центральной зоне прутка в среднем на 10,3%.

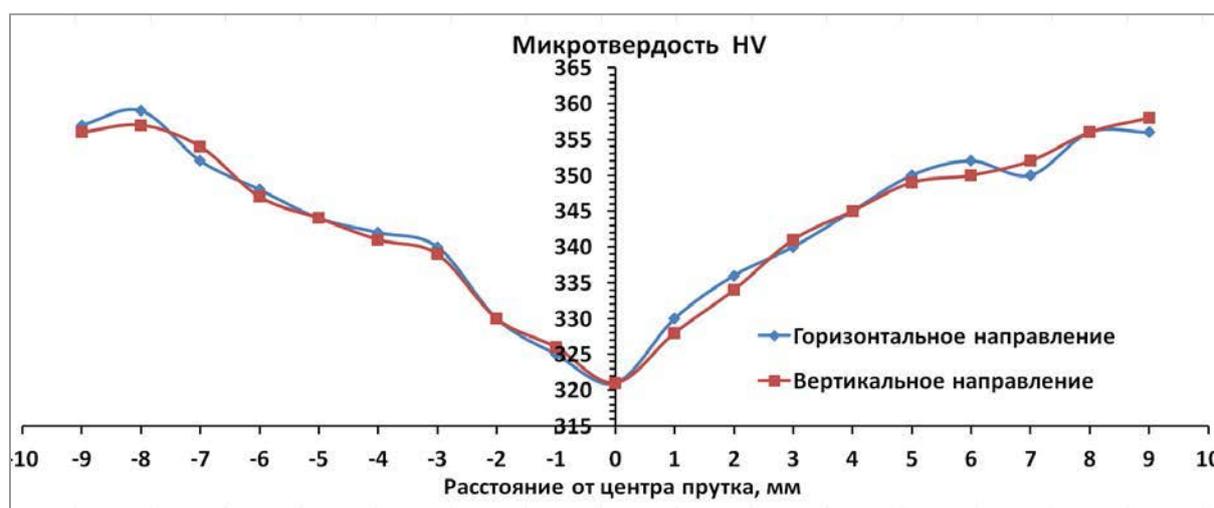


Рис. 4. Микротвердость HV нержавеющей аустенитной стали 12X18H9T после радиально-сдвиговой прокатки

### Выводы

Как известно, одним из распространенных способов повышения прочностных свойств металлов и сплавов является измельчение его микроструктуры до ультрамелкозернистого состояния, но при этом наблюдается неизбежное снижение пластических свойств данных материалов, и он становится хрупким и подвержен разрушению при растяжении. Из ряда работ, в том числе [26, 27], известно, что решить данную проблему, а именно повысить пластичность металлоизделия в целом возможно за счет использования металлических материалов с градиентной структурой, у которых размер зерна от крупнозернистого состояния в центральной части заготовки уменьшается до ультрамелкозернистого на поверхности. Результаты проведенных нами экспериментов подтвердили не просто возможность переработки пруткового лома из нержавеющей металлов с получением товарного продукта, но и получения именно высококачественных прутков с градиентной мелкозернистой структурой и повышенным уровнем механических свойств. Так, в ходе проведенных исследований по деформированию пруткового лома в виде шпилек из нержавеющей аустенитной стали 12X18H9T на стане радиально-сдвиговой прокатки в прутке была получена микроструктура двух разных типов: на периферии – равноосная ультрамелкозернистая структура с размером зерна 0,4–0,6 мкм, в осевой зоне – ориентированная, полосчатая текстура. Данное расхождение в структуре периферийных и осевой зон совместно с результатами измерения микротвердости по сечению продеформированных на стане радиально-сдвиговой прокатки образцов из нержавеющей аустенитной стали 12X18H9T с суммарной степенью деформации 44,4% свидетельствуют о градиентном характере сформировавшейся микроструктуры. Полученные после реализации предлагаемого способа рециклинга металлоизделий из нержавеющей аустенитной стали, отслуживших свой срок, теперь могут найти дальнейшее применение при изготовлении деталей ответственного назначения, в том числе и работающих в агрессивных средах.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP08955575).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Patent 1086789 USA. Method of rolling flanged shapes / Edwin E. Slick, 1914.
2. Patent 4982591 USA. Rail recycle process / Darrell B. McGahhey, 1991.
3. **Бахтинов, Ю. Б.** О целесообразности перекачки изношенных рельсов в сортовые профили // Производство проката. 2000. № 7. С. 2–4.
4. Патент 2509615 РФ. Способ перекачки рельсов / А. И. Трайно, Д. М. Иванов, 2014.
5. Патент 2511201 РФ. Способ перекачки железнодорожных рельсов / А. И. Трайно, Д. М. Иванов, 2014.
6. Патент 2491139 РФ. Способ производства фасонного проката / И. З. Вольшонок, Д. М. Иванов, А. Д. Русаков, М. П. Рыжик, А. И. Трайно, 2013.
7. Патент 2574531 РФ. Способ производства сортового проката из демонтированного железнодорожного рельса / А. А. Злобин, 2016.
8. Патент 2541211 РФ. Способ изготовления сортового металлопроката из фрагментов рельс / А. М. Матлашов, 2015.
9. **Рожков Г. К., Левандовский С. А., Саранча С. Ю. и др.** Разработка современной ресурсосберегающей технологии производства арматурного проката и мелющих шаров // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением. 2019. № 3. С. 18–22.
10. **Бадюк С. И., Лещенко А. И.** Получение сортовых профилей проката из изношенных железнодорожных рельсов // Обработка материалов давлением. 2010. № 4. С. 162–167.
11. Технология переработки железнодорожных рельсов на сортовой прокат / В. К. Смирнов, В. А. Шилов, А. М. Михайленко // Сталь. 1995. № 2. С. 46–48.
12. Патент 2356718 РФ. Способ ремонта штанг насосных методом пластической деформации / Н. А. Богатов, 2009.
13. Инновационная технология рециклинга насосных штанг с применением технологии и министанов радиально-сдвиговой прокатки в условиях ОАО «Очерский машиностроительные завод» / С. П. Галкин, Б. А. Романцев // Инженерная практика. 2014. № 9. С. 58–61.
14. **Осачук Э. А.** Ремонт насосных штанг по принципу горячей радиально-сдвиговой винтовой прокатки // Инженерная практика. 2017. № 1–2. С. 17–22.
15. **Galkin S. P.** Radial shear rolling as an optimal technology for lean production // Steel in Translation. 2014. № 44 (1). P. 61–64.
16. **Акопян, Т. К., Belov N. A., Aleshchenko A. S. et al.** Formation of the gradient microstructure of a new Al alloy based on the Al-Zn-Mg-Fe-Ni system processed by radial-shear rolling // Materials Science and Engineering A. 2019. Vol. 746. P. 134–144.
17. **Dobatkin S., Galkin S., Estrin Y. et al.** Grain refinement, texture, and mechanical properties of a magnesium alloy after radial-shear rolling // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 774. P. 969–979.
18. **Li Wang Y., Molotnikov A., Diez M., Lapovok R. et al.** Gradient structure produced by three roll planetary milling: Numerical simulation and microstructural observations // Materials Science and Engineering A. 2019. Vol. 639. P. 165–172.
19. **Derevyagina L. S., Gordienko A. I., Pochivalov Y. I., Smirnova A. S.** Modification of the Structure of Low-Carbon Pipe Steel by Helical Rolling, and the Increase in Its Strength and Cold Resistance // Physics of Metals and Metallography. 2018. Vol. 119. No 1. P. 83–91.
20. **Diez M., Kim H. E., Serebryany V., Dobatkin S., Estrin Y.** Improving the mechanical properties of pure magnesium by three-roll planetary milling // Materials Science and Engineering A. 2014. Vol. 612. P. 287–292.
21. **Bajor T., Kulakowska A., Dyja H.** Analysis of the rolling process of alloy 6005 in a three-high skew rolling mill // Materials. 2020. Vol. 13. No 5. P. 1114.
22. **Skripalenko M. M., Romantsev B. A., Galkin S. P., Kaputkina L. M., Skripalenko M. N.** Study of Strain and Structural Peculiarities in Different Stages of Two- and Three-High Screw Rolling // Steel in Translation. 2019. Vol. 49. No 10. P. 709–715.
23. **Galkin S. P.** Regulating radial-shear and screw rolling on the basis of the metal trajectory // Steel in Translation. 2004. Vol. 34. No 7. P. 57–60.
24. **Valiev R. Z., Alexandrov I. V., Zhu Y. T., Lowe T. C.** Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation // Journal of Materials Research. 2002. Vol. 17. No 1. P. 5–8.
25. **Галкин С. П., Харитонов Е. А.** Реверсивная радиально-сдвиговая прокатка. Сущность, возможности, преимущества // Титан. 2003. № 1(12). С. 39–45.
26. **Raab G. I., Simonova L. A., Aleshin G. N.** Tailoring the gradient ultrafine-grained structure in low-carbon steel during drawing with shear // Metallurgija. 2016. Vol. 55. No 2. P. 177–180.
27. **Рааб Г. И., Кодиров И. С., Алешин Г. Н., Рааб А. Г., Ценев Н. К.** Влияние особенностей формирования градиентной структуры при интенсивной пластической деформации сплавов с различными типами кристаллической решетки // Вест. Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. 2019. Т. 17. № 1. С. 64–75.

### REFERENCES

1. **Slick E. E.** Method of rolling flanged shapes. Patent USA, no. 1086789, 1914.
2. **McGahhey D. B.** Rail recycle process. Patent USA, no. 4982591, 1991.
3. **Bahtinov Ju. B.** O celesoobraznosti perekatki iznoshennykh rel'sov v sortovye profili [On the feasibility of rolling worn rails into long profiles]. *Proizvodstvo prokata = Rolling production*, 2000, no. 7, pp. 2–4.
4. **Trajno A. I., Ivanov D. M.** *Sposob perekatki rel'sov* [Method of rails re-rolling]. Patent RF, no. 2509615, 2014.
5. **Trajno A. I., Ivanov D. M.** *Sposob perekatki zheleznodorozhnykh rel'sov* [Method of railway rails re-rolling]. Patent RF, no. 2511201, 2014.

6. Vol'shonok I. Z., Ivanov D. M., Rusakov A. D., Ryzhik M. P., Trajno A. I. *Sposob proizvodstva fasonnogo prokata* [Method of production of shaped rolled products]. Patent RF, no. 2491139, 2013.
7. Zlobin A. A. *Sposob proizvodstva sortovogo prokata iz demontirovannogo zhelezodorozhnogo rel'sa* [Method of production of long products from dismantled railway rails]. Patent RF, no. 2574531, 2016.
8. Matlashov A. M. *Sposob izgotovlenija sortovogo metalloprokata iz fragmentov rel's* [Method for manufacturing high-quality rolled metal from rail fragments]. Patent RF, no. 2541211, 2015.
9. Rozhkov G. K., Levandovskij S. A., Sarancha S. Ju., Moller A. B., Kinzin D. I., Tulupov O. N. *Razrabotka sovremennoj resursosberegajushhej tehnologii proizvodstva armaturnogo prokata i meljushhih sharov* [Development of modern resource-saving technology for the production of reinforcing bars and grinding balls]. *Modelirovanie i razvitie processov obrabotki metallov davleniem = Modeling and development of metal forming processes*, 2019, no. 3, pp. 18–22.
10. Badjuk S. I., Leshhenko A. I. *Poluchenie sortovyh profilej prokata iz iznoshennyh zhelezodorozhnyh rel'sov* [Obtaining long-range profiles of rolled products from worn-out railway rails]. *Obrabotka materialov davleniem = Materials working by pressure*, 2010, no. 4, pp. 162–167.
11. Smirnov V. K., Shilov V. A., Mihajlenko A. M. *Tehnologija pererabotki zhelezodorozhnyh rel'sov na sortovoj prokat* [Technology for processing railway rails for long products]. *Stal' = Steel*, 1995, no. 2, pp. 46–48.
12. Bogatov N. A. *Sposob remonta shtang nasosnyh metodom plasticheskoj deformacii* [Method of repair of pumping rods by plastic deformation]. Patent RF, no. 2356718, 2009.
13. Galkin S. P., Romancev B. A. *Innovacionnaja tehnologija reciklinga nasosnyh shtang s primeneniem tehnologii i ministanov radial'no-sdvigovoj prokatki v uslovijah OAO «Ocherskij mashinostroitel'nye zavod»* [Innovative technology of recycling of pumping rods with the use of technology and mini-radial-shear rolling in the conditions of JSC “Ochersk machine-building plant”]. *Inzhenernaja praktika = Engineering practice*, 2014, no. 9, pp. 58–61.
14. Osachuk E. A. *Remont nasosnyh shtang po principu gorjachej radial'no-sdvigovoj vintovoj prokatki* [Repair of pumping rods on the principle of hot radial-shear screw rolling]. *Inzhenernaja praktika = Engineering practice*, 2017, no. 1–2, pp. 17–22.
15. Galkin S. P. *Radial shear rolling as an optimal technology for lean production*. *Steel in Translation*, 2014, vol. 44(1), pp. 61–64.
16. Akopyan, T. K., Belov N. A., Aleshchenko A. S., Galkin S. P., Gamin Y. V., Gorshenkov M. V., Cheverikin V. V., Shurkin P. K. *Formation of the gradient microstructure of a new Al alloy based on the Al-Zn-Mg-Fe-Ni system processed by radial-shear rolling*. *Materials Science and Engineering A*, 2019, vol. 746, pp. 134–144.
17. Dobatkin S., Galkin S., Estrin Y., Serebryany V., Diez M., Martynenko N., Lukyanova E., Perezhogin V. *Grain refinement, texture, and mechanical properties of a magnesium alloy after radial-shear rolling*. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 774, pp. 969–979.
18. Li Wang Y., Molotnikov, A., Diez M., Lapovok R., Kim H.-E., Tao Wang J., Estrin Y. *Gradient structure produced by three roll planetary milling: Numerical simulation and microstructural observations*. *Materials Science and Engineering A*, 2015, vol. 639, pp. 165–172.
19. Derevyagina L. S., Gordienko A. I., Pochivalov Y. I., Smirnova A. S. *Modification of the Structure of Low-Carbon Pipe Steel by Helical Rolling, and the Increase in Its Strength and Cold Resistance*. *Physics of Metals and Metallography*, 2018, vol. 119, pp. 83–91.
20. Diez M., Kim H. E., Serebryany V., Dobatkin S., Estrin Y. *Improving the mechanical properties of pure magnesium by three-roll planetary milling*. *Materials Science and Engineering A*, 2014, vol. 612, pp. 287–292.
21. Bajor T., Kulakowska A., Dyja H. *Analysis of the rolling process of alloy 6005 in a three-high skew rolling mill*. *Materials*, 2020, vol. 13(5), P. 1114.
22. Skripalenko M. M., Romantsev B. A., Galkin S. P., Kaputkina L. M., Skripalenko M. N. *Study of Strain and Structural Peculiarities in Different Stages of Two- and Three-High Screw Rolling*. *Steel in Translation*, 2019, vol. 49(10), pp. 709–715.
23. Galkin S. P. *Regulating radial-shear and screw rolling on the basis of the metal trajectory*. *Steel in Translation*, 2004, vol. 34(7), pp. 57–60.
24. Valiev R. Z., Alexandrov I. V., Zhu Y. T., Lowe T. C. *Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation*. *Journal of Materials Research*, 2002, vol. 17, pp. 5–8.
25. Galkin S. P., Haritonov E. A. *Reversivnaja radial'no-sdvigovaja prokatka. Sushnost', vozmozhnosti, preimushhestva* [Reverse radial-shear rolling. The nature, opportunities, advantages]. *Titan = Titanium*, 2003, no. 1, pp. 39–45.
26. Raab G. I., Simonova L. A., Aleshin G. N. *Tailoring the gradient ultrafine-grained structure in low-carbon steel during drawing with shear*. *Metallurgija*, 2016, vol. 55(2), pp. 177–180.
27. Raab G. I., Kodirov I. S., Aleshin G. N., Raab A. G., Tsenev N. K. *Vlijanie osobennostej formirovanija gradientnoj struktury pri intensivnoj plasticheskoj deformacii spлавov s razlichnymi tipami kristallicheskoj reshjotki* [Influence of features of gradient structure formation under intense plastic deformation of alloys with different types of crystal lattice]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. G. I. Nosova = Bulletin of Magnitogorsk state technical University named after G. I. Nosov*, 2019, vol. 17(1), pp. 64–75.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-68-75>  
УДК 669.714, 621.718

Поступила 12.04.2021  
Received 12.04.2021

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ КАТОДОВ-МИШЕНЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ СИЛИЦИДОВ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИТЕЙНО-ДЕФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

*И. А. ИВАНОВ, А. Г. СЛУЦКИЙ, В. А. ШЕЙНЕРТ, А. И. ИВАНОВ, А. Н. БЕЛЫЙ,*

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.*

*E-mail: deanmtf@bntu.by*

*В статье обсуждаются результаты изготовления многокомпонентных расходоуемых катодов вакуумных электродуговых испарительных установок. Для получения слитков комплексного силицида, как исходного сырья для изготовления катодов-мишеней, предложено использовать индукционную плавку чистых металлических шихтовых материалов в атмосфере аргона.*

*Методика позволила получать слитки комплексного силицида состава, близкого к расчетному и плотности не менее 93%. Дальнейшая формовка катода происходит при контроле фракций порошка по их процентному соотношению при усилии прессования не менее 50 т. Полученные результаты сравниваются с СВС-методом изготовления катодов идентичного состава.*

**Ключевые слова.** *Композиционные силициды, восстановительная и индукционная плавка, размол слитков, прессование, термообработка, катоды-мишени, испытания.*

**Для цитирования.** *Иванов, И. А. Изготовление катодов-мишеней из композиционных силицидов для нанесения защитных покрытий с применением литейно-деформационной технологии / И. А. Иванов, А. Г. Слуцкий, В. А. Шейнерт, А. И. Иванов, А. Н. Белый // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 68–75. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-68-75>.*

## PRODUCTION OF TARGET CATHODES FROM COMPOSITE SILICIDES FOR APPLYING PROTECTIVE COATINGS USING CASTING AND DEFORMATION TECHNOLOGIES

*I. A. IVANOV, A. G. SLUTSKY, V. A. SCHEINERT, A. I. IVANOV, A. N. BELY,*

*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti Ave. E-mail: deanmtf@bntu.by*

*The article discusses the results of manufacturing multicomponent consumable cathodes of vacuum electric arc evaporation plants. To obtain ingots of complex silicide as a raw material for the manufacture of target cathodes, it is proposed to use induction melting of pure metal charge materials in an argon atmosphere.*

*The method made it possible to obtain ingots of complex silicide with a composition close to the calculated one and a density of at least 93%. Further forming of the cathode takes place when controlling the powder fractions by their percentage ratio with a pressing force of at least 50 tons. The results obtained are compared with the SHS method of manufacturing cathodes of identical composition.*

**Keywords.** *Composite silicides, reduction and induction melting, ingot grinding, pressing, heat treatment, target cathodes, testing.*

**For citation.** *Ivanov I. A., Slutsky A. G., Scheinert V. A., Ivanov A. I., Bely A. N. Production of target cathodes from composite silicides for applying protective coatings using casting and deformation technologies. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 2, pp. 68–75. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-68-75>.*

### Введение

Современные вакуумные ионно-плазменные испарительные устройства позволяют использовать в качестве материала расходоуемого катода-мишени сплавы металл-металл и металл-неметалл [1]. Такие мишени дают возможность формировать достаточно сложные по составу покрытия, используя только один источник высокоионизированной низкотемпературной плазмы [2].

Достоинства таких катодов-мишеней очевидны – это экономия энергии при работе вакуумной установки (ВУ), уменьшение времени подготовительных операций, упрощение технологической компоновки

ВУ нанесения покрытия, снижение количества нежелательной газовой нагрузки в вакуумной камере за счет уменьшения количества разъемных фланцевых соединений, упрощение работы оператора ВУ за счет уменьшения количества контролируемых параметров процесса. Краткий обзор технологических методов изготовления таких катодов-мишеней с анализом их преимуществ и недостатков выполнен в [3]. Показано, что изготовление катодов-мишеней из сплавов металл-металлоид, особенно с большим содержанием металлоида, может осуществляться разными методами, среди которых наиболее широкое распространение получили способы литья и порошковой металлургии. Данные методы позволили получать сложнолегированные и относительно дешевые катоды-мишени, использование которых позволяло обеспечить постоянство состава плазменного потока и повторяемость свойств покрытий, возможность введения в состав катода-мишени таких элементов, как бор, кремний и др.

Известны ранние работы по изготовлению катодов титан-кремний для электродуговых вакуумных испарительных устройств методом индукционной плавки в контролируемой среде инертного газа. Они были направлены на получение катодов с максимально возможным содержанием кремния (более 66%) [4].

Опыт использования таких катодов показал, что, несмотря на хорошие эксплуатационные характеристики, получаемые сплавы титан-кремний не обладают высокой плотностью, имеют значительное количество макро- и микродефектов, склонны к образованию микротрещин в процессе эксплуатации, что способствует неустойчивому горению дугового разряда на поверхности катода. Эксплуатация катодов позволила сформулировать основные требования к катодам-мишеням вакуумных ионно-плазменных испарительных устройств [5].

#### Постановка задачи исследования

Ранее авторами проведены экспериментальные работы по исследованию процесса получения катодов-мишеней на основе сплавов титана с кремнием и переходными металлами методом СВС. Термодинамические расчеты позволили обосновать составы исходной шихты, которые допускают без внешнего подогрева реализовывать процессы металлотермического восстановления для получения безуглеродных катодов-мишеней титан-кремний- переходный металл. В качестве добавки к шихте использовали оксиды металлов, которые позволили увеличить термичность СВС-процесса и увеличить выход титана и кремния [6]. Расчеты показали, что наиболее значительное выделение количества тепла обеспечивают реакции восстановления алюминием, кальцием и магнием [7]. При этом титан можно восстанавливать из соединения только за счет алюминия, кальция и магния. Однако использование магния в качестве восстановителя возможно при повышенных давлениях (автоклавный метод), что требует дополнительных затрат. Расчеты также показали, что термичность восстановительных смесей  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}$  ниже критического порога и требует внешнего подогрева шихты для получения компактного слитка.

Был отработан вариант плавки комплексных силицидов на основе титана и никеля металлотермическим восстановлением компонентов из оксидной фазы [8]. За счет высокой термичности восстановительных смесей на основе оксидов, никеля и титана, порошка алюминия и кристаллического кремния процесс плавки силицида можно осуществлять без предварительного подогрева. При этом использование в составе смеси вместо кристаллического кремния силикокальция (СК30) позволило не только заменить часть алюминия, но активизировать процесс восстановления титана и никеля.

На основании выявленных особенностей восстановительной плавки комплексных силицидов было скорректировано соотношение в шихте оксидов титана и никеля, что позволило получать слитки комплексного силицида по своему химическому составу, близкие к расчетным.

Разработана методика получения комплексных силицидов, содержащих медь, титан, никель, и проведены их структурные исследования [8,9]. С использованием данной методики изготовлены и прошли апробацию катоды-мишени из сплавов Cu-Si, Ti-Cu-Si, Ti-Ni-Si.

Проведенные в комплексе исследования позволили выявить некоторые ограничения применимости СВС-технологии и процесса изготовления катодов-мишеней из комплексных силицидов. Недостатком СВС-метода является то, что он может быть реализован в ограниченном диапазоне концентраций компонентов мишеней, поскольку инициирование и прохождение реакции горения возможно только при составах реакционных смесей, имеющих достаточную термичность. При этом процесс сопровождается интенсивным газовыделением и порообразованием, для предотвращения которого необходимо дополнительное прессование шихты, что усложняет технологический процесс производства катодов. Кроме того, из-за быстрого охлаждения после завершения реакции синтеза материал катода-мишени отличается

высоким уровнем внутренних напряжений, под действием которых часто происходит самопроизвольное разрушение мишеней в процессе эксплуатации.

С учетом изложенного выше интерес представляет изучение технологических особенностей получения катодов-мишеней из комплексных силицидов с использованием металлургических, литейных и деформационных методов.

Целью данной работы является обобщение результатов экспериментальных исследований процесса изготовления катодов-мишеней с использованием методов литья и совмещенной литейно-деформационной технологии, суть которой заключается в получении литой заготовки силицида с последующим ее размолом, прессованием и спеканием готового катода-мишени.

### Обсуждение результатов исследований

В качестве объекта исследований были выбраны комплексные силициды на основе титана с никелем. Для их получения апробирован вариант высокоскоростной индукционной плавки аналогичных по составу силицидов с использованием чистых металлических шихтовых материалов. При этом для обеспечения качества получаемого слитка процесс осуществляли в нейтральной атмосфере аргона [9]. Это позволило обеспечить высокий (97%) металлургический выход и получить однородную макроструктуру слитка (рис. 1, *а*). Химический анализ показал, что силицид в среднем содержит 18% кремния, 30% никеля, 44% титана, а также некоторое количество углерода.

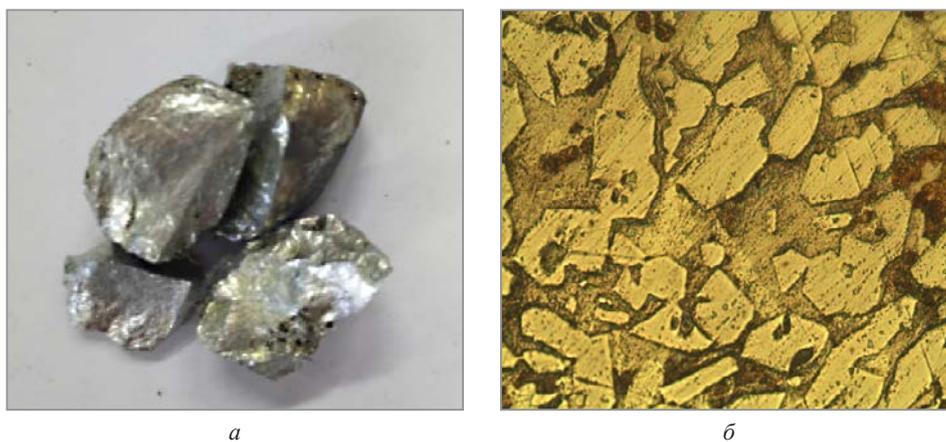


Рис. 1. Общий вид (*а*) и микроструктура (*б*) слитка комплексного силицида с никелем и титаном.  $\times 500$

Микроструктура комплексного силицида состоит из равномерно распределенных мелких фаз, имеющих различную микротвердость (рис. 1, *б*). При этом разброс значений для темных и светлых фаз составил от 515 до 1220 МПа.

Ниже представлены результаты исследований процесса изготовления катодов-мишеней совмещенным литейно-деформационным способом, включающим получение слитка комплексного силицида высокоскоростной индукционной плавкой, последующее его дробление и размол в порошок до требуемой фракции и изготовление катода методом прессования с последующим его спеканием и припайкой стального токовода.

Плавку комплексного силицида осуществляли на индукционной установке по методике, описанной в работе [10]. В качестве шихтовых материалов использовали кристаллический кремний, электролитический никель и кусковые отходы титана. Полученный расплав разливали в открытую литейную форму, конструкция которой обеспечивала его направленную кристаллизацию. Изготовлена опытная партия литых образцов силицида и выполнен их химический анализ, который показал, что концентрация основных элементов, близкая к расчетной (кремний – 19,94%, никель – 29,56, титан – 50,48%).

В дальнейшем слитки силицида подвергали дроблению и последующему размолу в лабораторной мельнице с использованием стальных шаров (диаметром 8 и 35 мм), что обеспечило получение мелкой фракции размером менее 0,08 мм.

Была разработана и изготовлена технологическая оснастка, экспериментально подобрано усилие прессования порошка силицида, которое составило порядка  $7-10 \text{ т/см}^2$ , что обеспечило начальную технологическую прочность. По такому режиму были изготовлены брикеты, которые прошли термическую обработку по отработанному режиму, который обеспечил максимальную прочность (усилие 0,4 т) до

разрушения образца при температуре 800 °С. Термическая обработка при более низких температурах (до 600 °С) не оказала существенного влияния на прочность брикета [11].

Однако, несмотря на обнадеживающие результаты использования разработанной методики, в структуре прессованных заготовок катода обнаружена микропористость. При этом плотность прессовок составляла 80–85% от фактической плотности литой заготовки. По-видимому, это связано, в первую очередь, несмотря на высокое удельное давление прессования, с плохой текучестью порошка силицида при полном отсутствии пластических свойств. Поэтому даже наращивание усилий прессования не позволяет снизить пористость такого катода. Одним из вариантов решения данной задачи является применение специально подобранного фракционного состава порошка силицида для прессования, обеспечивающего наиболее плотную упаковку частиц полученной заготовки.

На рис. 2 показан внешний вид исходного порошка комплексного силицида фракцией менее 0,08 мм, полученного методом электронной микроскопии.

При анализе изображения можно заключить, что порошок представлен случайным набором частиц размером от 5 до 80 мкм. При этом форма частиц сравнительно округлая с коэффициентом сферичности 0,6–0,8, вплоть до самых мелких фракций. При прессовании подобного порошка можно получить сравнительно плотные заготовки, однако практика показала, что достичь плотности, превышающей 85% от плотности литого сплава, не удалось даже при давлении 10 т/см<sup>2</sup>. Такая плотность материала катода являлась недостаточной для обеспечения высоких технологических показателей в процессе распыления. Поэтому для достижения меньшей пористости получаемых заготовок применены теоретические принципы формирования плотнейших упаковок частиц, хорошо разработанных геометрически и математически. За базовую упаковку частиц была принята гексагональная плотная упаковка шаров одного диаметра с коэффициентом заполнения 0,74. Для того чтобы достичь плотности заполнения 0,95, была разработана 3D-модель, позволившая вычислить необходимое количество и размеры шаров второго, третьего и четвертого порядков, требуемое для заполнения пустот между шарами первого базового уровня. В результате выполненных расчетов был получен оптимальный теоретический фракционный состав применительно к порошку комплексного силицида [12].

В качестве пластификатора для увеличения подвижности смеси при прессовании использовали добавку поливинилового спирта. Приготовленную смесь в дальнейшем подвергали прессованию, а полученный образец катода подвергали термической обработке по разработанному режиму. Установлено, что плотность катода составила 93%, что примерно на 10% больше, чем у аналогичного образца, изготовленного из порошка комплексного силицида с размером частиц менее 0,08 мм.

С учетом результатов выполненных исследований была разработана технологическая схема изготовления промышленного катода-мишени методом прессования дисперсного порошка комплексного силицида (рис. 3).

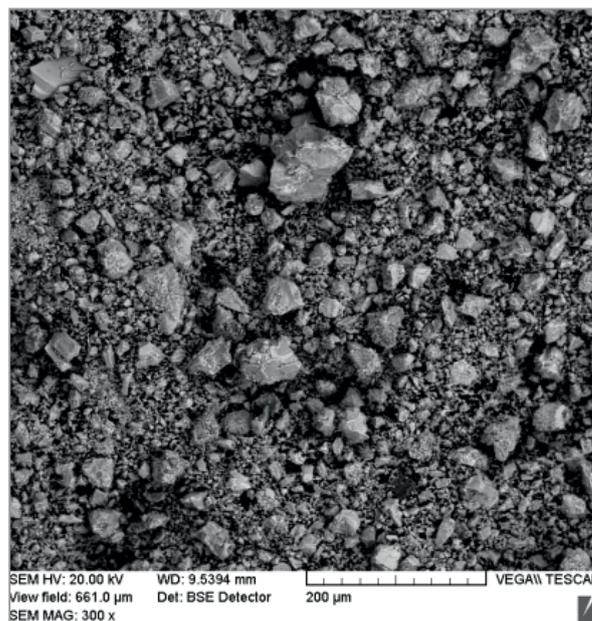


Рис. 2. Электронное изображение порошка комплексного силицида для прессования катода

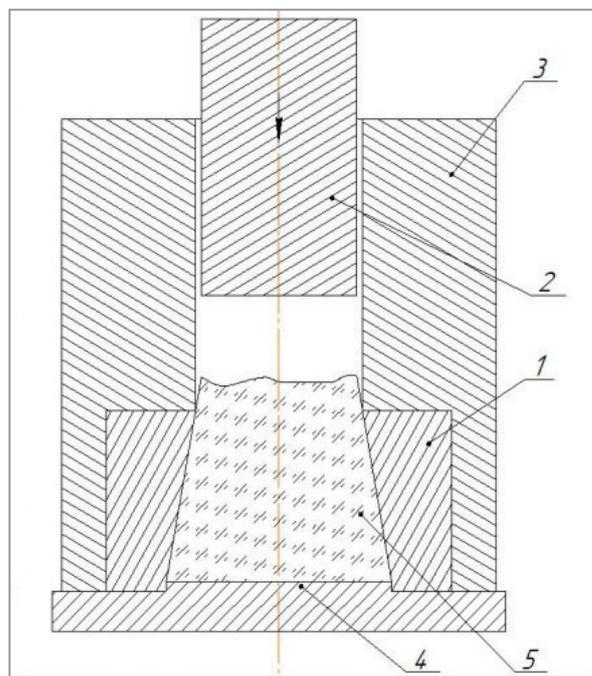


Рис. 3. Схема прессования катода-мишени из порошка комплексного силицида:  
1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – корпус пресс-формы; 4 – пята пресс-формы; 5 – порошок силицида

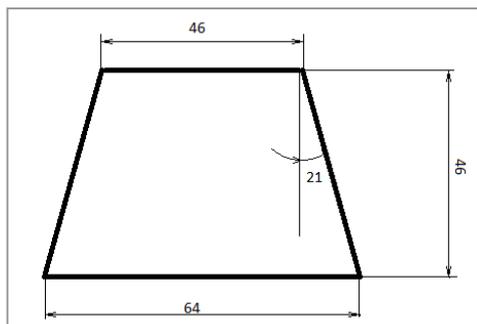


Рис. 4. Основные размеры катода-мишени для промышленной установки



*a*



*б*

Рис. 5. Технологическая оснастка для прессования катодов:  
*a* – элементы оснастки;  
*б* – элементы оснастки в сборе

Матрица 1, изготовленная из инструментальной стали, имеет форму катода-мишени (рис. 3). Корпус пресс-формы 3 позволяет центрировать пуансон 2 в процессе прессования порошка силицида 5. Для предотвращения попадания порошка между матрицей 1 и пятой пресс-формы 4 предусмотрен специальный выступ.

Изготовленные катоды были использованы для нанесения покрытий на установке вакуумно-плазменной обработки ВП-02М производства Vac Time. Геометрические размеры катода приведены на рис. 4.

Применительно к данным геометрическим размерам катода-мишени разработана и изготовлена технологическая оснастка для получения опытных образцов (рис. 5).

Для получения катодов-мишеней методом прессования применительно к конкретной установке по нанесению покрытий была изготовлена технологическая оснастка (рис. 5).

Были проведены расчеты усилия прессования, которые позволили определить необходимую навеску порошка комплексного силицида при получении заготовки катода. Расчетную навеску порошка силицида оптимального фракционного состава загружали вместе с пластификатором в матрицу и подвергали прессованию с усилием не менее 50 т. Полученную заготовку катода-мишени извлекали из матрицы, визуально осматривали и подвергали специальной термической обработке.

В дальнейшем нижнюю поверхность катода-мишени шлифовали и к ней припаивали стальной токовод. На рис. 6 показаны элементы полученного катода-мишени.

Ниже представлены результаты предварительных испытаний опытного образца катода-мишени на промышленной вакуумно-дуговой испарительной установке ВП-02М при следующих технологических режимах: отрицательное напряжение смещения – 150 В, ток разряда – 75А, время работы дугового испарителя – 10 мин в среде остаточного газа. В качестве подложки использовали листовую полированную нержавеющую сталь аустенитного класса. Для полученных покрытий характерно наличие капель, что является отличительной чертой вакуумных электродуговых покрытий. Внешний вид полученного покрытия в оптическом диапазоне показан на рис. 7, *a*, *б*.



*a*



*б*

Рис. 6. Основные элементы (*a*) и готовый образец (*б*) катода-мишени, полученный литейно-деформационным методом

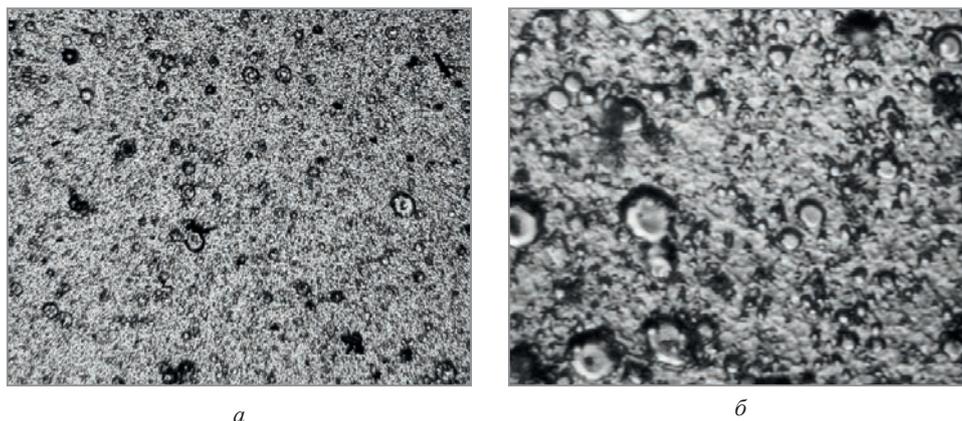


Рис. 7. Внешний вид покрытия с использованием литого катода из комплексного силицида:  
*a* –  $\times 100$ ; *б* –  $\times 500$

Электронные фотографии аналогичных образцов представлены на рис. 8. Они свидетельствуют о том, что в покрытии присутствуют капли размерами от 0,5 до 50 мкм в плоскости изображения. Это можно оценить как шероховатость поверхности  $R_z = 3,2-12,5$ , что соответствует ее чистоте после шлифовки.

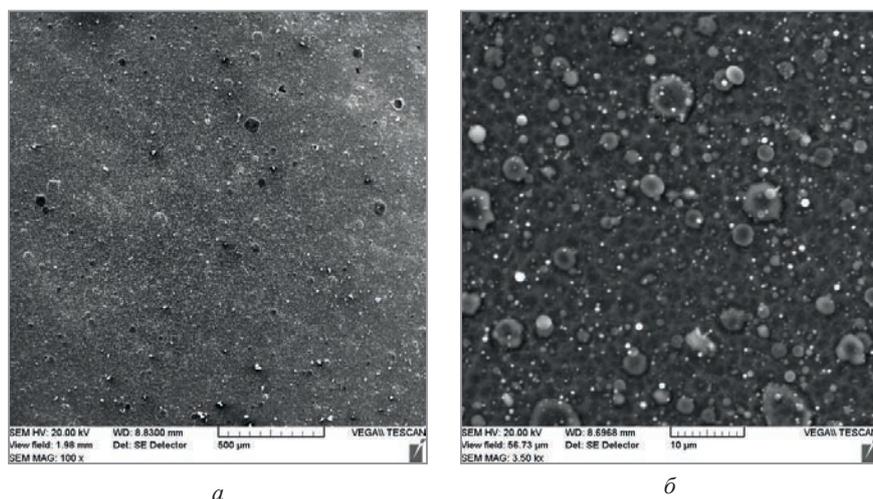


Рис. 8. Электронное изображение покрытия: *a* –  $\times 100$ ; *б* –  $\times 500$

Покрытие испытывали на жаростойкость в окислительном газовом пламени при температурах, достигающих 800 °С в течение 20 мин. Полученные результаты приведены на рис. 9. Из рисунка видно, что характер покрытия существенно не изменился в температурных зонах от 250 до 800 °С, при этом следов окисления не обнаружено.

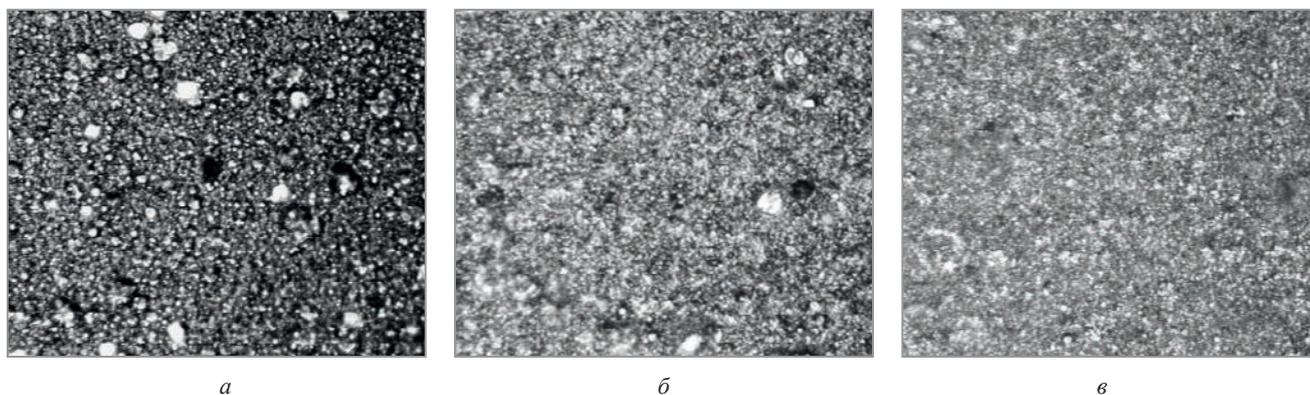


Рис. 9. Общий вид поверхностей покрытия из комплексного силицида после испытаний на жаростойкость при различных температурах:  
*a* – 250 °С; *б* – 600; *в* – 800 °С

### Выводы

1. Индукционная плавка с использованием чистых металлических материалов в атмосфере аргона на основе разработанной методики позволяет получать слитки комплексного силицида на основе титана с никелем с концентрацией элементов, близкой к расчетной, 19,94 % Si, 29,56 % Ni и 50,48 % Ti и плотностью не менее 93 %.
2. Предложенная схема прессования катодов-мишеней, где в качестве пластификатора использовали поливиниловый спирт, предполагает контроль фракций порошка по размерам и процентному соотношению между фракциями при усилении прессования не менее 50 т.
3. Показано, что катоды разработанного состава можно использовать для получения покрытий, характеризующихся высокой жаростойкостью на воздухе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Филонов И. П., Мрочек Ж. А., Иванов И. А.** Перспективы применения вакуумно-плазменных технологий в машиностроении и инструментальном производстве // Вестн. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 1999. № 1. С. 32–40.
2. Плазменно-вакуумные покрытия / Под общ. ред. Ж. А. Мрочека. Минск: УП «Технопринт», 2004. 369 с.
3. **Иванов И. А., Слуцкий А. Г., Шейнерт В. А.** Анализ составов и методов получения катодов-мишеней из кремнийсодержащих сплавов // *Металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр. В 2-х ч.* Минск: БНТУ, 2015. Вып. 36. Ч. 1. С. 190–197.
4. **Мрочек Ж. А., Эйзнер Б. А., Иванов И. А.** Эрозия сплавов кремния с переходными металлами 4-й группы в стационарной вакуумной дуге // *Электронная обработка материалов.* 1991. № 5. С. 21–24.
5. **Поболь И. Н., Иванов И. А.** Новые методы изготовления катодов-мишеней для получения многокомпонентных покрытий // *Современные материалы, оборудование и технология упрочнения и восстановления изделий.* Новополоцк, 1993. С. 67.
6. **Иванов, И. А. и др.** Технологические варианты получения катодов-мишеней из силицидов металлов для вакуумных ионно-плазменных источников // *Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр.* Минск: БНТУ, 2018. Вып. 39. С. 84–90.
7. **Иванов, И. А. и др.** Исследование процесса получения сплавов металл-кремний для изготовления катодов-мишеней // *Материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов».* Минск 14–16 сентября 2016 г. Минск: ФТИ НАН Беларуси. 2016.
8. **Иванов, И. А.** Особенности получения силицидов для изготовления катодов-мишеней / И. А. Иванов, А. Г. Слуцкий, В. А. Шейнерт, Э. В. Ковалевич, И. Л. Кулинич // *Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр.* Минск: БНТУ, 2016. Вып. 37. С. 98–103.
9. **Иванов, И. А. и др.** Технологические особенности получения силицидов на основе меди, никеля и титана для катодов-мишеней // *Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр.* Минск: БНТУ, 2017. Вып. 38. С. 84–90.
10. **Иванов, И. А.** Получение катодов-мишеней из силицидов для вакуумных ионно-плазменных источников / И. А. Иванов, А. Г. Слуцкий, В. А. Шейнерт, Э. В. Ковалевич, В. Н. Хлебцевич // *Литье и металлургия.* 2018. № 2 (91). С. 99–102.
11. **Иванов, И. А. и др.** Особенности получения катодов-мишеней из комплексных силицидов для вакуумных ионно-плазменных источников литейно-деформационным методом // *Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр.* Минск: БНТУ, 2019. Вып. 40. С. 90–95.
12. **Иванов, И. А. и др.** Совершенствование процесса получения катодов-мишеней из комплексных силицидов для вакуумных ионно-плазменных источников // *Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр.* Минск: БНТУ, 2020. Вып. 41. Ч. 2. С. 7–14.

### REFERENCES

1. **Filonov I. P., Mrochek Zh. A., Ivanov I. A.** Perspektivy primeneniya vakuumno-plazmennyyh tehnologij v mashinostroenii i instrumental'nom proizvodstve [Prospects for the application of vacuum-plasma technologies in mechanical engineering and tool production]. *Vesci NAN Belarusi. Ser. fiz.-techn. navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical series*, 1999, no. 1, pp. 32–40.
2. *Plazmenno-vakuumnye pokrytija* [Plasma-vacuum coatings]. Minsk, UP Tehnoprnt Publ., 2004, 369 p.
3. **Ivanov I. A., Sluckij A. G., Shejnert V. A.** Analiz sostavov i metodov poluchenija katodov-mishenej iz kremnij soderzhashhih splavov [Analysis of compositions and methods of producing target cathodes from silicon-containing alloys]. *Metallurgija: Respublikanskij mezhdomestvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers*, Minsk, BNTU Publ., 2015, vyp. 36, vol. 1, pp. 190–197.
4. **Mrochek Zh. A., Jezner B. A., Ivanov I. A.** Jerozija splavov kremnija s perehodnymi metallami 4-j grupy v stacionarnoj vakuumnoj duge [Erosion of silicon alloys with transition metals of the 4th group in a stationary vacuum arc]. *Jelektronnaja obrabotka materialov = Electronic material processing*, 1991, no. 5, pp. 21–24.
5. **Pobol' I. N., Ivanov I. A.** Novye metody izgotovlenija katodov- mishenej dlja poluchenija mnogokomponentnyh pokrytij [New methods of manufacturing target cathodes for obtaining multicomponent coatings]. *Sovremennye materialy, oborudovanie i tehnologija uprochnenija i vosstanovlenija izdelij = Modern materials, equipment and technology for strengthening and restoring products*, Novopolock, 1993, 67 p.
6. **Ivanov I. A. et al.** Tehnologicheskie varianty poluchenija katodov-mishenej iz silicidov metallov dlja vakuumnyh ionno-plazmennyyh istochnikov [Technological options for producing target cathodes from metal silicides for vacuum ion-plasma sources]. *Metallurgija: respublikanskij mezhdomestvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers*, Minsk, BNTU Publ., 2018, vyp. 39, pp. 84–90.
7. **Ivanov I. A., Sluckij A. G., Kovalevich Je. V., Shejnert V. A., Kulnich I. L.** Issledovanie processa poluchenija splavov metall-kremnij dlja izgotovlenija katodov-mishenej [Investigation of the process of obtaining metal-silicon alloys for the manufacture of target cathodes]. *Materialy XI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Sovremennye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki ma-*

terialov», 14–16 sentjabrja 2016 g., Minsk [Materials of the XI International Scientific and Technical Conference “Modern Methods and Technologies for the Creation and Processing of Materials”. September 14–16, 2016, Minsk]. Minsk, FTI NAN Belarusi Publ., 2016.

8. **Ivanov I.A., Sluckij A.G., Shejnert V.A., Kovalevich Je. V., Kulinich I.L.** Osobennosti poluchenija silicidov dlja izgotovlenija katodov-mishenej [Features of obtaining silicides for the manufacture of target cathodes]. *Metallurgija: Respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers*, Minsk, BNTU Publ., 2016, vyp. 37, pp. 98–103.

9. **Ivanov I.A. et al.** Tehnologicheskie osobennosti poluchenija silicidov na osnove medi, nikelja i titana dlja katodov-mishenej [Technological features of obtaining silicides based on copper, nickel and titanium for target cathodes]. *Metallurgija: respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers*, Minsk, BNTU Publ., 2017, vyp. 38, pp. 84–90.

10. **Ivanov I.A., Sluckij A.G., Shejnert V.A., Kovalevich Je. V., Hlebceвич V.N.** Poluchenie katodov-mishenej iz silicidov dlja vakuumnyh ionno-plazmennyh istochnikov [Obtaining target cathodes from silicides for vacuum ion-plasma sources]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 2(91), pp. 99–102.

11. **Ivanov I.A. et al.** Osobennosti poluchenija katodov-mishenej iz kompleksnyh silicidov dlja vakuumnyh ionno-plazmennyh istochnikov litejno-deformacionnym metodom [Features of obtaining target cathodes from complex silicides for vacuum ion-plasma sources by the casting-deformation method]. *Metallurgija: Respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers*, Minsk, BNTU Publ., 2019, vyp. 40, pp. 90–95.

12. **Ivanov I.A. et al.** Sovershenstvovanie processa poluchenija katodov-mishenej iz kompleksnyh silicidov dlja vakuumnyh ionno-plazmennyh istochnikov [Improvement of the process of obtaining target cathodes from complex silicides for vacuum ion-plasma sources]. *Metallurgija: Respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers*, Minsk, BNTU Publ., 2020, vyp. 41, vol. 2, pp. 7–14.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-76-80>  
УДК 539.2

Поступила 09.03.2021  
Received 09.03.2021

## ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ КРЕМНИЯ И АЛЮМИНИЯ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ

А. Г. АНИСОВИЧ, А. П. ЛАСКОВНЕВ, М. И. МАРКЕВИЧ, А. Н. МАЛЫШКО, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: [anna-anisovich@yandex.ru](mailto:anna-anisovich@yandex.ru)  
В. И. ЖУРАВЛЕВА, Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь, пр-т Независимости, 220

*Интерес к наноматериалам обусловлен существенным изменением их физических свойств по сравнению с массивными материалами. Изменение физико-химических свойств частиц, содержащих несколько сот или тысяч атомов, определяется изменением плотности электронных состояний.*

*Методом лазерной абляции получены водные растворы наночастиц алюминия и кремния. Импульсная лазерная обработка проводилась в режиме сдвоенных импульсов в дистиллированной воде. Вложенная энергия составляла для алюминия 1000–1500 Дж, время воздействия – 10–25 мин, для кремния – 50–1000 Дж при временах экспозиции от 1 до 10 мин.*

*Методом сканирующей электронной микроскопии установлены особенности морфологии полученных частиц, а также поверхности кратеров поликристаллического алюминия и кремния. Показано, что формируется ансамбль частиц разного размера от 20 нм до 2,0 мкм. Некоторые частицы алюминия имеют огранку, что позволяет говорить об их кристалличности. Показано, что структура поверхности мишени после лазерного воздействия состоит из зерен, отделенных друг от друга канавками термического травления, поскольку испарение материала происходит в первую очередь по границам зерен.*

**Ключевые слова.** Наночастицы, лазерная абляция, алюминий, кремний, двухимпульсный лазерный режим.

**Для цитирования.** Анисович, А. Г. Получение наночастиц кремния и алюминия в водном растворе / А. Г. Анисович, А. П. Ласковнев, М. И. Маркевич, А. Н. Малышко, В. И. Журавлева // *Литье и металлургия*. 2021. № 2. С. 76–80. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-76-80>.

## PREPARATION OF SILICON AND ALUMINUM NANOPARTICLES IN AN AQUEOUS SOLUTION

A. G. ANISOVICH, A. P. LASKOVNEV, M. I. MARKEVICH, A. N. MALYSHKO, GNU Physical-Technical Institute of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevicha str. E-mail: [anna-anisovich@yandex.ru](mailto:anna-anisovich@yandex.ru)  
V. I. ZHURAVLEVA, Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus, 220, Nezavisimosti ave.

*The interest in nanomaterials is due to a significant change in their physical properties compared to massive materials. Changes in the physical and chemical properties of particles containing several hundred or thousands of atoms are determined by changes in the density of electronic states.*

*Aqueous solutions of aluminum and silicon nanoparticles were obtained by laser ablation. Pulsed laser treatment was performed in the mode of double pulses in distilled water. The invested energy was: for aluminum 1000–1500 J, the exposure time is 10–25 min., for silicon-50–1000 J with exposure times from 1 to 10 min.*

*The features of the morphology of the obtained particles, as well as the surface of polycrystalline aluminum and silicon craters, were determined by scanning electron microscopy. It is shown that an ensemble of particles of different sizes from 20 nm to 2.0 microns is formed. Some aluminum particles are cut, which allows us to talk about their cristallinity. It is shown that the structure of the target surface after laser exposure consists of grains separated from each other by thermal etching grooves, since the evaporation of the material occurs primarily along the grain boundaries.*

**Keywords.** Nanoparticles, laser ablation, aluminum, silicon, two-pulse laser mode.

**For citation.** Anisovich A. G., Laskovnev A. P., Markevich M. I., Malyshko A. N., Zhuravleva V. I. Preparation of silicon and aluminum nanoparticles in an aqueous solution. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 76–80. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-76-80>.

### Введение

В последнее время в мире возрос интерес к получению и изучению наноразмерных частиц алюминия, так как их физико-химические свойства имеют преимущества по сравнению с более крупными частицами. Так, доля атомов в поверхностном слое частиц резко увеличивается при уменьшении

их размера ниже 1 мкм. Атомы на поверхности характеризуются меньшим координационным числом и большей энергией, чем атомы внутри частиц. В силу этого наночастицы приобретают новые физико-химические свойства по сравнению с микрочастицами. Так, например, температура плавления наночастиц ниже, чем у массивного образца [1–3]. Кроме того, когезионная энергия поверхностных атомов ниже, чем у атомов, находящихся внутри частицы. В настоящее время ведутся работы по использованию наночастиц алюминия в качестве материалов для светодетонаторов [1, 2]. С этой целью в [1–3] были использованы наноразмерные добавки алюминия (0,1 мас.%) в тетранитропентаэритрита с плотностью 1,73 г/см<sup>3</sup> [1, 2], которые показали высокий эффект увеличения чувствительности к воздействию лазерных импульсов по сравнению с добавками микронных размеров.

Принципиально новый материал, который состоит из воды и наночастиц алюминия, был разработан для применения в двигателях и устройствах преобразования энергии [3, 4].

Следует отметить также, что лазерная абляция открывает широкие возможности для получения наночастиц кремния в воде. Частицы, получаемые этим способом, отличаются высокой чистотой благодаря уникальным свойствам лазерного излучения: когерентности, монохроматичности, малой длительности воздействия, отсутствия прямого контакта между материалом и источником энергии. Использование наночастиц кремния имеет большие перспективы. В частности, ученые университета Южной Калифорнии (USC) разрабатывают новый тип Li-ion аккумуляторов, в котором вместо графитовых анодов применяют наночастицы кремния. Батареи такого типа можно использовать от смартфонов до гибридных автомобилей.

Преимуществами абляции материала в жидкостях являются относительная простота процесса, возможность получения готовых коллоидных растворов, частиц малого размера [5–8].

Целью данной работы является получение наночастиц алюминия и кремния в жидкости при лазерном воздействии в режиме сдвоенных импульсов.

### Материалы и методики

В качестве мишени использовали поликристаллический алюминий и кремний, а в качестве среды, в которой находилась мишень, применяли дистиллированную воду. Жидкость принудительно не перемешивали. Для обработки материала использован лазер на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующий в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом в 3 мкс, длительность импульсов – 10 нс, частота следования импульсов – 10Гц, энергия одиночного импульса – ~0,05Дж).

Образованная в результате испарения алюминия под действием первого импульса абляционная плазма создает в приповерхностном слое область с повышенной температурой и пониженной плотностью частиц воздуха, что приводит к более полному использованию энергии второго импульса для лазерной абляции. Образцы Al обрабатывали лазерным излучением в интервале энергий 1000–1500 Дж при временах экспозиции от 10 до 25 мин, а образцы Si – лазерным излучением в интервале энергий 50–1000 Дж при временах экспозиции от 1 до 10 мин. Размеры образцов: алюминия – 10x30x12 мм; кремния – 10x10x12 мм.

В процессе получения и во время хранения водных растворов наночастиц алюминия и кремния не применяли поверхностно-активные вещества. Исследования образцов проводили на растровом электронном микроскопе MIRA-3. Измерения проводили при различных значениях ускоряющего напряжения: от минимального порога чувствительности системы микроанализа (6,4 кВ) до максимального значения ускоряющего напряжения, равного 30 кВ.

### Основная часть

В настоящей работе исследовали морфологию поверхности наночастиц алюминия и кремния, а также поверхность кратеров алюминия и кремния, образованных в процессе лазерного воздействия.

При воздействии серии наносекундных импульсов основным механизмом удаления вещества является термомеханическая абляция, приводящая к удалению поверхностного слоя [5–7]. В эрозионный лазерный факел также поступает мелкодисперсная конденсированная фаза материала мишени.

В результате многократного импульсного лазерного воздействия на поверхности мишени образуется кратер. На рис. 1 показана морфология внутренней поверхности кратеров после воздействия.

Как следует из проведенного исследования, структура кратера алюминия состоит из зерен, имеющих размер от 2 до 5 мкм и из зерен кремния, имеющих размер от 100 нм до 1 мкм. Зерна отделены друг

от друга канавками. Вероятно, что при воздействии импульсного лазерного излучения на поверхность мишени испарение материала происходит в первую очередь по границам зерен. В результате этого образуются широкие канавки термического травления. Испарение материала происходит как с поверхности зерна, так и через канавки термического травления, образовавшиеся по границам зерен (рис. 1). На поверхности кратера кремния видны частицы размером 20 нм до 2,4 мкм, которые осадились на поверхности кратера из образовавшегося коллоидного раствора.

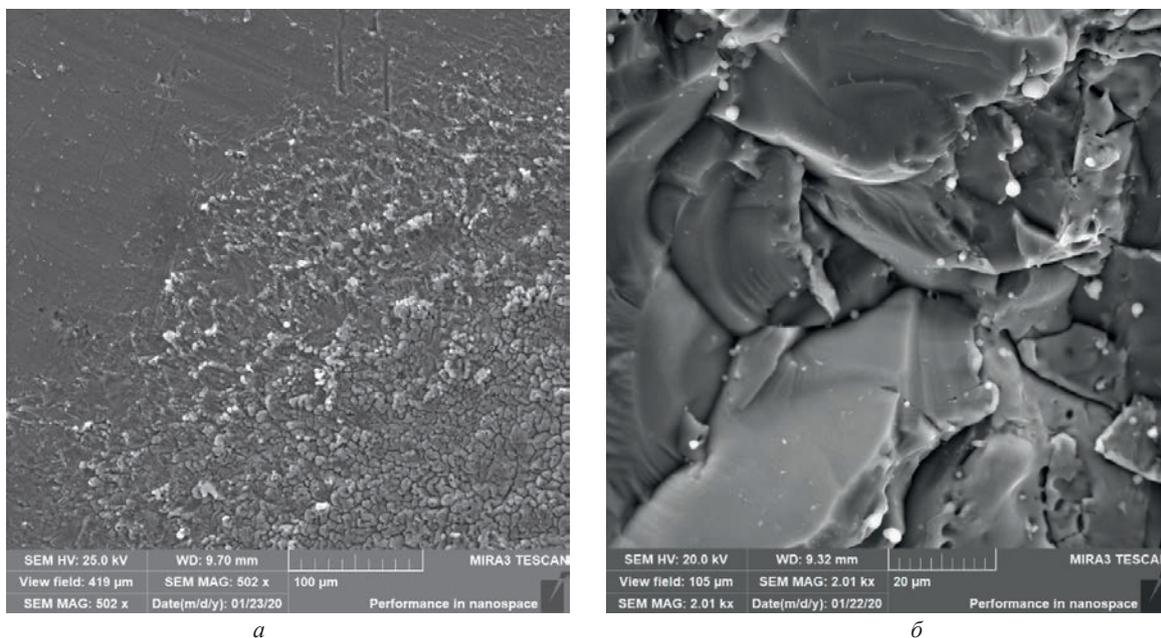


Рис. 1. Морфология поверхности кратера алюминиевой и кремниевой мишени после лазерного воздействия: *а* – алюминий; *б* – кремний

На рис. 2 показаны частицы алюминия, образовавшиеся в результате лазерного воздействия. Размер частиц составляет от 20 нм до 0,6 мкм. На поверхности крупной частицы размером 1000 нм видны более мелкие частицы. Форма некоторых частиц имеет правильную кристаллографическую огранку.

На рис. 3 представлены фотография поверхности кратера алюминия и ее элементный состав. Элементный анализ показывает, что состав поверхности кратера не изменился в процессе лазерного воздействия; окисление на поверхности кратера в процессе его формирования отсутствует.

На рис. 4 приведены морфология поверхности частиц кремния, образовавшихся в результате лазерного воздействия, и элементный анализ поверхности кратера.

Образовавшиеся частицы кремния имеют сферическую форму. Размер частиц составляет от 20 нм до 2,5 мкм. На поверхности крупных частиц видны осажженные наночастицы, средний размер которых составляет ~20 нм. При этом образование наночастиц происходит по механизму пар–жидкость (п→ж), о чем свидетельствует их сферическая форма.

При выходе эрозионной плазмы, образующейся под действием лазерного импульса, в водную среду происходит ее охлаждение со скоростью более  $10^6$  град/с. Наночастицы, полученные методом лазерной абляции в жидкости, как показывают исследования [5], могут быть как кристаллическими, так и аморфными (рис. 4). Процесс конденсации наночастиц может происходить по двум различным

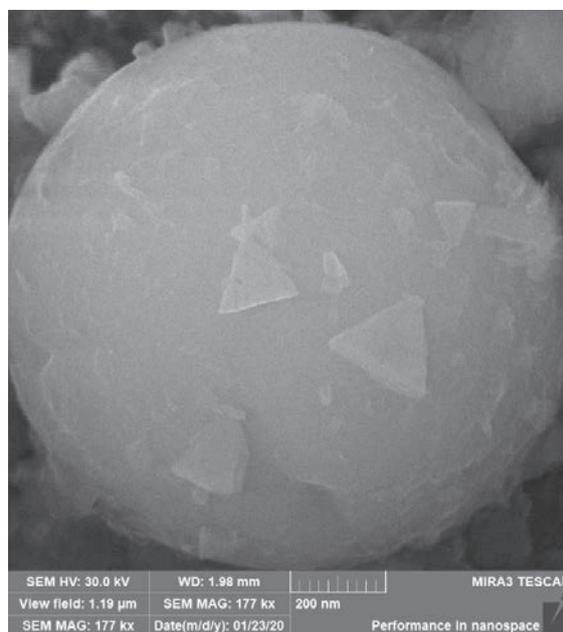


Рис. 2. Морфология поверхности частиц алюминия, образовавшихся в результате лазерного воздействия; вложенная энергия – 1500 Дж, время воздействия – 25 мин

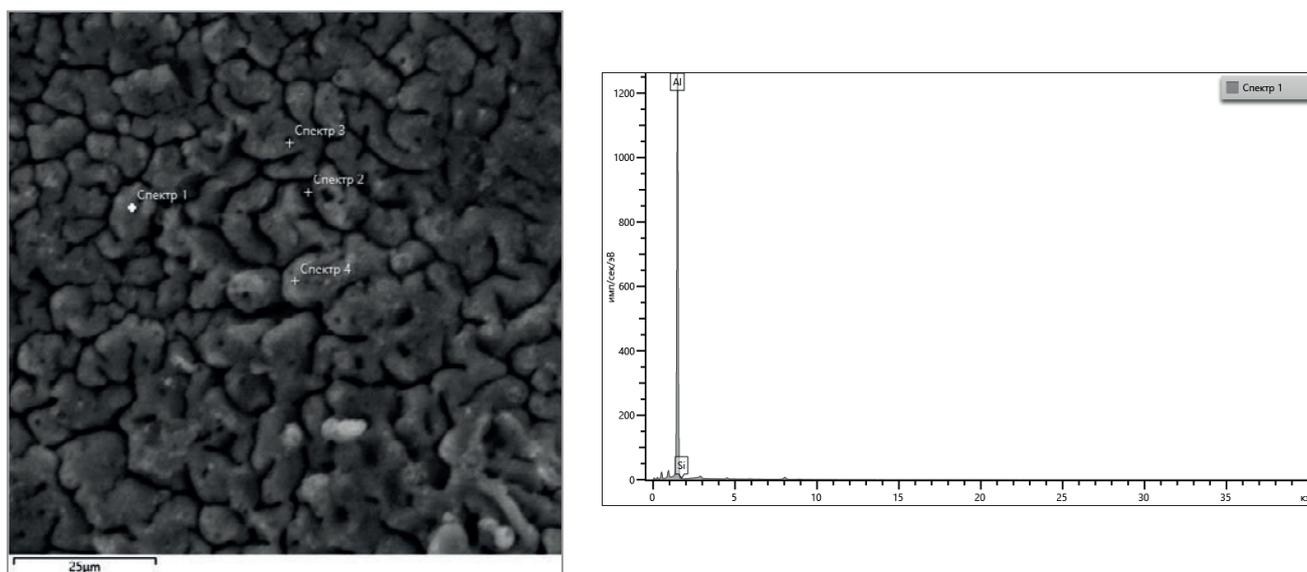


Рис. 3. Морфология поверхности кратера алюминия и ее элементный состав

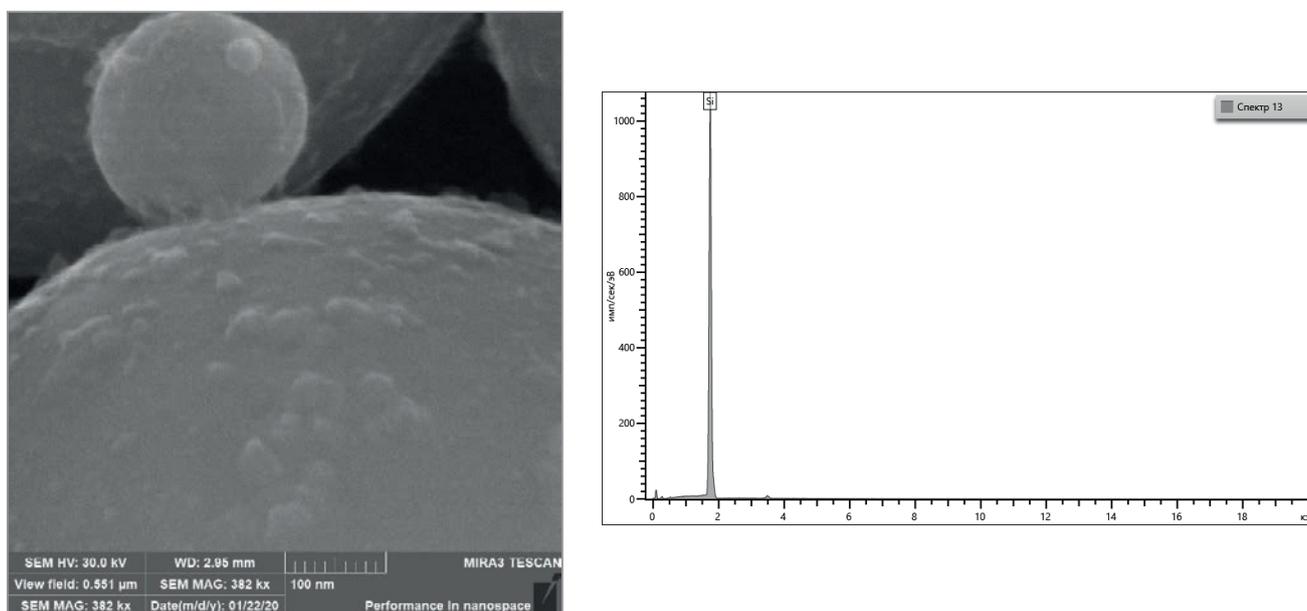


Рис. 4. Морфология поверхности частиц кремния, образовавшихся в результате лазерного воздействия (а); вложенная энергия – 600 Дж, время воздействия – 10 мин; элементный анализ поверхности кратера кремния (б)

механизмам: пар-жидкость (п→ж) и пар-кристалл (п→к) [5]. Образовавшаяся по механизму п→ж наночастица может находиться в аморфном состоянии или в дальнейшем кристаллизоваться (частица имеет правильную геометрическую форму в виде треугольников) по механизму (ж→к) (см. рис. 2).

### Выводы

Методом лазерной абляции получены водные растворы наночастиц алюминия и кремния. Показано, что формируется ансамбль частиц разного размера. Некоторые частицы имеют огранку, что позволяет говорить об их кристалличности. Методом сканирующей электронной микроскопии установлены особенности морфологии поверхности кратера поликристаллического алюминия и кремния, находящихся в дистиллированной воде при импульсной лазерной обработке в режиме сдвоенных импульсов. Показано, что структура кратеров состоит из зерен, отделенных друг от друга канавками, испарение материала происходит в первую очередь по границам зерен, образуются широкие канавки термического травления.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского Фонда фундаментальных исследований, грант № T21ЭТ-001 «Структурные превращения и режимы получения наночастиц кремния импульсным лазерным воздействием для увеличения емкости Li-ион аккумуляторов».*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адуев, Б. П. Влияние начальной температуры на порог лазерного инициирования тетранитропентаэритрита с добавками наночастиц алюминия / Б. П. Адуев, Г. М. Белокуров, Д. Р. Нурмухаметов // Химическая физика. 2012. Т. 31. № 7. С. 56–61.
2. Адуев, Б. П. Температурная зависимость порога инициирования композита тетранитропентаэритрит-алюминий второй гармоникой неодимового лазера / Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, И. Ю. Лисков, А. А. Звекков, А. В. Каленский // Химическая физика. 2015. Т. 34. № 7. С. 54–57.
3. Risha, G.A. Combustion of frozen nanoaluminium and water mixtures/ G.A. Risha, T.L. Connel, R.A. Yetter, D.S. Sundaram, V. Yang // J. Propul. Power. 2014. Vol. 30. № 1. P. 133–142.
4. Risha, G.A., Tappan Combustion of nanoaluminium and liquid water / G.A. Risha, S.F. Son, R.A. Yetter, V. Yang, B.S. Tappan // Proc. Combust. Inst. 2007. Vol. 31. № 2. P. 2029–2036.
5. Маркевич, М. И. Структурные превращения в тонких металлических пленках при импульсном лазерном воздействии / М. И. Маркевич, А. М. Чапланов // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 2016. № 1. С. 28–35.
6. Markevich, M.I. In sulphurous liquids under action of shock waves / M.I. Markevich, F.A. Piskunov // High Power Laser Science and Engineering. 1995. Czech R. NATO Advanced study institute. Karlovy Vary. P. 49.
7. Chaplanov A.V., Goncharov V.K., Kozadaev K.V., Markevich M.I., Puzyrov M.V. The laser method of metal nanoparticle formation with the help of spatial separation // Publications of the astronomical observatory of Belgrade. Belgrade. 2007. № 82. P. 45–55.
8. Казилин, Е. Е. Исследование коллоидных растворов селена, созданных по лазерной технологии / Е. Е. Казилин, М. И. Маркевич, С. В. Конкин и др. // Перспективные материалы. 2008. № 3. С. 60–63.

## REFERENCES

1. Aduyev B.P., Belokurov G.M., Nurmukhametov D.R. Vliyaniye nachal'noy temperature na porog lazernogo initsirovaniya tetranitropentaerythritra s dobavkami nanochastits alyuminiya. [Influence of the initial temperature on the threshold of laser initiation of tetranitropentaerythritol with additives of aluminum nanoparticles]. *Khimicheskaya fizika= Chemical physics*, 2012, vol. 31, no. 7, pp. 56–61.
2. Aduyev B.P., Nurmukhametov D.R., Liskov I. Yu., Zvekov A.A., Kalenskiy A.V. Temperaturnaya zavisimost' poroga initsirovaniya kompozita tetranitropentaerythrit-alyuminiy vtoroy garmonikoy neodimovogo lazera. [Temperature dependence of the initiation threshold of the tetranitropentaerythritol – aluminum composite by the second harmonic of a neodymium laser]. *Khimicheskaya fizika=Chemical physics*, 2015, vol. 34, no. 7, pp. 54–57.
3. Risha G.A., Connel T.L., Yetter R.A., Sundaram D.S., Yang V. Combustion of frozen nanoaluminium and water mixtures. *J. Propul. Power*, 2014, vol. 30, no. 1, pp. 133–142.
4. Risha G.A., Son S.F., Yetter R.A., Yang V., Tappan B.S. Combustion of nanoaluminium and liquid water. *Proc. Combust. Inst*, 2007, vol. 31, no. 2, pp. 2029–2036.
5. Markevich M.I., Chaplanov A.M. Strukturnye prevrascheniya v tonkikh metallikheskih plenrach pri impul'snom lazernom vozdeistvii [Structural transformations in thin metal films at pulse laser effect]. *Vesti NAN Belarusi. Ser. fiz.-mat. nauk=Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-mathematical Series*, 2016, no. 1, pp. 28–35.
6. Markevich M.I., Piskunov F.A. In sulphurous liquids under action of shock waves. High Power Laser Science and Engineering. 1995. Czech R. NATO Advanced study institute. Karlovy Vary. pp. 49.
7. Chaplanov A.V., Goncharov V.K., Kozadaev K.V., Markevich M.I., Puzyrov M.V. The laser method of metal nanoparticle formation with the help of spatial separation. Publications of the astronomical observatory of Belgrade, Belgrade, 2007, no. 82, pp. 45–55.
8. Kazilin Ye. Ye., Markevich M.I., Konkin S.V. et al. Issledovaniye kolloidnykh rastvorov selena, sozdannykh po lazernoy tekhnologii [Investigation of colloidal solutions of selenium created by laser technology]. *Perspektivnyye materialy =Advanced materials*, 2008, no. 3, pp. 60–63.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-81-86>  
УДК 621.74

Поступила 17.02.2021  
Received 17.02.2021

## ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 30ХЗМФ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ МИКРОЛЕГИРОВАНИЕМ

*А. З. ИСАГУЛОВ, Св. С. КВОН, В. Ю. КУЛИКОВ, А. М. ДОСТАЕВА, Е. П. ЩЕРБАКОВА, Карагандинский технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан, Бульвар Мира, 56. E-mail: mlpikm@mail.ru, тел. 8-7212-56-59-35*  
*П. В. КОВАЛЕВ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, ул. Политехническая, 29. E-mail: kovalev\_pv@spbstu.ru, тел. 8-800-707-18-99*

Одним из направлений повышения износостойкости является микролегирование улучшаемых сталей. В проведенных исследованиях определена целесообразность корректировки состава стали 30ХЗМФ путем дополнительного микролегирования  $V+Nb$  с целью придания ей износостойких свойств. Проведены микроструктурные исследования опытного сплава. Микроструктура является достаточно однородной, представлена матрицей и включениями. Матрица представлена легированным раствором, в состав которого входит никель. Определено, что в химически- и структурно-неоднородном слитке даже после термообработки сохраняются структурные составляющие. Такие характеристики, как количество, морфология и характер распределения неметаллических включений в металлической матрице, в основном закладываются на этапе выпуска металла из сталеплавильного агрегата, а также в процессе раскисления и модифицирования стали при ее внепечной обработке.

**Ключевые слова.** Износостойкость, микролегирование, сплав, раскисление, алюминий, микроструктура.

**Для цитирования:** Исагулов, А. З. Повышение износостойких свойств стали 30ХЗМФ дополнительным микролегированием / А. З. Исагулов, Св. С. Квон, В. Ю. Куликов, А. М. Достоева, Е. П. Щербакова, П. В. Ковалев // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 81–86. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-81-86>.

## IMPROVEMENT OF WEAR-RESISTANT PROPERTIES OF STEEL 30H3MF WITH ADDITIONAL MICROALLOYING

*A. Z. ISSAGULOV, Sv. S. KVON, V. Yu. KULIKOV, A. M. DOSTAEVA, E. P. SHCHERBAKOVA, Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan, 56, Mira Boulevard. E-mail: mlpikm@mail.ru, tel. 8-7212-56-78-41*  
*P. V. KOVALEV, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation, 29, Polytechnicheskaya str. E-mail: kovalev\_pv@spbstu.ru, tel. 8-800-707-18-99*

One of the directions of wear resistance improvement is microalloying of improved steels. In the studies conducted, the feasibility of adjusting the composition of steel 30H3MF was determined by additional microalloying of  $V + Nb$  in order to give it wear-resistant properties. Microstructural studies of the experimental alloy were carried out. The microstructure is fairly uniform, represented by a matrix and inclusions. Matrix is represented by doped solution, which includes nickel. It is determined that in a chemically and structurally inhomogeneous ingot, even after heat treatment, structural components will remain. Characteristics such as the amount, morphology and distribution of non-metallic inclusions in the metal matrix are mainly laid at the stage of metal discharge from the steelmaking unit, as well as in the process of deoxidation and modification of steel during its off-furnace treatment.

**Keywords.** Wear resistance, microalloying, alloy, deoxidation, aluminum, microstructure.

**For citation.** Issagulov A. Z., Kvon Sv.S., Kulikov V. Yu., Dostaeva A. M., Shcherbakova E. P., Kovalev P. V. Improvement of wear-resistant properties of steel 30H3MF with additional microalloying. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 2, pp. 81–86. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-81-86>.

Одним из существующих трендов в области развития износостойких материалов является совершенствование состава и свойств сплава на базе улучшаемых сталей [1–3]. Это обстоятельство обусловлено тем, что доминирующее положение в этом секторе рынка занимает сталь Hardox различных марок (Швеция), которая отличается чрезвычайно высокими износостойкими свойствами. Высокий уровень свойств

достигается, в первую очередь, за счет чистоты шихтовых материалов, сбалансированного состава и правильной термообработки. Стоимость этой стали достаточно высока, кроме того, ее нерентабельно использовать в качестве материала для производства деталей методом литья. Эти факторы и обуславливают поиск сталей-аналогов, сопоставимых после дополнительной обработки со свойствами эталона.

Задача настоящего исследования – определение возможности корректировки состава стали 30X3MФ путем дополнительного микролегирования V+ Nb с целью придания ей износостойких свойств.

Для легирования использовали ферроникель марки FeNi20LC (ISO 6501:1988), раскисление проводили ферромарганцем марки ФМн90 (ГОСТ 4765–91). Расчет шихты осуществляли таким образом, чтобы в ее составе никель и марганец присутствовали в количестве 0,5–0,7 и 1,5–1,8% соответственно при степени усвоения элементов 80%. Предварительно для лучшего растворения ферросплавы измельчали до фракции 200 мкм при содержании данной фракции не менее 70%. Плавку проводили в лабораторной печи УИП-25 с улучшенной системой водоохлаждения, масса плавки – 3,0 кг. За основу брали стальной лом, за 15 мин до окончания плавки вводили ферроникель, за 5 мин до разливки – раскисление ферромарганцем. Всего было проведено три лабораторные плавки. По окончании каждой плавки и полного охлаждения был проведен химический анализ выплавленного сплава на спектрометре NITON XL2-100G. Усредненный результат трех плавков приведен в таблице.

Химический состав образцов, %

Номер образца	Образец	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	B	V+ Nb
1	Hardox 500 (эталон)	0,32	0,7	1,6	0,6	0,025	0,025	1	0,6	0,003	-
2	30X3MФ без легирования	0,28	0,35	0,5	0,2	0,02	0,02	2,5	0,3	-	0,09
3	30X3MФ после легирования	0,32	0,6	1,7	0,55	0,025	0,025	2,3	0,28	-	0,13

Как видно из таблицы, содержание таких элементов, как Si, Mn, Ni, после предлагаемой обработки достигает содержания этих элементов в эталоне. Отсутствие бора в составе образца № 3 компенсируется повышенным содержанием хрома и присутствием ванадия. Недостатком полученного сплава является пониженное содержание молибдена по сравнению с эталоном, что надо учитывать при назначении режима термообработки, так как молибден препятствует развитию отпускной хрупкости [4].

Плавку разливали в цилиндрические образцы (рис. 1).



Рис. 1. Лабораторные образцы из опытной износостойкой стали

Из опытной плавки были подготовлены образцы для термообработки. Классическим режимом термообработки стали 30X3MФ является закалка с 870 °С в масле с последующим отпуском 620 °С в воде. В связи с тем что состав стали изменился, соответственно должен измениться режим термообработки.

В связи с увеличением содержания углерода и марганца, образующего карбиды цементитного типа, целесообразно несколько увеличить температуру закалки. При назначении режима термообработки необходимо также помнить, что сталь 30X3MФ склонна к отпускной хрупкости II рода. Увеличение содержания Si и Mn в комбинации Cr-Mn-Si, как в данном случае, повышает эту склонность. Благоприятным фактором в борьбе с отпускной хрупкостью является присутствие Mo, хотя его наличие меньше, чем в эталоне.

Для предотвращения развития отпускной хрупкости были рассмотрены следующие режимы термообработки: закалка с 890 °С в масле с последующим отпуском в интервале 450–550 °С, охлаждение в холодной воде. Выбор более низкой температуры отпуска обусловлен стремлением избежать интервала отпускной хрупкости и повысить прочностные свойства матрицы.

Необходимую вязкость матрицы должно обеспечить повышенное содержание Ni в скорректированном составе. На рис. 2 показана микроструктура выплавленного сплава.

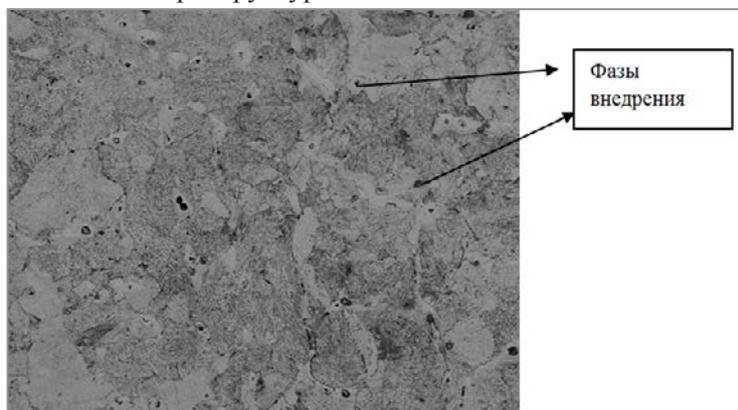
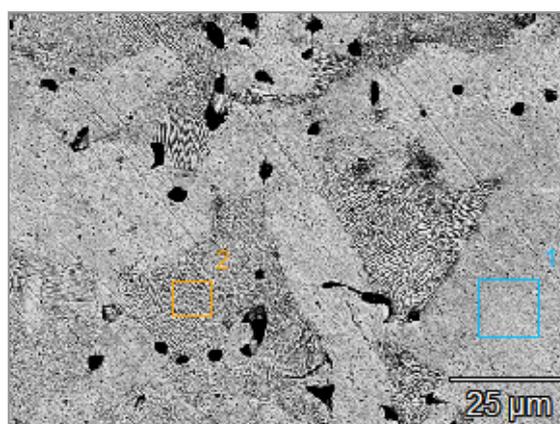


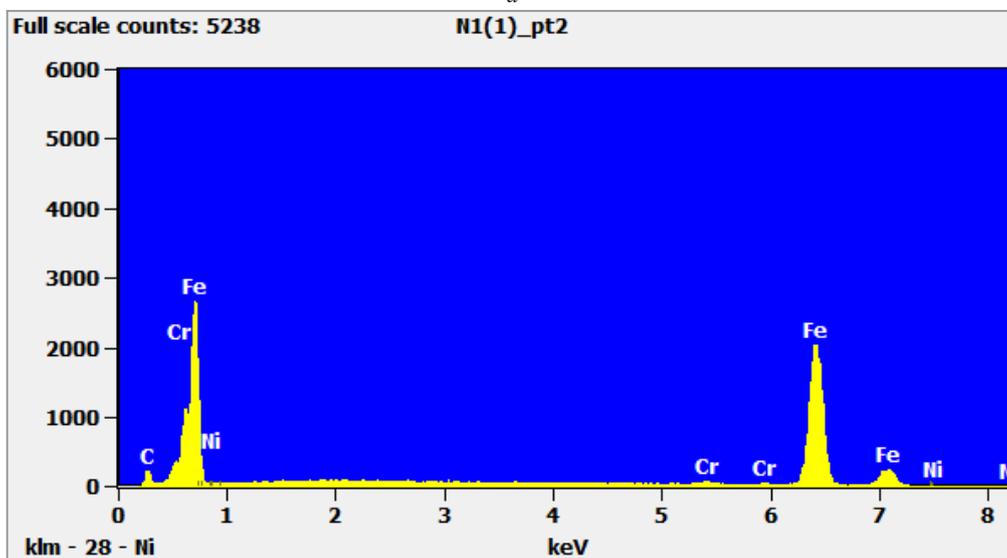
Рис. 2. Микроструктура опытного сплава.  $\times 300$

Микроструктура – достаточно однородная, представлена матрицей и включениями. Матрица представлена легированным раствором, в состав которого входит никель (рис. 3). Также в матрице присутствует частично такой карбидообразующий элемент, как хром, однако молибден, ванадий и ниобий в матрице не присутствуют. Как будет показано ниже, эти элементы входят в состав карбидной фазы.

Технологическая сложность процесса получения качественной стали обусловлена тесной взаимосвязью всех технологических переделов, включающих выплавку полупродукта, доводку металла и внепечное рафинирование.



*a*



*b*

Рис. 3. РФА матрицы опытного сплава (сталь с повышенным содержанием V+ Nb): *a* – микроструктура; *b* – РФ

При производстве среднеуглеродистых сталей, микролегированных ванадием и ниобием, с содержанием марганца до 1,5% особое внимание следует уделять металлургическому качеству стали. Металлургическое качество, в первую очередь, определяется уровнем загрязненности стали неметаллическими включениями, причем как эндогенной, так и экзогенной природы образования.

Включения эндогенной природы образования, оставшиеся в стали после выпечной обработки, приводят к формированию скоплений неметаллических включений в готовой продукции и формируют зону точечной неоднородности в теле слитка. Включения экзогенной природы образования, источником которых являются частицы изношенной футеровки ковшей, запутавшиеся частицы шлака, а также частицы разливочных узлов, также способствуют формированию скоплений неметаллических включений, оказывающих негативное влияние на сплошность, механические свойства и эксплуатационные характеристики готовой продукции. Повышенная газонасыщенность стали, в том числе повышенное содержание азота и водорода, приводит к образованию газовых пузырей, флокенов в стали, внутренним расслоениям, а также нарушению сплошности металла.

В процессе выпечной обработки и последующей разливки стали в ней формируются неметаллические включения, распределяющиеся по объему металла в соответствии с их термовременной природой и поверхностными свойствами на всех границах сосуществующих фаз с учетом гидродинамики поведения расплава. При затвердевании в теле отливки развиваются дендритная и зональная химические неоднородности, формируются разные структурные зоны в соответствии с градиентом, возникшим перед фронтом кристаллизации, продолжают образовываться неметаллические включения не только из-за снижения температуры, но, главным образом, за счет обогащения расплава примесями, вызывающими ликвацию. Таким образом, в литом состоянии формируется макро- и микроструктурная неоднородность по сечению слитка, обусловленная вышеназванными физико-химическими процессами.

Таким образом, в химически- и структурно-неоднородном слитке даже после термообработки сохраняются структурные составляющие, морфологически наследуемые от структуры литого металла, такие, как видманштеттов феррит, крупные зерна аустенита, наследуемые от нераздробленных литых кристаллов.

Как известно из металлургической практики, повышение металлургического качества металла может быть осуществлено на этапе выпуска металла из плавильного агрегата, выпечной обработки стали за счет оптимизации технологии раскисления и модифицирования жидкой стали.

Такие характеристики, как количество, морфология и характер распределения неметаллических включений в металлической матрице, в основном закладываются на этапе выпуска металла из сталеплавильного агрегата, а также в процессе раскисления и модифицирования стали при ее выпечной обработке. Технология раскисления и модифицирования стали, включающая, в том числе тип используемых раскислителей и модификаторов, последовательность и способ их ввода в стальной расплав, должна обеспечивать наиболее полное удаление образующихся продуктов раскисления из жидкого металла, а также минимальное содержание неметаллических включений в готовом металле [5–11].

Для проведения анализа загрязненности опытных сплавов неметаллическими включениями были отобраны образцы литого металла от трех опытных плавов в количестве 10 шт. от каждой плавки. Образцы отбирали до и после модифицирования кальцийсодержащими реагентами непосредственно из разливочной изложницы.

Для проведения металлографических исследований загрязненности металла неметаллическими включениями образцы проходили несколько этапов шлифподготовки, которые включали в себя вырезку образцов на отрезном станке с использованием абразивных кругов, горячую запрессовку в фенольной смоле в автоматическом прессе, многостадийную шлифовку и полировку на автоматизированной шлифовально-полировальной машине. Комбинированием тканей, скоростей вращения полировального круга, давлений на образцы и длительностей этапов полировки достигалось оптимальное качество шлифа, которое заключалось в отсутствии царапин, рельефа поверхности, выкрошившихся включений, налипшей на включения полировальной суспензии. Оценку загрязненности металла оксидными и сульфидными неметаллическими включениями осуществляли на 100 полях зрения на нетравленных шлифах в соответствии со стандартом ASTM E 1245.

Для определения химического и фазового составов обнаруженных неметаллических включений использовали возможности рентгеновского микроанализа. Микрорентгеноспектральные исследования химического состава обнаруженных неметаллических включений проводили с использованием растрового электронного микроскопа ZEISS SUPRA 55VP. Данный микроскоп снабжен системой компьютерного

контроля сканирования электронным пучком и цифровой регистрацией сигналов и изображения, а также рентгеноспектральным микроанализатором INCA WAVE и INCA X-MAX. Расчет содержания оксидных и сульфидных компонентов в составе каждого включения осуществляли на основе данных микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) и соответствующих стехиометрических соотношений между элементами. Уточнение фазового состава проводили при помощи изотермических сечений тройных диаграмм состояния. Например, для включения, имеющего, согласно МРСА, состав  $\text{Ca} = 32,04\%$ ;  $\text{Al} = 14,81\%$ ;  $\text{Mg} = 1,17\%$ ;  $\text{O}$  – остальное массовое содержание оксидов  $\text{CaO} = 60\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 37\%$ ;  $\text{MgO} = 3\%$ . Фазовый состав соответствует  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  с незначительным содержанием  $\text{MgO}$ .

Как показал анализ технологии производства опытных плавок исследуемой стали, для всех плавок значительных отклонений по содержанию углерода на выпуске металла из печи не наблюдается ( $[\text{C}]_{\text{ср}} = 0,039\%$ ). Соответственно окисленность металла на этой стадии должна быть также на одном уровне ( $[\text{O}]_{\text{расч. ср.}} = 0,073\%$ ). При этом суммарное количество алюминия, присаживаемое на этапе внепечной обработки, для плавки № 1 имеет максимальное значение по сравнению с плавками № 2 и 3. Это приводит к увеличению концентрации алюминия в стали перед разливкой (0,046% против 0,029 и 0,032%) и повышению величины  $\text{Al}/\text{Ca}$  (отношение общей массы присаживаемого алюминия к общей массе вводимого кальция) до 10,24 (против 7,49 и 7,39). Несмотря на то что это значение является удовлетворительным, данный факт приводит к повышению доли  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в составе неметаллических включений этой плавки по сравнению с остальными [12].

Для выплавки опытной стали необходимо использовать чугунный лом с пониженным содержанием серы и металлический лом с минимально возможным уровнем загрязнения примесями цветных металла в соотношении 75–85% чугуна и 25–15% металлического лома.

На выпуске металла из плавильного агрегата после отсечки первичного шлака на 10%-ном периоде времени от продолжительности выпуска присаживается известь, на 20%-ном периоде вводятся кремний-марганецсодержащие материалы в количестве, необходимом для обеспечения заданного содержания  $[\text{C}]$ ,  $[\text{Mn}]$ ,  $[\text{Si}]$ . Затем присаживаются микролегирующие добавки. На 30%-ном периоде вводится чушковый алюминий; по возможности минимизировать время выпуска стали из плавильного агрегата (5–6 мин).

Количество вводимого алюминия на выпуске из печи не должно превышать критическое значение, определяемое окисленностью стали, также не исключается вариант использования на выпуске только  $\text{Mn}$  и  $\text{SiMn}$  для предварительного раскисления, ввод алюминия при этом осуществляется на более поздних этапах.

Окончательное раскисление алюминием необходимо проводить незадолго до ввода в металл модификатора. Кроме того, следует обеспечивать более равномерный ввод легирующих материалов ( $\text{FeNb}$ ,  $\text{FeMo}$ ,  $\text{Cu}$ ) по ходу внепечной обработки, причем единичная вводимая порция должна составлять не более 10% от массы плавки.

При последующей внепечной обработке необходимо обеспечивать содержание алюминия в стали на 0,01–0,02% выше верхнего предела марочного состава стали путем ввода алюминия не более чем за 10 мин до ввода кальцийсодержащих материалов. Количество присаживаемых алюминия и силикокальция должно находиться в пределах 0,89–0,91 кг алюминия на 1 кг силикокальция.

Необходимо отметить, что жидкие алюминаты кальция, близкие по составу к  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , формируются при относительно низких содержаниях алюминия в стали  $[\text{Al}] < 0,01\%$ , не попадающих в заданный марочный интервал. Поэтому рекомендуется для всего рабочего диапазона по кальцию ( $[\text{Ca}] = 0,0005\text{--}0,0050\%$ ) находиться на нижнем пределе по алюминию  $[\text{Al}] \rightarrow 0,015\%$ .

Таким образом, определены основные технологические параметры дополнительного микролегирования стали 30Х3МФ путем повышения износостойких свойств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Владимирев Н. Ф., Голубев А. Развитие технологии производства листовых корпусных сталей // Вопросы материаловедения. 1999. № 3 (20).
2. Орлов В. В., Малышевский В. А., Хлусова Е. А., Голосиенко С. А. Разработка технологии производства конструкционных сталей для морской техники и магистральных трубопроводов, предназначенных для эксплуатации в Арктике // Сталь. 2014. № 9. С. 79–88.
3. Issagulov A. Z., Ibatov M. K., Kvon S. S., Kulikov V. Y., Chsherbakova Y. P. Studying furnace refractory lining properties with copper matte smelting // Metalurgija (Zagreb, Croatia). 2020. Vol. 59. No 1. P. 93–96.
4. Isagulov A. Z., Kvon S. S., Kulikov V. Yu., Aubakirov D. R. Study of the structure and stress fields in a grinding ball casting // Черные металлы. 2020. № 5. С. 37–41.

5. Гольдштейн М. Н., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. Специальные стали. М.: Metallurgija, 1989.
6. Перельгин В. Hardox: разберемся спокойно // Основные средства. 2008. № 12. С. 18–21.
7. Duzcukohfu H. Effect of boron addition on Mechanical properties of 60SiCr7Steel 1 // Int. J.of Materials. Mechanic and Manufactory. 2015. Vol. 3. No 2.
8. Жучков В. И., Заякин О. В., Леонтьев Л. И. и др. Физико-химические характеристики, получение и применение бор-содержащих сплавов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2017. № 7. С. 348–354.
9. Степанов А. И., Бабенко А. А., Сычев А. В. и др. Оработка технологии микролегирования стали бором с использованием ферросиликобора // Metallurg. 2014. № 7. С. 50–52.
10. Лякишев Н. П., Плинер Ю. П., Лаппо С. И. Борсодержащие стали и сплавы. М.: Metallurgija, 1986. 383 с.
11. Ким А. С., Заякин О. В., Акбердин А. А. и др. Получение и применение новых комплексных борсодержащих ферросплавов // Электрометаллургия. 2009. № 12. С. 21–24.
12. Ковалев П. В., Рябошук С. В., Исагулов А. З. и др. Влияние внепечной обработки на металлургическое качество сталей, микролегированных ванадием и ниобием // Тр. ун-та. 2019. № 3 (76). С. 27–30.

## REFERENCES

1. Vladimirov N. F., Golubev A. Razvitie tehnologii proizvodstva listovnyh korpusnyh stalej [Development of the production technology of sheet shell steels]. *Voprosy materialovedeniya = Materials science issues*, 1999, no. 3(20).
2. Orlov V. V., Malyshevskij V. A., Hlusova E. A., Golosienko S. A. Razrabotka tehnologii proizvodstva konstrukcionnyh stalej dlja morskoy tehniky i magistral'nyh truboprovodov, prednaznachennyh dlja jekspluatatsii v Arktike [Development of technology for the production of structural steels for marine machinery and main pipelines intended for operation in the Arctic]. *Stal' = Steel*, 2014, no. 9, pp. 79–88.
3. Issagulov A. Z., Ibatov M. K., Kvon S. S., Kulikov V. Y., Chsherbakova Y. P. Studying furnace refractory lining properties with copper matte smelting. *Metallurgija = Metallurgy (Zagreb, Croatia)*, 2020, Vol. 59, no. 1, pp. 93–96.
4. Isagulov A. Z., Kvon S. S., Kulikov V. Yu., Aubakirov D. R. Study of the structure and stress fields in a grinding ball casting. *Chernye metally = Ferrous metals.*, 2020, no. 5, pp. 37–41.
5. Gol'dshtejn M. N., Grachev S. V., Veksler Ju. G. *Special'nye stali* [Special steels]. Moscow, Metallurgija Publ., 1989.
6. Perelygin V. Hardox: razberemsja spokojno [Hardox: let's figure it out calmly]. *Osnovnye sredstva = Fixed assets*, 2008, no. 12, pp. 18–21.
7. Duzcukohfu H. Effect of boron addition on Mechanical properties of 60SiCr7Steel 1. Int. J.of Materials. Mechanic and Manufactory, 2015, vol. 3, no. 2.
8. Zhuchkov V. I., Zajakin O. V., Leont'ev L. I. i dr. Fiziko-himicheskie harakteristiki, poluchenie i primenenie borsoderzhashhih splavov [Physicochemical characteristics, production and use of boron-containing alloys]. *Izvestija Vuzov. Chernaja metallurgija = Proceedings of Universities. Ferrous metallurgy*, 2017, no. 7, pp. 348–354.
9. Stepanov A. I., Babenko A. A., Sychev A. V. i dr. Otrabotka tehnologii mikrolegirovanija stali borom s ispol'zovaniem ferrosilikobora [Development of the technology of microlegging of steel with boron using ferrosilicobor]. *Metallurg = Metallurgist*, 2014, no. 7, pp. 50–52.
10. Ljakishev N. P., Pliner Ju. P., Lappo S. I. *Borsoderzhashhie stali i splavy* [Boron-containing steels and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1986, 383 p.
11. Kim A. S., Zajakin O. V., Akberdin A. A. i dr. Poluchenie i primenenie novyh kompleksnyh borsoderzhashhih ferrosplavov [Preparation and application of new complex boron-containing ferroalloys]. *Jelektrometallurgija = Electrometallurgy*, 2009, no. 12, pp. 21–24.
12. Koval'ov P. V., Rjaboshuk S. V., Isagulov A. Z., Ibatov M. K., Kvon S. S., Kulikov B. Ju., Shherbakova E. P. Vlijanie vnepechnoj obrabotki na metallurgicheskoe kachestvo stalej, mikrolegirovannyh vanadiem i niobiem [Impact of off-furnace treatment on metallurgical quality of vanadium and niobium microalloyed steels]. *Trudy Universiteta = University Proceedings*, 2019, no. 3(76), pp. 27–30.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-87-93>  
УДК 621.74

Поступила 25.02.2021  
Received 25.02.2021

## АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ГОРЯЧЕГО ЦИНКОВАНИЯ

*Н. И. УРБАНОВИЧ, К. Э. БАРАНОВСКИЙ, Е. В. РОЗЕНБЕРГ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.*

*E-mail: urbanovichbntu@tut.by, baranosky\_metolit@tut.by, erozenberg@bntu.by*

*В. А. АШУЙКО, В. Г. МАТЫС, Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13А*

*В. Ф. ВОЛОСЮК, ООО «Гальварекс», г. Кобрин, Беларусь*

*А. Ф. ПЕЧЕРСКИЙ, ООО «Речицкий метизный завод», г. Речица, Беларусь, ул. Фрунзе, 2*

*В статье представлены отходы, образующиеся в процессе производства горячего цинкования. Проведен анализ предлагаемых способов использования данных отходов при получении цинксодержащих покрытий. Показано, что гартцинк успешно можно использовать в составах насыщающих смесей при термодиффузионном цинковании стальных изделий и получать качественные покрытия. К недостаткам следует отнести необходимость размолва гартцинка.*

*Дисперсный отход производства горячего цинкования, который образуется в результате обдувки труб перегретым паром, можно использовать в качестве дешевого заменителя дорогого порошкового цинка в составах цинкнаполненных красок. Для красок используется фракция от 2–15 мкм, что составляет 27% от всего фракционного состава. Поэтому с целью использования более широкого диапазона значений фракционного состава дисперсных отходов для получения цинковых покрытий и обеспечения, таким образом, рециклинга цинка в промышленный оборот, авторами планируется проведение работ по оптимизации и разработке составов порошковых композиций и технологии термодиффузионного насыщения стальных изделий на базе цинксодержащих отходов.*

**Ключевые слова.** *Отход производства горячего цинкования, краска, термодиффузионное цинкование, цинксодержащее покрытие, рециклинг цинка.*

**Для цитирования.** *Урбанович, Н. И. Анализ способов получения цинксодержащих покрытий с применением отходов производства горячего цинкования / Н. И. Урбанович, К. Э. Барановский, Е. В. Розенберг, В. А. Ашуйко, В. Г. Матыс, В. Ф. Волосюк, А. Ф. Печерский // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 87-93. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-87-93>.*

## ANALYSIS OF METHODS FOR OBTAINING ZINC-CONTAINING COATINGS USING HOT-DIP GALVANIZING PRODUCTION WASTE

*N. I. URBANOVICH, K. E. BARANOVSKY, E. V. ROZENBERG,*

*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.*

*E-mail: urbanovichbntu@tut.by, baranosky\_metolit@tut.by, erozenberg@bntu.by*

*V. A. ASHUIKO, V. G. MATYS, Belarusian State Technological University. Minsk, Belarus, 13A, Sverdlova str.*

*V. F. VOLOSUYUK, OJSC "Galvarex", Kobrin, Belarus*

*A. F. PECHERSKIY, OJSC "Rechitsa Metizny Plant", Rechitsa, Belarus, 2, Frunze str.*

*The article presents the waste generated during the production of hot-dip galvanizing. The analysis of the proposed methods of using these wastes in the production of zinc-containing coatings is carried out. It is shown that hard zinc can be successfully used in the compositions of saturating mixtures during thermal diffusion galvanizing of steel products and obtain high-quality coatings. The disadvantages include the need for grinding hard zinc.*

*The dispersed waste of hot-dip galvanizing production, which is formed as a result of blowing pipes with superheated steam, can be used as a cheap substitute for expensive zinc powder in the compositions of zinc-filled paints. For paints, a fraction of 2–15 microns is used, which is 27% of the total fractional composition. Therefore, in order to use a wider range of values of the fractional composition of dispersed waste to obtain zinc coatings and thus ensure the recycling of zinc into industrial circulation, the authors of this article plan to optimize and develop the compositions of powder compositions and the technology of thermal diffusion saturation of steel products based on zinc-containing waste.*

**Keywords.** *Waste from the production of hot-dip galvanizing, paint, thermal diffusion galvanizing, zinc-containing coating, zinc recycling.*

**For citation.** *Urbanovich N. I., Baranovsky K. E., Rozenberg E. V., Ashuiko V. A., Matys V. G., Volosyuk V. F., Pecherskiy A. F. Analysis of methods for obtaining zinc-containing coatings using hot-dip galvanizing production waste. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 2, pp. 87-93. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-87-93>.*

Наиболее широко для коррозионной защиты стальных изделий применяются цинковые покрытия. Это обусловливается многообразием технологических способов цинкования, например, горячее, гальваническое, холодное, диффузионное. В то же время, согласно последним исследованиям, уже в ближайшие десятилетия возрастающий дефицит сырьевой базы многих основных металлов (в том числе и цинка) приведет к резкому повышению их стоимости. В результате чего наблюдается устойчивая тенденция повышения использования лома и отходов в общем объеме цветных металлов. Следует отметить, что существующие в настоящий момент технологии цинкования приводят к накоплению в больших количествах цинксодержащих отходов. Основными отходами производства горячего цинкования являются изгарь и гартцинк. Так, например, в Республике Беларусь существуют производства горячего цинкования, в частности, ОАО «Речицкий метизный завод», на котором, кроме изгари и гартцинка, образуется при цинковании труб и последующей их паровой обдувке еще и дисперсный цинксодержащий отход в виде порошка в количестве около 100 т в год. Изгари и гартцинка при этом образуется примерно 180 и 150 т в год соответственно.

Изгарь образуется на поверхности цинковой ванны в результате взаимодействия флюса с металлом и представляет собой полурасплавленную массу, которую периодически удаляют механическим способом. После остывания изгарь имеет вид рассыпчатого порошка, в состав которого, кроме цинка, входят оксид цинка и его соединения с хлором. Гартцинк представляет собой железоцинковый сплав, характеризующийся присутствием в нем сложных соединений железа с цинком  $Fe_nZn_m$ , в небольшом количестве оксида цинка (ZnO) и чистого цинка, доля которого составляет ориентировочно 15%. Внешний вид отходов производства горячего цинкования показан на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид отходов производства горячего цинкования: *a* – гартцинк; *б* – изгарь

Изгарь – это порошкообразный материал, а гартцинк – кускообразный в форме слитка.

Возможность и эффективность использования гартцинка в качестве заменителя цинка в составе порошковой композиции для термодиффузионного насыщения стальных изделий приведена в работах [1–3]. Показано, что применение гартцинка в насыщающих смесях позволило повысить качество термодиффузионного покрытия, в том числе его коррозионную стойкость, обусловленные особенностями строения фазового и химического состава цинкового покрытия. Полученные особенности при термодиффузионном цинковании изделий в насыщающей смеси на базе гартцинка авторы работ [1–3] объясняют присутствием железа (7–9%) в гартцинке. На рис. 2 показаны микроструктуры цинковых покрытий, полученных методом термодиффузионного насыщения в смесях на основе цинка и гартцинка.

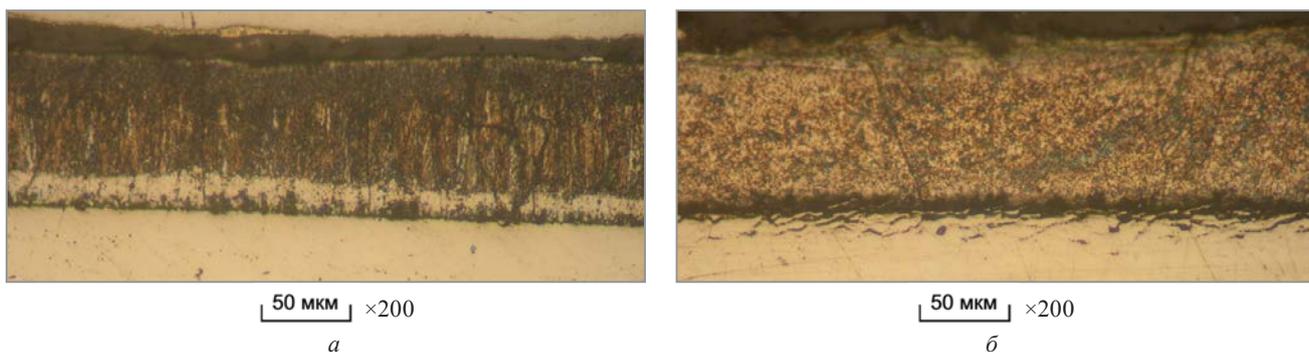


Рис. 2. Микроструктуры цинковых покрытий, полученных в насыщающих смесях: *a* – на основе порошкового цинка; *б* – на основе гартцинка

Из рисунка видно, что микроструктура покрытия, полученного в смеси на основе гартцинка, характеризуется мелкозернистой структурой, а на основе цинка – столбчатой. Наличие мелкозернистой структуры в покрытии оказало благоприятное воздействие на повышение качества покрытия.

В [1–3] отмечено также, что смеси на базе гартцинка можно использовать без наполнителя, так как температура плавления гартцинка по сравнению с чистым цинком выше, что позволяет увеличить эффективность регенерации смеси. Недостаток при использовании гартцинка в насыщающих смесях – его необходимость измельчения с целью получения нужной фракции 5–250 мкм.

Возможность использования дисперсного отхода производства горячего цинкования, который образуется в результате обдувки перегретым паром труб после осуществления горячего цинкования, в качестве дешевого заменителя дорогого порошкового цинка в цинкнаполненных красках приведена в [4–7].

Анализ результатов исследований гранулометрического и химического состава дисперсного отхода [4–7] показал, что он состоит из частиц в основном круглой формы размером от 3 до 200 мкм. Внешний вид, морфология и размер дисперсного отхода показаны на рис. 3.

На рис. 4 показана локализация точек исследования химического состава, а результаты химического состава приведены в табл. 1.

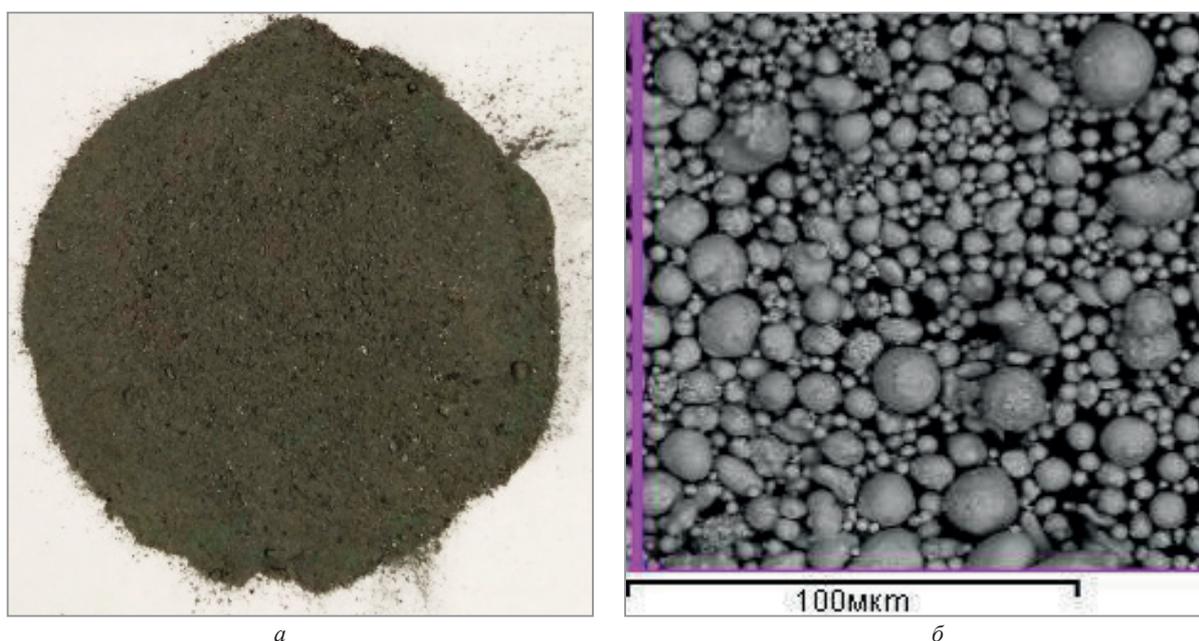


Рис. 3. Дисперсный отход производства горячего цинкования: а – внешний вид отхода; б – морфология и размер частиц отхода

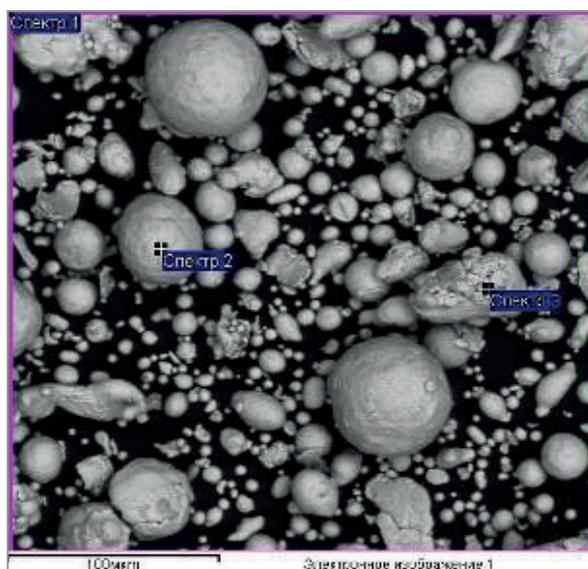


Рис. 4. Локализация точек исследования химического состава дисперсного отхода производства горячего цинкования

Таблица 1. Химический состав дисперсного отхода производства горячего цинкования

Спектр	Содержание элементов, мас. %				
	O	Al	Fe	Zn	Pb
1	8,03	-0,09	-0,12	91,45	0,37
2	7,81	0,01	0,07	90,51	1,03
3	0,42	0,01	0,09	99,41	0,09
Среднее значение	5,42	0,01	0,02	93,79	0,49

Из химического анализа отхода по площади и отдельным точкам видно, что содержание (по среднему значению) в нем таких элементов, как алюминий составляет 0,01 %, железо – 0,02, цинк – 94, свинец – 0,5, кислород в виде оксида цинка – остальное.

Так как для изготовления краски рекомендуется использовать цинковый порошок с размером частиц в диапазоне 2–15 мкм, был проведен рассев дисперсного отхода по фракциям, результаты которого приведены на рис. 5.

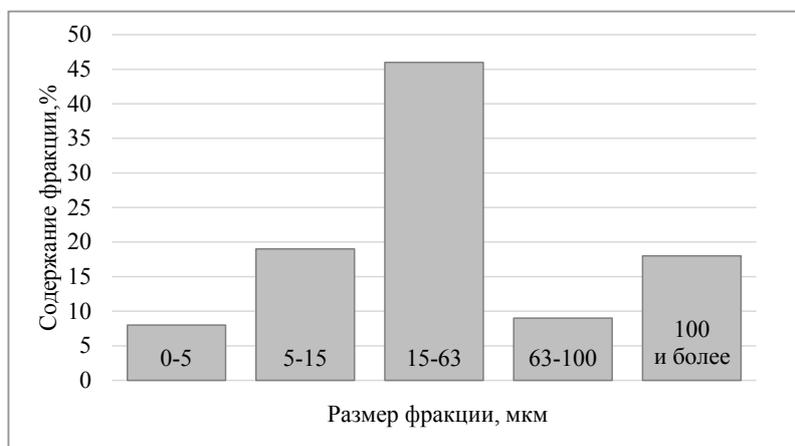


Рис. 5. Фракционный состав отхода горячего цинкования – цинковой пыли

Исследования фракционного состава дисперсного отхода производства горячего цинкования позволили установить, что он подразделяется на фракции в следующих количествах: 0–5 мкм – 8%; 5–15 мкм – 19%; 15–63 мкм – 46%; 63–100 мкм – 9%; 100 мкм – остальное. Из рисунка видно, что количество частиц размером  $\leq 15$  мкм составляет порядка 27% от его фракционного состава, которое можно рекомендовать для изготовления цинкнаполненных красок.

Согласно ISO 3549, содержание металлического цинка в пигменте из цинковой пыли должно быть не менее 94%, а общее содержание цинка – не менее 98%. Допускается также присутствие таких примесей, как свинец ( $\leq 0,2\%$ ); кадмий ( $\leq 0,1\%$ ); железо ( $\leq 0,05\%$ ); мышьяк ( $\leq 0,0005\%$ ); хлор ( $\leq 0,005\%$ ) и оксид цинка – остальное. Анализ состава дисперсного отхода производства горячего цинкования позволил установить, что по химическому составу он в основном соответствует требованиям ISO 3549.

Таким образом, анализ фракционного и химического состава показал, что размер фракции, представляющий интерес для использования в цинкнаполненных красках, составляет 27%, а по химическому составу она в основном соответствует требованиям ISO 3549.

В работе [8] приведены результаты сравнительных испытаний на физико-механические свойства красок, изготовленных на разных пленкообразователях, в которых наполнителем в одном случае служил стандартный цинковый порошок, в другом – дисперсный отход производства горячего цинкования. Составы цинкнаполненных композиций приведены в табл. 2.

Таблица 2. Составы цинкнаполненных композиций

Номер композиции (номер образца)	Пигмент, форма	Размер фракции, мкм	Пленкообразователь	Толщина покрытия, мкм
01	Порошок цинка марки Inst 800, круглая	3–5,15	Жидкое стекло калиевое	120–170
02	Порошок цинка марки Inst 800, круглая	3–5,15	Этилсиликат	120–170
03	Порошок цинка марки Inst 800, круглая	3–5,15	Акрил	90–120
11	Отход горячего цинкования, круглая	3–15	Жидкое стекло калиевое	100–130
12	Отход горячего цинкования, круглая	3–15	Этилсиликат	30–40
13	Отход горячего цинкования, круглая	3–15	Акрил	60–80

На рис. 6, 7 приведены результаты исследований в виде гистограмм, которые наглядно показывают, что по сравнению с цинксодержащими красками, где наполнителем служит стандартный цинковый порошок, взятый за эталон, краски, в качестве наполнителя которых использовали дисперсный отход горячего цинкования, практически не отличаются по значениям показателей физико-механических свойств покрытия. Данные свойства в большей степени зависят от типа и качества пленкообразователя, а лучшей адгезией и стойкостью обладают цинкнаполненные покрытия на акриловом связующем.

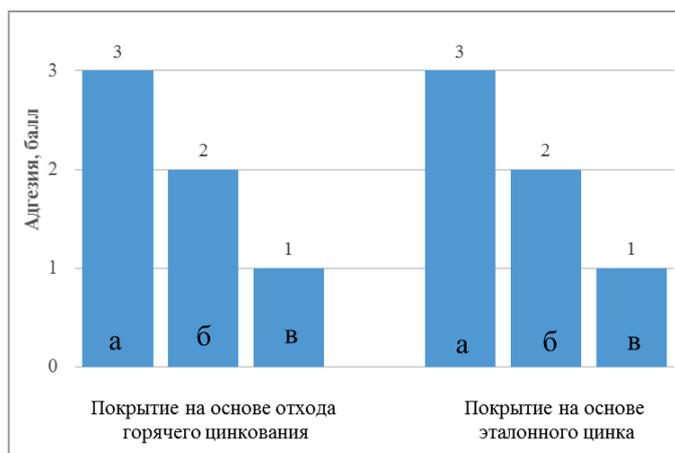


Рис. 6. Адгезия цинкнаполненного покрытия, установленная методом решетчатых надрезов: а – связующее – жидкое стекло; б – связующее – этилсиликат; в – акриловое связующее

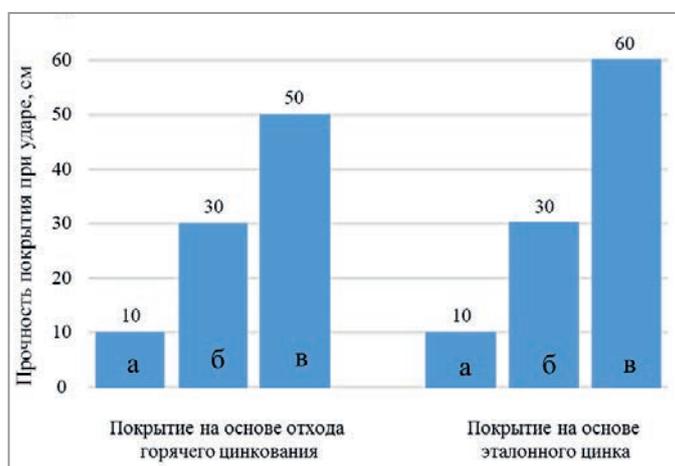


Рис. 7. Прочность цинкнаполненных покрытий: а – связующее – жидкое стекло; б – связующее – этилсиликат; в – акриловое связующее

Авторами данной статьи проведена оценка коррозионной стойкости покрытий, полученных на акриловом связующем, где наполнителем в одном случае являлся стандартный цинковый порошок (образец 1), в другом – дисперсный отход горячего цинкования (образец 2). Испытания осуществляли в камере соляного тумана по ГОСТ 9.908–85 и 9.407–2015. На рис. 8 показаны образцы до испытаний (а) и после испытаний (б) в камере соляного тумана в течение 500 ч.

Результаты исследований в камере соляного тумана показали, что покрытие, полученное на базе отхода горячего цинкования с размером частиц 2–15 мкм, обеспечивает в течение 500 ч практически такие же

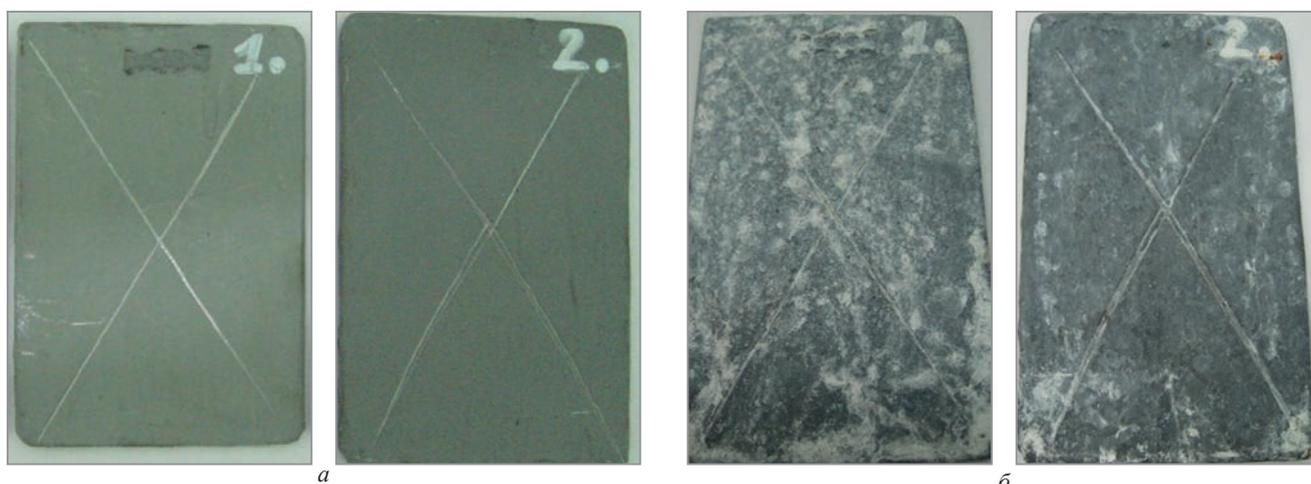


Рис. 8. Фотографии образцов: а – до испытаний; б – 500 ч в камере соляного тумана

защитные свойства, как и покрытие, полученное на базе стандартного цинкового порошка, что примерно соответствует 10 годам нахождения покрытий в атмосферных условиях. Таким образом, показана возможность использования дисперсного отхода производства горячего цинкования размером частиц 2–15 мкм в качестве дешевого заменителя стандартного порошкового цинка в цинксодержащих красках.

Так как для получения цинкнаполненных красок на базе дисперсного отхода производства горячего цинкования рекомендуется использовать размер частиц от 2–15 мкм, что составляет только 27% от общего фракционного состава отхода, возникает вопрос, куда девать остальные 73% дисперсного отхода. Поэтому становится актуальным предложение о необходимости расширения области применения цинксодержащих отходов, нахождении новых путей их использования и переработки. Одним из таких способов может являться использование отходов в насыщающих смесях при получении цинковых покрытий химико-термической обработкой, что позволит не только расширить диапазон значений использования фракционного состава дисперсного отхода производства горячего цинкования, но и снизить стоимость оцинкованных изделий и обеспечить рециклинг цинка в промышленный оборот. Планируется проведение работ по оптимизации и разработке составов порошковых композиций и технологии термодиффузионного насыщения стальных изделий на базе цинксодержащих отходов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Урбанович, Н.И.** Влияние содержания насыщающего компонента в системе гартцинк –  $Al_2O_3$  на толщину покрытия, изменение размеров и массы образцов при термодиффузионном цинковании / Н.И. Урбанович, О.С. Комаров, А.И. Лецко, В.И. Волосатиков // *Литье и металлургия*. 2011. № 2. С. 54–56.
2. **Горецкий, Г.П.** Оптимизация состава смеси, содержащей гартцинк для термодиффузионного цинкования / Г.П. Горецкий, Н.И. Урбанович, О.С. Комаров, Н.Г. Кухарева, С.Н. Петрович, В.И. Волосатиков // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: VI Междунар. науч.-техн. конф.* Минск: ФТИ НАН Беларуси, 14–16 сентября. 2011. С. 103–106.
3. Пат. № 15501 Республика Беларусь. Состав для диффузионного цинкования стальных изделий. МПК В23К 35/30, С23С 10/28/ Н.И. Урбанович, О.С. Комаров, А.М. Галушко, В.Ф. Станишевский, В.С. Куликов, А.И. Лецко // *Афіійны бюл. Нац. цэнтр. інтэлектуал. уласнасці*. – 2010. № 1.
4. **Урбанович, Н.И.** Оценка возможности использования отхода горячего цинкования-цинковой пыли для цинкнаполненных красок / Н.И. Урбанович, К.Э. Барановский, Е.В. Розенберг, В.А. Ашуйко, Т.И. Бендик // *Литье и металлургия*. 2019. № 3. С. 153–156
5. **Урбанович, Н.И.** Анализ коррозионных свойств цинксодержащих покрытий на базе дисперсного отхода горячего цинкования / Н.И. Урбанович, К.Э. Барановский, Е.В. Розенберг, Т.И. Бендик, В.А. Ашуйко, В.Г. Матыс, В.Ф. Волосюк, А.А. Карпенкин // *Литье и металлургия*. 2020. № 4. С. 106–112.
6. **Ашуйко, В.А.** Получение и исследование коррозионных свойств цинксодержащих красок на основе отходов производства горячеоцинкованной стали / В.А. Ашуйко, Н.И. Урбанович, К.Э. Барановский, Л.Н. Новикова, В.Г. Матыс // *Тр. БГТУ. Сер. 2. Химические технологии, биотехнология, геоэкология*. 2020. № 1(229). С. 152–159.
7. **Ашуйко, В.А.** Цинксодержащие краски на основе отходов горячего цинкования, определение их коррозионных свойств / В.А. Ашуйко, Л.Н. Новикова, К.Э. Барановский, Н.И. Урбанович // *Интеграция и развитие научно-технического и образовательного сотрудничества – взгляд будущего. II Междунар. науч.-техн. конф.* Минск: БГТУ, 11–12 декабря. 2019. Ч. 2. С. 7–10.
8. **Карпенкин, А.А.** Исследование вязкости составов цинксодержащих красок на основе дисперсного отхода горячего цинкования и физико-механических свойств покрытий / А.А. Карпенкин, В.В. Миношин, Д.В. Труханович, Е.В. Алексиевич // *Литье и металлургия* 2020. III Междунар. науч.-практ. интернет-конф. студентов и магистрантов. Минск: БНТУ, 18–19 ноября 2020. С. 116–118.

### REFERENCES

1. **Urbanovich N.I., Komarov O.S., Lecko A.I., Volosatikov V.I.** Vlijanie soderzhaniya nasyshhajushhego komponenta v sisteme gartcink –  $Al_2O_3$  na tolshhinu pokrytija, izmenenie razmerov i massy obrazcov pri termodiffuzionnom cinkovanii [Effect of the content of the saturating component in the hartzink –  $Al_2O_3$  system on the coating thickness, changes in the size and mass of samples during thermal diffusion galvanizing]. *Lit'e i metallurgija = Founry production and metallurgy*, 2011. no. 2, pp. 54–56.
2. **Goreckij G.P., Urbanovich N.I., Komarov O.S., Kuhareva N.G., Petrovich S.N., Volosatikov V.I.** Optimizacija sostava smesi, soderzhashhej gartcink dlja termodiffuzionnogo cinkovanija [Optimization of the composition of a mixture containing hartzink for thermodiffusion galvanizing]. *Sovremennye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov: VI Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. = Modern methods and technologies for creating and processing materials: VI International Scientific and Technical Conference*. Minsk, FTI NAN Belarusi, September 14–16, 2011, pp. 103–106.
3. **Urbanovich N.I., Komarov O.S., Galushko A.M., Stanishevskij V.F., Kulikov V.S., Lecko A.I.** Sostav dlja diffuzionnogo cinkovanija stal'nyh izdelij [Composition for diffusion galvanizing of steel products]. Patent Republic of Belarus, no. 15501, 2010.
4. **Urbanovich N.I., Baranovskij K. Je., Rozenberg E.V., Ashujko V.A., Bendik T.I.** Ocenka vozmozhnosti ispol'zovanija ot-hoda gorjachego cinkovanija-cinkovoj pyli dlja cinknapolnennyh krasok [Evaluation of the possibility of using hot-dip galvanizing-zinc dust for zinc-filled paints]. *Lit'e i metallurgija = Founry production and metallurgy*, 2019, no. 3, pp. 153–156.
5. **Urbanovich N.I., Baranovskij K. Je., Rozenberg E.V., Bendik T.I., Ashujko V.A., Matys V.G., Volosjuk V.F., Karpenkin A.A.** Analiz korrozionnyh svojstv cinksoderzhashhih pokrytij na baze dispersnogo othoda gorjachego cinkovanija [Analysis of the corrosion properties of zinc-containing coatings on the basis of dispersed hot-dip galvanizing waste]. *Lit'e i metallurgija = Founry production and metallurgy*, 2020, no. 4, pp. 106–112.

6. **Ashujko V.A., Urbanovich N.I., Baranovskij K. Je., Novikova L.N., Matys V.G.** Poluchenie i issledovanie korrozionnyh svojstv cinksoderzhashhijh krasok na osnove othodov proizvodstva gorjacheocinkovannoj stali [Preparation and study of corrosion properties of zinc-containing paints based on waste products of hot-dip galvanized steel production]. *Trudy BGTU. Serija 2. Himicheskie tehnologii, biotehnologija, geojekologija = Proceedings of BGTU. Series 2. Chemical technologies, biotechnology, geoecology*, 2020, no. 1(229), pp. 152–159.

7. **Ashujko V.A., Novikova L.N., Baranovskij K. Je., Urbanovich N.I.** Cinksoderzhashhie kraski na osnove othodov gorjacheogo cinkovaniija, opredelenie ih korrozionnyh svojstv [Zinc-containing paints based on hot-dip galvanizing waste, determination of their corrosion properties]. *Integracija i razvitie nauchno-tehnicheskogo i obrazovatel'nogo sotrudnichestva – vzgljad budushhego: II Mezh-dunar. nauch.-tehn. konf. = Integration and development of scientific, technical and educational cooperation – a view of the future: II International Scientific and Technical conf.* Minsk, BGTU Publ., 2019, part 2, pp. 7–10.

8. **Karpenkin A.A., Minoshin V.V., Truhanovich D.V., Aleksievich E.V.** Issledovanie vjazkosti sostavov cinksodrzhashhijh krasok na osnove dispersnogo othoda gorjachego cinkovaniija i fiziko-mehaničeskijh svojstv pokrytij [Research of the viscosity of zinc-containing paint compositions based on dispersed hot-dip galvanizing waste and physical and mechanical properties of coatings]. *Lit'e i metallurgija 2020. III Mezh-dunar. nauch.-prakt. internet konf. studentov i magistrantov = Foundry production and metallurgy 2020. III International Scientific and practical Web Conference of Student and Graduate Students.* Minsk, BNTU, November 18–19, 2020, pp. 116–118.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-94-99>  
УДК 621.7

Поступила 14.04.2021  
Received 14.04.2021

## АКТИВАЦИЯ ДИФФУЗИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ БОРИДНЫХ СЛОЕВ

С. М. УШЕРЕНКО, В. Г. ДАШКЕВИЧ, Ю. С. УШЕРЕНКО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: vladimir\_dvl@tut.by

*Исследованы особенности структурообразования диффузионных слоев, полученных по технологии, включающей предварительную обработку поверхности стальных изделий и последующее термодиффузионное борирование в порошковых средах. Предварительная обработка заключалась в активации поверхности способом сверхглубокого проникновения порошковой композицией на основе SiC стальных образцов из стали У8. Отмечены особенности зон активации, их распределение по поверхности. Проведен структурный анализ полученных диффузионных слоев для вариантов низкотемпературного (650 °С) и высокотемпературного (920 °С) борирования. Проанализированы химический состав слоя и распределение основных элементов в нем. В обоих случаях отмечено изменение морфологии, заключающееся в формировании более компактного диффузионного слоя и округлении боридных игол в зоне, примыкающей к основному металлу. Установлены увеличение толщины слоя на 20–50% и доли высокобористой фазы FeB относительно варианта борирования без предварительной активации.*

**Ключевые слова.** Борирование, активация, модификация диффузионного слоя, бориды железа.

**Для цитирования.** Ушеренко, С. М. Активация диффузии при формировании на поверхности стальных деталей боридных слоев / С. М. Ушеренко, В. Г. Дашкевич, Ю. С. Ушеренко // *Литье и металлургия*. 2021. № 2. С. 94–99. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-94-99>.

## ACTIVATION OF DIFFUSION DURING THE FORMATION OF BORIDE LAYERS ON THE SURFACE OF STEEL PARTS

S. M. USHERENKO, V. G. DASHKEVICH, Yu. S. USHERENKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: vladimir\_dvl@tut.by

*The features of structure formation of diffusion layers obtained by the technology, including preliminary surface treatment of steel products and subsequent thermal diffusion boriding in powder media, have been investigated. Pretreatment consisted in surface activation by superdeep penetration with a powder composition based on SiC of steel samples made of У8 steel. The features of the activation zones and their distribution over the surface are noted. The features of the activation zones and their quantitative characteristics are noted. A structural analysis of the obtained diffusion layers for the variants of low-temperature (650 °C) and high-temperature (920 °C) boration has been carried out. The chemical composition of the layer and the distribution of the main elements in it are analyzed. In both cases, a change in morphology was noted, consisting in the formation of a more compact diffusion layer and rounding of boride needles in the zone adjacent to the base metal. An increase in the layer thickness by 20–50% and an increase in the proportion of the high-boron FeB phase relative to the variant of borating without preliminary activation were established.*

**Keywords.** Boriding, activation, modification of the diffusion layer, iron borides.

**For citation.** Usherenko S. M., Dashkevich V. G., Usherenko Yu. S. Activation of diffusion during the formation of boride layers on the surface of steel parts. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 94–99. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-94-99>.

### Введение

В современных условиях, когда вариантов выбора всевозможных высокотвердых покрытий и слоев на углеродистых сталях огромное количество, боридные слои, полученные химико-термической обработкой (ХТО), имеющие чрезвычайно высокую твердость (до 22 000 МПа) и износостойкость, по-прежнему актуальны как среди исследователей, так и производителей. Ученые и инженеры разных стран мира применяют различные способы борирования для защиты стальных изделий от механического и коррозионно-механического изнашивания [1–4].

С точки зрения повышения комплекса физико-механических характеристик уже существующих диффузионных слоев перспективным является предварительная обработка поверхности перед насыщением.

Известно, что активация сталей, происходящая под воздействием высокоэнергетического потока порошковых частиц в режиме сверхглубокого проникновения, приводит к значительным объемным изменениям структуры обработанного материала [5, 6]. Представляется важным исследование возможности совмещения такой активации и последующей ХТО, в частности борирования. Отметим, что воздействие предварительной активации на последующую диффузию при химико-термической обработке может оказаться возможным только в случае, когда структурные дефекты, возникающие в результате воздействия высокоэнергетического потока, частично или полностью сохраняют устойчивость в диапазоне условий термического воздействия при ХТО.

В настоящей работе рассматривается процесс предварительной активации сверхглубоким проникновением порошковых частиц в стальную матрицу и последующее термодиффузионное низкотемпературное и высокотемпературное борирование в порошковых средах. Сам способ борирования в порошковой насыщающей среде был выбран из-за своей универсальности, удобства обработки малых партий деталей и варьирования состава среды, что позволяет существенно изменять условия насыщения. Борирование в таких смесях проводится при печном нагреве в герметичном контейнере с плавким затвором.

В качестве модельного материала была использована углеродистая инструментальная сталь. Углеродистые инструментальные стали марок У7, У8 и др., упрочненные борированием, представляют интерес для изготовления, например, деталей золотниковой группы гидрораспределителей, различных накатных роликов, пил и т. д. Однако повышенный фактор хрупкости диффузионных слоев, низкая кинетика роста слоя сдерживают широкое применение стали с рассматриваемым упрочнением [2].

### Материалы и методика исследований

Для исследования использована углеродистая инструментальная сталь У8 (ГОСТ 1435) в равновесном состоянии, со структурой перлита пластинчатого.

Предварительная активация образцов из стали У8 была выполнена в режиме сверхглубокого проникновения (СПП). Динамическую обработку в режиме СПП [7] проводили с помощью пушечного ускорителя в следующих условиях: скорость частиц – 300–1000 м/с, время воздействия – 100 мкс, материал ударников: 50% – порошок SiC (99% SiC, гранулометрический состав 63–70 мкм), 35% – порошок алюминия ПА-4 (98% Al, гранулометрический состав 15–100 мкм); 15% – порошок ПГ10Н01 (С – 0,6–1,0%; Cr – 14–20; Ni – основа; Si – 4,0–4,5; Fe – 3,0–7,0; В – 2,8–4,5; гранулометрический состав 40–100 мкм).

Диффузионное насыщение проводили в порошковой среде в объеме контейнера, герметизируемого плавким затвором. Контроль температуры осуществляли при помощи потенциометра ПСР-01, градуировка ХА. В качестве насыщающей среды использовали порошковую смесь «Besto-bor» – синтезированная порошковая среда для борирования, обладающая высокой насыщающей способностью, разработанная сотрудниками научно-исследовательской лаборатории упрочнения стальных изделий филиала БНТУ «НИПИ». В состав смеси в качестве основного компонента входил оксид бора, восстановитель – порошок алюминия. Восстановленную смесь размалывали, просеивали, обеспечивая требуемый гранулометрический состав (0,3–0,5 мм), и для дальнейшего использования при термодиффузионном насыщении добавляли активатор AlF<sub>3</sub>. Режимы борирования: высокотемпературное борирование – 4 ч при 900–920 °С, низкотемпературное – 4 ч при 640–650 °С.

Исследование морфологии поверхности и элементного состава проводили на аттестованном сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira 3» фирмы «Tescan» (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором фирмы «Oxford Instruments Analytical» (Великобритания). Погрешность метода и представленных данных составляет 3–5 отн. %. Микрорентгеноспектральный анализ образцов выполняли как по линии (концентрационные кривые распределения элементов), так и по площади (карты характеристического рентгеновского излучения).

### Результаты и обсуждение

В результате процесса активации формируются каналные зоны, которые являются ничем иным как дефектом кристаллической структуры, способным интенсифицировать диффузию по телу зерна, т.е. развить объемную диффузию.

В нашем случае в порошковой композиции присутствовало небольшое количество порошка никелевого сплава, он выступал в качестве маркера, характеризующего распределение активированных зон по поверхности образца (рис. 1). На микроструктуре вокруг каналов от этого порошкового компонента формировалась зона пониженной травимости размером около 5–10 мкм, поскольку никель

изменяет коррозионную стойкость образующихся участков микрошлифа. В результате, косвенно, по маркеру можно сделать вывод, что распределение активированной зоны у полученных образцов достаточно равномерное.

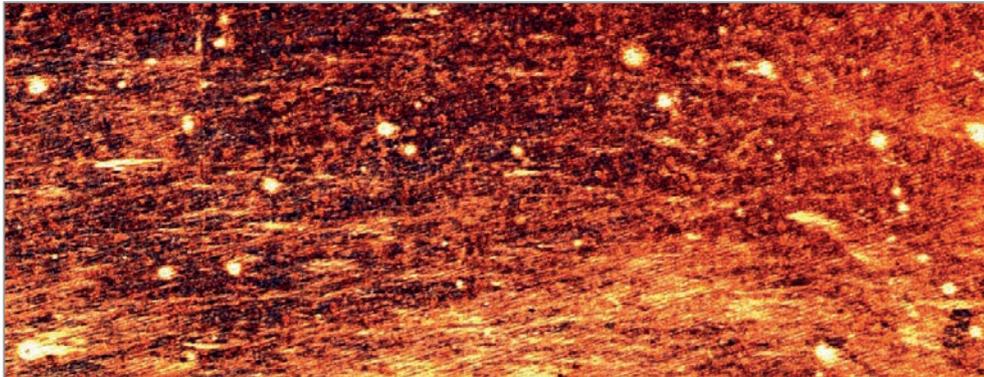


Рис. 1. Микроструктура активированной матрицы из стали У8.  $\times 200$

Известно, что при борировании реализуется, прежде всего, зернограничная диффузия, т.е. бор выступает как гомофильный элемент, поэтому появление в структуре дефектов, интенсифицирующих объемную диффузию, будет способствовать увеличению кинетики роста слоя. В общем случае структура традиционного слоя при борировании иглоподобная, состоящая из зон низкобористой ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) и высокобористой ( $\text{FeB}$ ) фаз. Характерным является присутствие пористости, как правило, на межфазной границе, что способствует описанной ранее высокой хрупкости и низкой адгезии. Природа этой пористости – вакансионный механизм диффузии и затруднительная встречная диффузия железа [2]. Для исследуемого процесса низкотемпературного борирования иглоподобность слоя практически отсутствует, однако присутствует пористость (рис. 2).

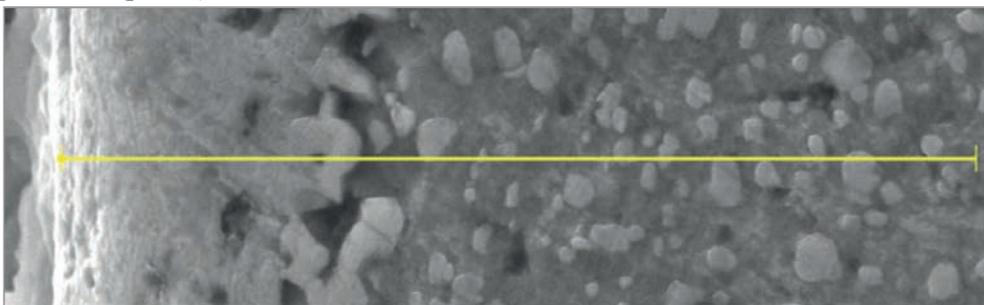


Рис. 2. Структура поверхностного слоя стали У8 после низкотемпературного борирования без предварительной активации

Исследование структуры образцов после низкотемпературного борирования показало появление в поверхностных слоях предварительно активированных слоев внедренных элементов материалов ударников – Al, Si, но не было продемонстрировано значительное изменение концентрации бора по сравнению с образцом без предварительной активации (рис. 3). Также следует обратить внимание на снижение пористости диффузионного слоя и переходной зоны. Вероятнее всего, сформированные каналные зоны в результате процесса активации способствуют интенсификации диффузии, что приводит к формированию более компактного слоя. Сами зоны активации после СГП порошковой композицией частично сохраняются, поскольку температура борирования только приближается к температуре рекристаллизации.

Исследование структуры образцов после высокотемпературного борирования также позволило выявить появление в поверхностных слоях предварительно активированных элементов материала ударников – Al, Si (рис. 4, 5) и продемонстрировало увеличение концентрации бора в поверхностных слоях по сравнению с образцом без предварительной активации (рис. 5).

В результате того, что температура насыщения более высокая, образуется большая толщина слоя, соответственно более развитая структура слоя, поэтому зафиксированы более подробно ее изменения. В частности, изменилась морфология слоя, иглоподобность практически исчезла (рис. 6, б, в), изменилось соотношение высоко- и низкобористой фаз, что видно на микроструктуре (рис. 6, а): более темный участок от поверхности микрошлифа – высокобористая фаза  $\text{FeB}$ , а светлый участок ниже – низкобористая фаза  $\text{Fe}_2\text{B}$ .

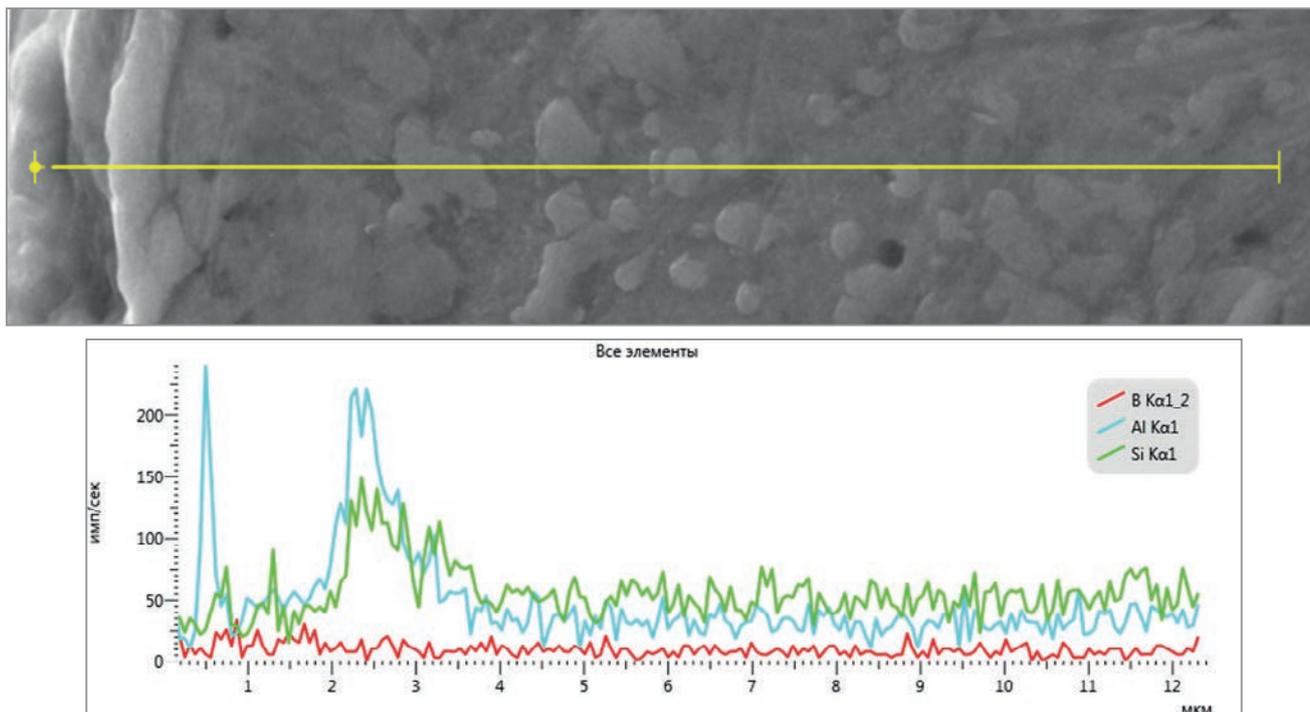


Рис. 3. Структура и анализ состава поверхностного слоя стали У8 после низкотемпературного борирования с предварительной активацией в режиме СГП

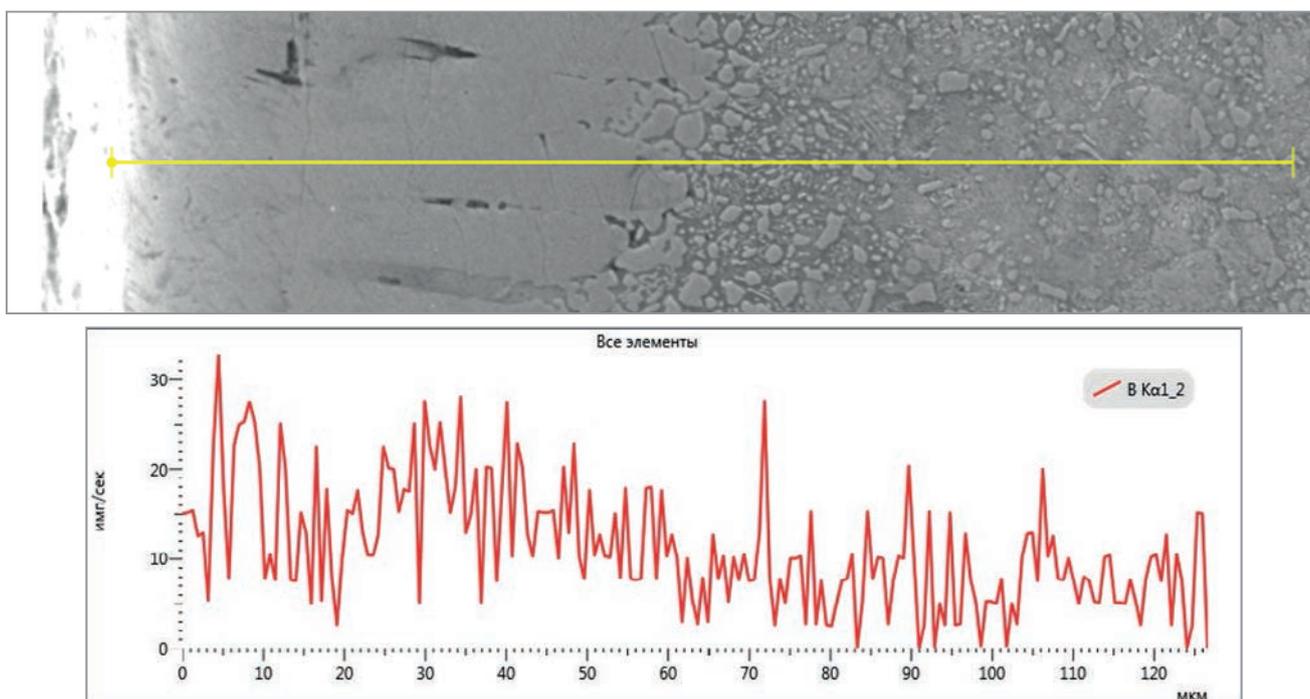


Рис. 4. Структура и анализ состава поверхностного слоя стали У8 после высокотемпературного борирования без предварительной активации

Если при традиционной обработке соотношение высоко- и низкособористой фаз составляет, как правило, 30 и 70% соответственно, то после активации и последующего борирования соотношение выравнивается и становится близким к 50:50. Микродюрометрический анализ, проведенный на исследуемых образцах, такой вывод полностью подтверждает (рис. 7).

Важным результатом активации является увеличение толщины слоя относительно образцов без предварительной обработки СГП и происходящее легирование боридов. Установлен прирост толщины диффузионного слоя, который после высокотемпературного борирования с предварительной активацией составил 20–50%.

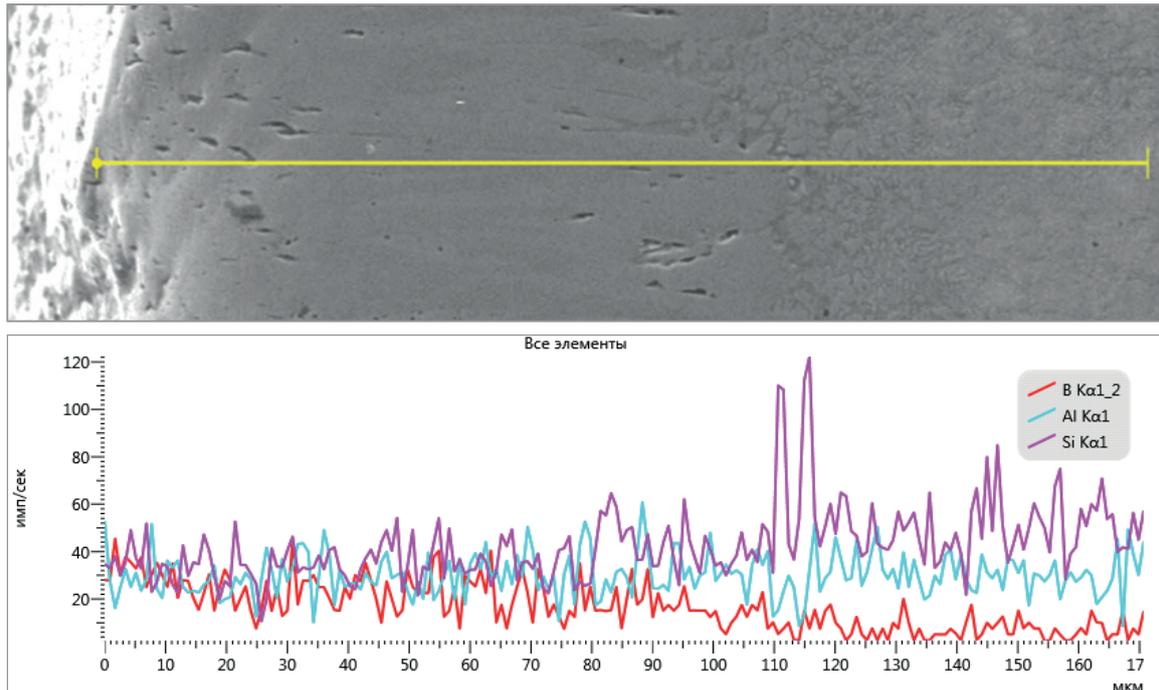


Рис. 5. Структура и анализ состава поверхностного слоя стали У8 после высокотемпературного борирования с предварительной активацией в режиме СГП

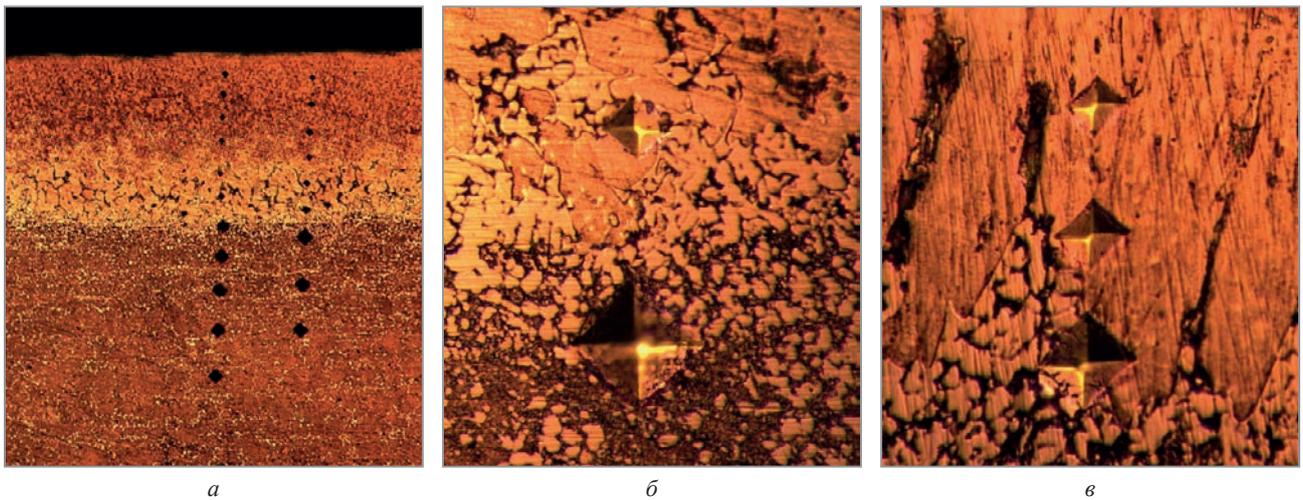


Рис. 6. Микроструктура образцов стали У8 после высокотемпературного борирования с предварительной активацией (а, б) и без предварительной активации (в). а –  $\times 100$ ; б, в –  $\times 1000$

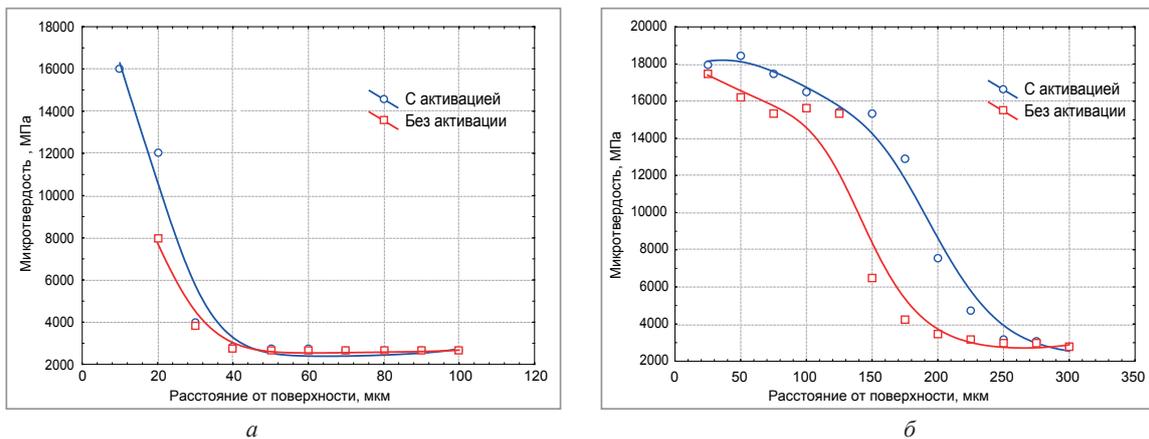


Рис. 7. Распределение микротвердости по толщине слоя после низкотемпературного борирования (а) и высокотемпературного борирования (б)

### Выводы

В результате выполненной работы исследованы особенности структурообразования диффузионных боридных слоев, которые были получены после активации поверхности. Активацию проводили при воздействии высокоэнергетического потока порошковых микрочастиц в режиме сверхглубокого проникновения, что привело к существенным объемным изменениям структуры обработанного материала.

Отмечено, что в обоих вариантах борирования (низкотемпературное и высокотемпературное) при проведении предварительной активации происходит изменение морфологии термодиффузионного слоя, что проявляется в снижении пористости, в частности в подборидном слое, и уменьшении традиционной для борирования иглоподобности структуры.

Установлено, что в результате предварительной обработки происходит увеличение толщины диффузионного слоя на 20–50%. Этот результат особенно ощутим для высокотемпературного борирования. Увеличивается доля высокобористой фазы FeB в слое, что свидетельствует об интенсификации стадий диффузии и реакций в металле.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Eric J. Mittemeijer.** Thermochemical surface engineering of steels / Eric J. Mittemeijer, Marcel A.J. Somers // Woodhead publishing series in metals and surface engineering: 2015. No 62. 792 p.
2. **Крукович, М. Г.** Пластичность борированных слоев / М. Г. Крукович, Б. А. Прусаков, И. Г. Сизов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 84 с.
3. **Kulka, M.** Current trends in boriding: Techniques: Springer Nature, Switzerland, 2019. 282 с.
4. **Ворошнин, Л. Г.** Борирование стали / Л. Г. Ворошнин, Л. С. Ляхович. М.: Металлургия, 1978. 240 с.
5. **Usherenko Yu.** Composite Materials for Steel Cutting and Concrete Crushing / Yu. Usherenko, S. Usherenko, J. Yazdani // Procedia Engineering. 2017. No 172. P. 1198–1203.
6. **Petrov E.V.** Study of the high-velocity impact of tungsten particles with a steel target / E.V. Petrov, V S. Trofimov, V.O. Kopytskiy // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2020. No 1431.

### REFERENCES

1. **Eric J. Mittemeijer, Marcel A.J. Somers.** Thermochemical surface engineering of steels. *Woodhead publishing series in metals and surface engineering*. 2015. No 62, Elsevier. 792 p.
2. **Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G.** *Plastichnost' borirovannyh sloev* [Plasticity of borated layers]. Moscow Publ., Fizmatlit, 2010, 384 p.
3. **Kulka M.** Current trends in boriding. Techniques: Springer Nature, Switzerland, 2019, 282 p.
4. **Voroshnin L.G., Lyakhovich L.S.** *Borirovanie stali* [Boring steel] Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 240 p.
5. **Usherenko Yu., Usherenko S., Yazdani J.** Composite Materials for Steel Cutting and Concrete Crushing. *Procedia Engineering*, 2017. No 172. P. 1198–1203.
6. **Petrov E.V., Trofimov V.S., Kopytskiy V.O.** Study of the high-velocity impact of tungsten particles with a steel target. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*, 2020. No 1431.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-100-104>  
УДК 621.78

Поступила 09.03.2021  
Received 09.03.2021

## ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ НЕСТАНДАРТНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Д. М. БЕРДИЕВ, А. А. ЮСУПОВ, Ташкентский государственный технический университет  
им. И. Каримова, г. Ташкент, Узбекистан, ул. Университетская, 2. E-mail: berdiyev\_mf@mail.ru

*Использование нестандартных режимов термической обработки увеличивает плотность дислокаций в кристаллическом строении  $\alpha$ -фазы и повышает износостойкость углеродистых, малолегированных сталей в различных условиях трения, что сопоставимо с результатами при нагреве до стандартной температуры ( $A_{c3} + 30-50$  °C). Определена предварительная экстремальная температура нагрева. После повторной закалки при стандартной температуре и низком отпуске износостойкость сталей при различных видах трения повышается до 40% по сравнению со стандартной закалкой.*

**Ключевые слова.** Износостойкость, термическая обработка, твердость, углеродистые и малолегированные стали, плотность дислокаций.

**Для цитирования.** Бердиев, Д. М. Повышение износостойкости стальных изделий методом нестандартных режимов термической обработки / Д. М. Бердиев, А. А. Юсупов // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 100–104. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-100-104>.

## IMPROVING THE WEAR RESISTANCE OF STEEL PRODUCTS BY USING NON-STANDARD HEAT TREATMENT MODES

D. M. BERDIEV, A. A. YUSUPOV, Tashkent State Technical University named after I. Karimov, Tashkent,  
Uzbekistan, 2, Universitetskaya str. E-mail: berdiyev\_mf@mail.ru.

*The use of non-standard modes of heat treatment increases the density of dislocations in the crystal structure of the  $\alpha$ -phase and increases the wear resistance of carbon, low-alloy steels under various friction conditions, which is comparable to the results when heated to a standard temperature ( $A_{c3} + 30-50$  °C). The preliminary extreme heating temperature is determined. After re-quenching at standard temperature and low tempering, the wear resistance of steels under various types of friction increases by up to 40% compared to standard quenching.*

**Keywords.** Wear resistance, heat treatment, hardness, carbon and low-alloy steels, dislocation density.

**For citation.** Berdiev D. M., Yusupov A. A. Improving the wear resistance of steel products by using non-standard heat treatment modes. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 2, pp.100–104. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-100-104>.

Стандартные режимы термической обработки (ТО) металлических изделий обеспечивают, как правило, достаточно высокие механические свойства, однако в ряде случаев этого недостаточно. В частности, это касается вязкости металла изделия [1], которая определяет его надежность.

Исследованиями установлено, что все нестандартные режимы ТО стали базируются на фундаментальных закономерностях фазовых превращений [2], суть которых заключается в том, что путем предварительной высокотемпературной ТО достигается высокий уровень дефектности кристаллического строения стали, что в зависимости от завершенности структурных превращений при повторном нагреве позволяет сильнее измельчить зерно [3]. При этом вязкость стали повышается при одновременном повышении прочности. При сохранении высокой плотности дислокаций (ПД) повышается износостойкость [4, 5].

В данной работе рассматривается механизм  $\alpha$ - $\gamma$ - $\alpha$ -превращений, а также отмечается, что при высоких температурах нагрева существует экстремальная температура, при которой в твердый раствор (аустенит) переходят атомы тугоплавких примесных фаз. В этом случае при охлаждении ( $\gamma$ - $\alpha$ -превращение) повышается ПД в  $\alpha$ -фазе. При повторной фазовой перекристаллизации часть этих дислокаций сохраняется. Подробный аналитический обзор работ [6, 7] в области высокотемпературной ТО с двойной фазовой перекристаллизацией показал, что она получила достаточное применение для повышения

износостойкости. Однако теоретических обоснований для реализации разных режимов нестандартных технологий оказалось недостаточно [7].

Цель данной работы – изучить особенности структурообразования стали при нестандартных режимах ТО, которые повышают износостойкость стальных изделий без существенных дополнительных затрат.

### Материалы и методика исследования

Исследовали образцы сталей 35, 45, 40X, 65Г и У8 [8]. В качестве эталонного материала использовали образцы армко-железа. Образцы для ТО испытывали при разных температурах: для каждой стали выбирали начальную температуру из расчета выше критической точки температуры нагрева  $A_{c3}$  (или  $A_{c1}$ ) + 30–50 °С, а затем при температурах около 900, 1000, 1100, 1150 и 1200 °С. Образцы охлаждали на воздухе, в воде или масле, а также вместе с печью при ее остывании. Таким образом, создавали термическую предысторию стали. Повторную фазовую перекристаллизацию всегда проводили с нагревом до точки  $A_{c3}$  (или  $A_{c1}$ ) + 30–50 °С для каждой стали.

Металлографический анализ проводили на микроскопе МИМ-8М [9], рентгеноструктурный – на установке ДРОН-2,0. Определяли состояние тонкой структуры стали (ПД), количество остаточного аустенита, период кристаллической решетки, количество углерода в фазах закаленной стали [10]. Испытания на износостойкость осуществляли при трении скольжения по закрепленному абразивному материалу на машине Х4-Б [11], по незакрепленному абразивному материалу – на машине ПВ-7 [12], при скольжении металл-по-металлу – на машине трения СМЦ-2, при трении качения с проскальзыванием – на машине трения МИ-1 [13]. Эти виды трения встречаются практически при движении всех деталей машин и инструментов.

Из работы [6] известно, что с повышением температуры нагрева наблюдается рост аустенитного зерна. Однако во всех случаях имеет место экстремальная температура нагрева (1100 °С), при которой после охлаждения можно зафиксировать максимальную ПД. Изменяется ПД при повышении температуры отпуска. При отпуске выше 200 °С наблюдается общее резкое снижение ПД, но при закалке с экстремальной температурой 1100 °С это снижение намного меньше [7]. Чем выше температура отпуска после закалки стали (от 200 до 600 °С), тем больше разность ПД в образцах, закаленных при экстремальной и принятой для данной стали температурах. Следовательно, дислокации после закалки при экстремальной температуре термически более устойчивы.

Плотность дислокаций в кристаллической структуре стали увеличивается при ТО с предварительным нагревом до экстремальных температур. При такой нормализации ПД конструкционных сталей увеличивается в 1,5–2,5 раза (стали 40X от 150 до 258%). Однако по абсолютному значению ( $\rho$ ,  $10^9$  см<sup>-2</sup>) это на два порядка меньше, чем после закалки [7]. В закаленном состоянии ( $\rho$ ,  $10^{14}$  см<sup>-2</sup>) эта разница достигает от 28 до 50–60%. Однако с ростом аустенитного зерна снижаются пластичность и вязкость стали. Вместе с тем, после нормализации всегда следует упрочняющая закалка с отпуском. При повторной фазовой перекристаллизации при нагреве под закалку температура составляла  $A_{c3}$  (или  $A_{c1}$ ) + 30–50 °С.

Исследовали ранее не изученные закономерности:

- соответствует ли увеличение ПД в кристаллическом строении сталей при их ТО с экстремальными температурами нагрева повышению износостойкости сталей;
- какова эффективность режимов ТО с экстремальными температурами при разных видах трения: скольжении по закрепленному и незакрепленному абразивному материалу, металл-по-металлу и качению с проскальзыванием.

Результаты исследования приведены в таблице.

Трение скольжения по закрепленному абразивному материалу – самый жесткий способ испытания [10]. Испытывали образцы сталей с очень малым содержанием остаточного аустенита. Предварительно нормализованные при разных температурах нагрева образцы повторно нагревали до одной температуры  $A_{c3}$  (или  $A_{c1}$ ) + 30–50 °С, проводили закалку и низкий отпуск. Установили, что при предварительной нормализации с температурой 1150 °С сравнительное повышение ПД составило от 20 до 39%, а износ уменьшился на 10–15%.

Трение скольжения по незакрепленному абразивному материалу – трение, присущее работе всех почвообрабатывающих сельскохозяйственных машин [12]. Образцы сталей предварительно нормализовали выше температуры нагрева  $A_{c3}$  (или  $A_{c1}$ ) + 30–50 °С, а далее стали нагревали до 900 и 1200 °С. Время нагрева 20 мин. Повторный нагрев образцов всех сталей – до температуры  $A_{c3}$  (или  $A_{c1}$ ) + 30–50 °С вне зависимости от температуры предварительной нормализации, далее закалка и отпуск.

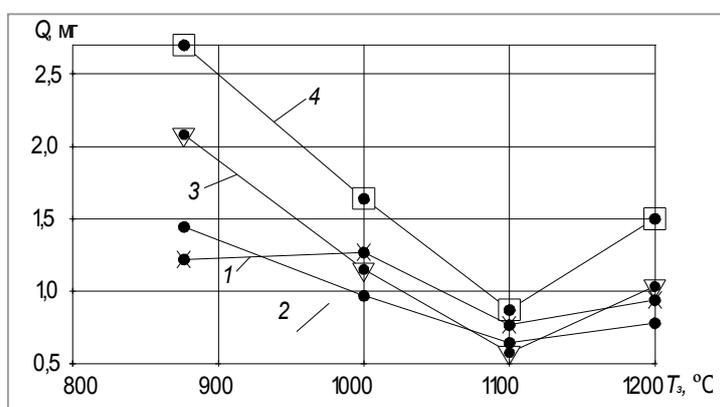
## Влияние температуры нагрева предварительно нестандартных ТО на плотность дислокаций и величину износа сталей

Марка стали	Предварительная температура нагрева при нестандартной ТО, °С	Плотность дислокаций, $\rho \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$	Температура нагрева стандартной ТО, °С	Плотность дислокаций, $\rho \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$	Относительная износостойкость, $Q_{\text{ннн}}/Q_{\text{ст}}$
Предварительная нормализация, после повторной закалки с температуры $A_{c_3}$ (или $A_{c_1}$ ) + 30–50 °С и отпуска 200 °С					
35	1150	1,61	870	1,12	0,84
45	1150	1,97	850	1,45	0,78
40X	1150	2,28	870	1,89	0,72
65Г	1150	3,7	830	1,9	0,7
У8	1150	3,2	800	2,21	0,6
Прямая закалка с различных температур нагрева и отпуска 200 °С					
35	1100	1,81	870	1,21	0,77
45	1100	2,9	860	1,89	0,65
40X	1100	3,2	870	2,1	0,65
65Г	1100	3,8	830	1,98	0,62
У8	1100	4,0	800	2,6	0,6

Уменьшение износа при предварительной нормализации с экстремальной температурой нагрева (1150 и 1100 °С) по сравнению с температурой первого нагрева оказалось значимым. В зависимости от температуры отпуска износ уменьшился для стали 35 на 14–20%, для стали 45 – на 19–25, для стали 65Г – на 20–30, для стали У8 – на 20–32%.

При трении скольжения металл-по-металлу исследовали прямую закалку после нагрева стали с разными температурами. Прямую закалку используют, если величина аустенитного зерна не имеет большого значения или при быстром нагреве.

Испытания при трении скольжения роликов из стали 40X по буксе из серого чугуна со смазыванием выявили уменьшение на 30–48% износа  $Q$  после закалки с экстремальной температурой  $T_z = 1100$  °С по сравнению с закалкой при обычной температуре ( $A_{c_3} + 30–50$  °С) (см. рисунок).



Зависимость износа  $Q$  стали 40X при трении со смазыванием от температуры  $T_z$  закалки при температуре отпуска  $T_o = 200$  °С (1), 350 (2), 450 (3) и 600 °С (4)

Испытания образцов (роликов) из сталей 45, 40X и У8 без смазывания при их трении по закаленной буксе показали уменьшение износа после закалки с экстремальной температурой нагрева (при одинаковой твердости) для стали 45 на 31–42%, для стали 40X – на 40–43%, для стали У8 – на 32–40%.

Образцы стали 40X были предварительно нормализованы с разными температурами нагрева. Все образцы повторно нагревали при 870 °С, закалку проводили в масле, отпуск при температуре от 200 до 600 °С.

Результаты испытаний при трении скольжения со смазыванием и без смазывания полностью соответствовали закономерностям изменения тонкой структуры, приведенным в работе [7]. Уменьшение износа образцов, термически обработанных по экстремальным режимам, составило 37–45% при трении скольжения со смазыванием, 29–31% – без смазывания.

При трении качения с проскальзыванием заготовки образцов прямой закалки для исследования их изнашивания нагревали выше температуры  $A_{c_3}$  (или  $A_{c_1}$ ) + 30–50 °С до 1200 °С при выдержке

соответственно 20–30 мин и 2 ч. После механической обработки отпуск одной части образцов осуществляли при 200 °С, а второй – при 600 °С. Испытания показали, что после закалки с экстремальными температурами (1100 °С при выдержке 20 мин и 1000 °С при выдержке 2 ч) и отпуска при 200 °С наблюдалось уменьшение износа соответственно на 32–39 и 13–16%. После отпуска при 600 °С износ увеличился с ростом аустенитного зерна.

При разработке режимов ТО с двойной фазовой перекристаллизацией приходится учитывать время нагрева для предварительных закалки и нормализации в зависимости от размеров детали. Если предварительная ТО включает в себя закалку с разных температур и промежуточный отпуск при 450 °С, то после повторной закалки при обычно принимаемой температуре нагрева (870 °С для стали 40X) минимальный износ наблюдается при температуре первой закалки 1200 °С. Износ уменьшился на 43%.

Если предварительная ТО включает в себя нормализацию с разных температур нагрева, то после повторного нагрева до обычно принятых температур (850 °С для стали 45 и 870 °С для стали 40X) и последующей закалки с отпуском уменьшение износа также наблюдается при температуре предварительной нормализации 1200 °С. Износ стали 45 уменьшился на 27%, а стали 40X – на 45%. При увеличении времени повторного нагрева уменьшение износа составляет до 15%.

Для повышения износостойкости деталей машин и инструментов используют легированные стали и сплавы, эффективность которых проверяется специальными испытаниями на износ. В качестве эталона выбирается какая-либо сталь, износ образца которой принимается за единицу.

Целью исследований авторов было определение эффективности применения нестандартных технологий ТО. В качестве эталона использовали образец той же стали, термически обработанной по принятым режимам. Как правило, в обоих случаях использовали образцы одинаковой твердости. Даже при таких условиях эффективность нестандартных режимов ТО оказалась значительной. При трении скольжения по закрепленному абразивному материалу (абразивной шкурке) реализуется очень жесткий способ испытания.

Образцы сталей 45, 65Г и У8 проходили предварительную нормализацию при экстремальной температуре нагрева. После повторной фазовой перекристаллизации с температурой  $A_{c3}$  (или  $A_{c1}$ ) + 30–50 °С, закалки и низкого отпуска износ уменьшался соответственно на 16, 15 и 15%.

При трении скольжения по незакрепленному абразивному материалу (кварц пылевидный) для сталей 45, 65Г и У8 износ уменьшился соответственно на 32, 40 и 45%.

При трении скольжения металл-по-металлу после нестандартных режимов ТО износ уменьшился от 30 до 50%; при трении качения с проскальзыванием – в пределах 30–40%.

### Выводы

1. При нагреве стали до высоких температур наблюдаются экстремальные температуры, когда после охлаждения формируются структуры с повышенным уровнем (после нормализации) плотности дислокаций или с ее высоким уровнем (после закалки).

2. Предварительная нормализация при экстремальных температурах (1150 °С) и после повторной закалки с температуры  $A_{c3}$  (или  $A_{c1}$ ) + 30–50 °С, низкого отпуска повышает износостойкость при разных видах трения сталей на 25–30%.

3. Прямая закалка с экстремальных температур нагрева (1100 °С) и после низкотемпературного отпуска повышает износостойкость сталей при разных видах трения на 30–40%.

4. Применение нестандартных режимов ТО для упрочнения деталей машин и инструментов, а, следовательно, для повышения их износостойкости позволяет исключить использование высоколегированных сталей, снизить расходы на материалы и будет способствовать локализации производства.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гребенков С.К., Шацев А.А., Ряпосов И.В. Деформационное упрочнение низкоуглеродистых мартенситных сталей с выраженной структурной наследственностью // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2013. № 11. С. 34–36.
2. Sadovski V.D. Correction of the Course – Grained Structure During Thermal Treatment of Steel // *Heat Treatment and technology of surface coatings. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Congress on Heat treatment of Materials*. 1990. Vol. 1. December 11–14. P. 10–14.
3. Dyuchenko S.S. Heredity in phase transformation: mechanism of the phenomenon and effect on the properties // *Metall Science and heat treatment*. 2000. Vol. 42. No. 3–4. P. 122–126.
4. Sagardze V.V., Zuev Yu.N., Bondarchuk S.V. Structural heredity in the U – 6 Nb Alloy and Conditions for its Elimination // *The Physics of Materials and Metallography*. 2013. Vol. 114. No. 4. P. 299–307.

5. **Yugai S.S., Kleiner L.M., Shatsov A.A. and N.N. Mitrokhovich.** Structural heredity in low-carbon martensitic steels // *Metall Sciens and teat treatment*. 2004. Vol. 46. No. 11–12. P. 539–542.
6. **Бердиев Д.М., Тошматов Р.К.** Особенности фазовых и структурных превращений конструкционных сталей при нетрадиционных режимах термической обработки // *Вестник машиностроения*. 2020. № 10. С. 63–65.
7. **Berdiev D.M., Toshmatov R.K.** Phase and Structural Transformations of Structural Steels in Nontraditional Heat Treatment // *Russian Engineering Research*. 2021. Vol. 41. No. 1, P. 46–48.
8. **Шишков М.М.** Марочник сталей и сплавов: Справ. Изд. 3-е дополненное. Донецк: Юго-Восток, 2002. 456 с.
9. **Батаев В.А., Батаев А.А., Алхимов А.П.** Методы структурного анализа материалов и контроля качества деталей. М.: Наука, 2007. 224 с.
10. **Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н.** Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСИС, 1994. 328 с.
11. Машина Х4-Б испытательная установка для исследования изнашивания материалов закрепленным абразивом. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев: Наукова думка, 1979. 185 с.
12. **Тененбаум М.М.** Закономерности абразивного изнашивания деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Трение и износ*. 1980. Т. 1. № 2. С. 357–364.
13. **Гаркунов Д.Н.** Триботехника. М.: Изд-во МСХА, 2005. 356 с.

### REFERENCES

1. **Grebenkov S.K., Shatsev A.A., Ryaposov I.V.** Deformatsionnoe uprochnenie nizkouglerodistnykh martensitnykh staley s vnyrajenoj strukturnoy nasledstvennostyu [Strain hardening of low-carbon martensite steels with pronounced structural heredity]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Meteorology and heat treatment of metals*, 2013, no 11, pp. 34–36.
2. **Sadovski V.D.** Correction of the Course – Grained Structure During Thermal Treatment of Steel. Heat Treatment and technology of surface coatings. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Congress on Heat treatment of Materials, 1990, Vol. 1, December 11–14, pp. 10–14.
3. **Dyuchenko S.S.** Heredity in phase transformation: mechanism of the phenomenon and effect on the properties. *Metall Science and heat treatment*, 2000, vol. 4, no. 3–4, pp. 122–126.
4. **Sagaradze V.V., Zuev Yu.N., Bondarchuk S.V.** Structural heredity in the U – 6 Nb Alloy and Conditions for its Elimination. *The Physics of Materials and Metallography*, 2013, no. 4, pp. 299–307.
5. **Yugai S.S., Kleiner L.M., Shatsov A.A. and N.N. Mitrokhovich.** Structural heredity in low-carbon martensitic steels. *Metall Sciens and teat treatment*, 2004, vol. 46, no. 11–12, pp. 539–542.
6. **Berdiev D.M., Toshmatov R.K.** Osobennosti fazovykh i strukturnykh prevrasheniy konstruksionnykh staley pri netraditsionnykh rejimakh termicheskoy obrabotki [Features of phase and structural transformations of structural steels under unconventional modes of heat treatment]. *Vestnik mashinostroeniya = Bulletin of Mechanical Engineering*, 2020, no. 10, pp. 63–65.
7. **Berdiev D.M., Toshmatov R.K.** Phase and Structural Transformations of Structural Steels in Nontraditional Heat Treatment. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, no. 1, pp. 46–48.
8. **Shishkov M.M.** *Marochnik staley i splavov* [Grade list of steels and alloys]. Spravochnk [Guide]. Izd. 3-e dopolnennoe. Donetsk, Yugo-Vostok Publ., 2002. 456 p.
9. **Bataev V.A., Bataev A.A., Alximov A.P.** *Metodny strukturnogo analiza materialov i kontrolya kachestva detaley* [Methods of structural analysis of materials and quality control of parts]. Moscow, Nauka Publ., 2007. 224 p.
10. **Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N.** *Rentgenograficheskiy i elektronno-opticheskiy analiz* [X-ray and electron-optical analysis]. Moscow, MISIS Publ., 1994. 328 p.
11. Mashina X4-B ispytatelnaya ustanovka dlya issledovaniya iznashivaniya materialov zakreplennym abrazivom [Machine X4-B test unit for testing the wear of materials with fixed abrasive]. Slovar-spravochnik po treniyu, iznosu i smazke detaley mashin [Dictionary-reference on friction, wear and lubrication of machine parts]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1979. 185 p.
12. **Tenenbaum M.M.** Zakonomernosti abrazivnogo iznashivaniya detaley rabochix organov selskoxozyaystvennykh mashin [Patterns of abrasive wear of parts of working bodies of agricultural machines]. *Treniya i iznos = Friction and wear*, 1980, vol. 1, no 2, pp. 357–364.
13. **Garkunov D.N.** *Tribotexnika* [Tribotechnika]. Moscow, Izd-vo MSXA Publ., 2005. 356 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-105-108>  
УДК 621.74

Поступила 09.03.2021  
Received 09.03.2021

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АБСОРБЦИОННО-БИОХИМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ОЧИСТКИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*А. В. ПРИБЫЛОВ, УП «Промышленные экологические системы», г. Минск, Беларусь, ул. Долгобродская 23. [www.ies.by](http://www.ies.by). E-mail: [promeks.by@gmail.com](mailto:promeks.by@gmail.com)*  
*Ю. П. ШАПОВАЛОВ, ООО «Газоочистка инжиниринг», г. Минск, Беларусь, ул. Долгобродская 23. [www.iesair.ru](http://www.iesair.ru). E-mail: [cleangaz.by@gmail.com](mailto:cleangaz.by@gmail.com)*  
*Е. М. ГЛУШЕНЬ, Институт микробиологии НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 2. [www.mbio.bas-net.by](http://www.mbio.bas-net.by). E-mail: [elena\\_glushen@rambler.ru](mailto:elena_glushen@rambler.ru)*

*Рассмотрена актуальность применения газоочистного оборудования в литейном производстве. Приведены примеры оснащения участков заливки, охлаждения и выбивки литейных форм и стержней, изготовленных по ALFASET и Cold-box-амин-процессам, абсорбционно-биохимическими установками (АБХУ) очистки вентиляционного воздуха от загрязняющих веществ. Рассмотрены технико-экономические параметры эксплуатации АБХУ. Приведен список предприятий, успешно эксплуатирующих АБХУ. Рассмотрены преимущества эксплуатации АБХУ по сравнению с альтернативными методами.*

**Ключевые слова.** Абсорбционная очистка, биологическая регенерация, вредные вентиляционные выбросы, летучие органические соединения, газоочистное оборудование.

**Для цитирования.** Прибылов, А. В. Опыт применения абсорбционно-биохимических установок для очистки вентиляционных выбросов в литейном производстве / А. В. Прибылов, Ю. П. Шаповалов, Е. М. Глушень // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 105–108. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-105-108>.

## EXPERIENCE IN THE USE OF ABSORPTION AND BIOCHEMICAL INSTALLATIONS FOR CLEANING VENTILATION EMISSIONS IN FOUNDRY PRODUCTION

*A. V. PRIBYLOV, UE “Industrial ecological systems”, Minsk, Belarus, 23, Dolgobrodskaya str. [www.ies.by](http://www.ies.by). E-mail: [promeks.by@gmail.com](mailto:promeks.by@gmail.com)*  
*Yu. P. SHAPOVALOV, LLC “Gas treatment engineering”, Minsk, Belarus, 23, Dolgobrodskaya str. [www.iesair.ru](http://www.iesair.ru). E-mail: [cleangaz.by@gmail.com](mailto:cleangaz.by@gmail.com)*  
*E. M. GLUSHEN, Institute of Microbiology of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus, 2, Kuprevich str. [www.mbio.bas-net.by](http://www.mbio.bas-net.by). E-mail: [elena\\_glushen@rambler.ru](mailto:elena_glushen@rambler.ru)*

*The relevance of the use of gas cleaning equipment in foundry production is considered. Examples are given of equipping the casting, cooling and knocking areas of molds and rods manufactured according to ALFASET and Cold-box-amin processes with absorption-biochemical installations (ABCHI) for cleaning the ventilation air from pollutants.*

*The technical and economic parameters of the ABCHI operation are considered. The list of the enterprises successfully operating ABHI is given. The advantages of using ABCHI in comparison with alternative methods are considered.*

**Keywords.** Absorption cleaning, biological regeneration, harmful ventilation emissions, volatile organic compounds, gas purification equipment.

**For citation.** Pribylov A. V., Shapovalov Yu. P., Glushen E. M. Experience in the use of absorption and biochemical installations for cleaning ventilation emissions in foundry production. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 2, pp. 105–108. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-105-108>.

### Актуальность применения и принцип работы абсорбционно-биохимических установок (АБХУ)

Известно, что литейное производство является экологически проблемной отраслью промышленности. В окружающую среду с вентиляционным воздухом, удаляемым от технологического оборудования, поступает широкая гамма органических газообразных веществ второго, третьего и четвертого

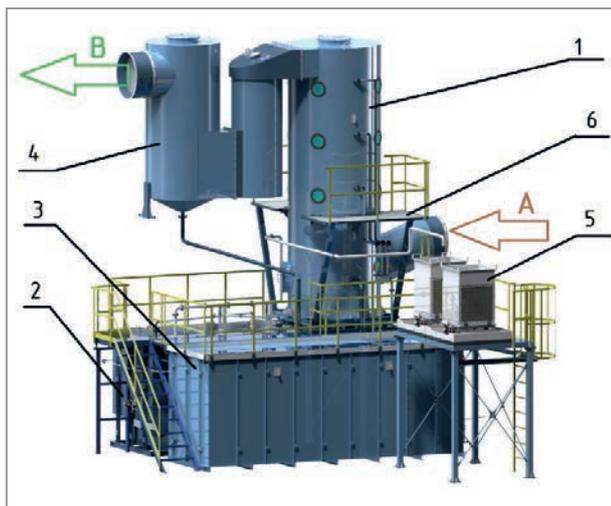


Рис. 1. Общий вид АБХУ:

1 – скруббер; 2 – шламоотстойник; 3 – биореактор;  
4 – каплеуловитель; 5 – корзина шламоуловителя;  
6 – площадка обслуживания.

А и В – вход и выход вентиляционного воздуха

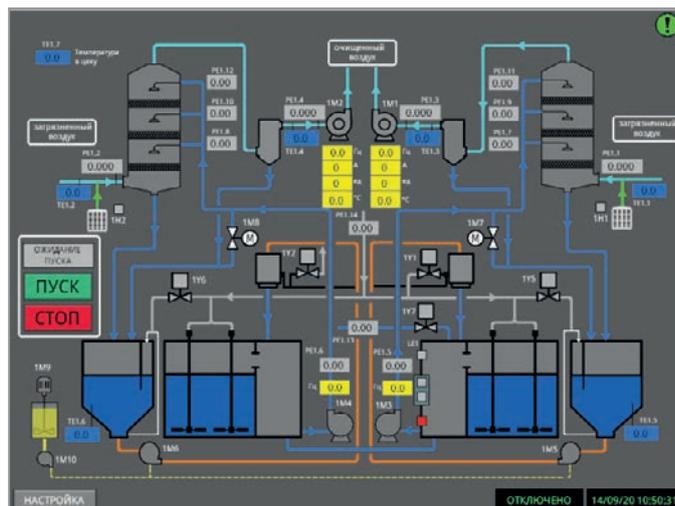


Рис. 2. Информационная панель эксплуатационных параметров АБХУ

классов опасности, что является причиной неприятного запаха и превышения предельно допустимых концентраций вредных веществ в приземном слое атмосферы на территориях, прилегающих к литейным цехам.

Для соответствия природоохранным требованиям ведущие машиностроительные предприятия России и Беларуси оснащают участки заливки, охлаждения и выбивки форм, а также машины, изготавливающие стержни по Cold-box-amin-процессу, абсорбционно-биохимическими установками (рис. 1), в которых происходит процесс объемного поглощения технической водой газообразных вредных веществ в массообменном аппарате (скруббере); растворенные в воде органические вещества поступают в биореактор, где специально селекционированные микроорганизмы-деструкторы (МД) используют их в качестве источника питания с образованием воды и углекислого газа.

Циркуляция раствора по замкнутому кругу «скруббер-биореактор» предотвращает образование производственного стока. АБХУ оснащена системой удаления шлама. Микроорганизмы вводятся в биореактор один раз во время пусконаладочных работ. Установки комплектуются автоматической системой управления технологическим процессом (АСУ ТП) газоочистки (рис. 2). Техничко-экономические показатели АБХУ приведены в таблице.

#### Техничко-экономические параметры АБХУ

Параметр	Пояснение
Функциональность	Паспортные характеристики сохраняются на протяжении всего срока эксплуатации
Стабильность системы регенерации водного абсорбента	Обеспечивают высокоактивные штаммы. Концентрация микроорганизмов в водном абсорбенте саморегулируется в зависимости от количества поступающего питания (ЛОС)
Эффективность	Степень улавливания в зависимости от входных концентраций: газов – 80-96%, взвешенных веществ – 97-99%
Экологичность	Не образуются побочные продукты, требующие дополнительной нейтрализации
Энергозатраты на 1000 м <sup>2</sup> вентиляционного воздуха	Мощность вентилятора и насоса – 1,2-2,0 кВт. Расход сжатого воздуха – 0,5-1 м <sup>3</sup> /ч
Расходные материалы	Вредные органические вещества, поступающие с вентиляционным воздухом. Вода технического качества для компенсации влагоуноса – 0,1-1,5 м <sup>3</sup> /сутки. Биогенные добавки (минеральные соли) – 20-40 кг/год
Периодичность ремонта	Отсутствуют составные части с интенсивным износом. Ремонту подлежат вентилятор и водяной насос
Обслуживание	Не требует наличия постоянного оператора

### Применение АБХУ на участках заливки, охлаждения и выбивки литейных форм и стержней, изготовленных по ALFASET- и Cold-box-amin-процессам

В результате протекания при заливке металлом реакций термодеструкции и пиролиза формовочных и стержневых смесей в воздушную среду выделяется более 20 вредных веществ [1]. Как показывает практика, на данных участках в вентиляционном воздухе присутствуют фенол, формальдегид, цианиды, полиизоцианаты, амины, ксилол, толуол, аммиак, метанол, широкая гамма ароматических углеводородов, метилформиат, ацетальдегид, смолистые и взвешенные вещества.

Более чем на 20 предприятиях машиностроительного профиля проблема нейтрализации вредных выбросов в атмосферу решена с помощью АБХУ (рис. 3).

Ряд проектов выполнен совместно с фирмой «Laempe», которая поставляет современное оборудование для получения высококачественных отливок. Один из примеров – это построенный в 2018 г. в г. Липецке литейный завод ООО «РЭДАЛИТ» по производству нефтяного оборудования. Он оснащен семью АБХУ, позволяющими очищать 170 тыс.м<sup>3</sup> вентиляционного воздуха в час.

После ввода АБХУ в эксплуатацию достигаются санитарно-гигиенические показатели в воздушной среде на прилегающих к литейным цехам территориях.

### Применение АБХУ при изготовлении стержней по Cold-box-amin-процессу

На 23 предприятиях (рис. 4) находятся в эксплуатации 36 АБХУ по очистке вентиляционного воздуха, удаляемого от стержневых машин, таких фирм, как «Laempe», АВН, «Primafond», ОАО «БЕЛНИЛИТ», ОМЕГА.

АБХУ выгодно отличаются от альтернативных кислотных скрубберов:

- отсутствуют химические реагенты (кислота, щелочь);
- отсутствует сброс в канализацию отработанного раствора с многократным превышением предельно допустимых концентраций по солям и фенолу;
- на большинстве предприятий наблюдается каплеунос серной кислоты в атмосферу.

Сегодня АБХУ применяют для решения экологических проблем такие гиганты автомобилестроения, как ОАО «МАЗ», ОАО «ГАЗ», АО «КАМАЗ», АО «АЗ УРАЛ», АО «Автодизель», а также АО «НПК «Уралвагонзавод», ООО «Лебедянский машиностроительный завод», ООО «Оскольский завод нефтяного машиностроения», АО «Термотрон-завод». В настоящее время в эксплуатации находится более 130 установок на 59 предприятиях стран СНГ. В сутки в АБХУ очищают более 40 млн. м<sup>3</sup> вентиляционного воздуха.

АБХУ не имеет аналогов на мировом рынке газоочистного оборудования по совокупному показателю эффективности, экологичности, надежности и экономичности:



Рис. 3. АБХУ. ОАО «Металлист», г. Качканар, РФ



Рис. 4. АБХУ. АО «СКБ «Турбина», г. Челябинск, РФ

- гарантированное решение экологической проблемы;
- высокая степень улавливания широкой гаммы органических и взвешенных веществ;
- низкие эксплуатационные расходы, минимальное техническое обслуживание, отсутствие изнашиваемых и заменяемых частей;
- отсутствие стока в канализацию, без использования химических реагентов, кислот, щелочей, пожарная безопасность.

По нашему мнению, сегодня не представляется возможным обеспечить экологическую безопасность литейного производства без применения АБХУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Ермоленко А.Е., Любимов В.В.** Санитарно-гигиеническая экспертиза литейных песчано-смоляных смесей // Литейное производство. 1989. №11.

#### REFERENCES

1. **Ermolenko A.E., Ljubimov V.V.** Sanitarно-gigienicheskaja jekspertiza litejnyh peschano-smoljanyh smesej [Sanitary and hygienic examination of foundry sand-resin mixtures]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1989, no. 11.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-109-119>  
УДК 669.714, 621.718

Поступила 28.04.2021  
Received 28.04.2021

## ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ: ФОТОН

*И. О. САЗОНЕНКО, г. Могилев, Беларусь. E-mail: sazonenko2@mail.ru,  
В. И. САПОН, г. Минск, Беларусь*

Для случая взаимодействия поляризованного света с анализатором (поляризационным прибором) предложена схема эксперимента на основе идеи Фейнмана – интегралов по путям. Рассмотрены реальные и виртуальные фотоны в контексте правила Ленца (в терминах конструктивной и деструктивной индукции). Рассмотрена формула Планка для энергии фотона в формате словесного описания. Показана сложность отождествления волнового описания фотона с идеями Древних Греков об элементарных частицах. С точки зрения хроногеометрии показано, что неподвижный наблюдатель существует не в точке пересечения конуса прошлого и будущего, а во временном интервале, разделяющим эти области. Предложено рассматривать флуктуации физического вакуума как реликт процесса перманентной инфляции по Линде.

На основе предположения о самоизмерении Вселенной, квантового эффекта Зенона и идеи Хокинга о Вселенной, являющейся квантовым объектом с  $N$ -й суммой фейнмановских историй, предполагается, что история Вселенной детерминирована. С ракурса ортогональности векторов электромагнитного поля  $E$  и  $B$  рассмотрено равенство Гейзенберга вида  $\Delta p \times \Delta x = \hbar/2$ . Рассмотрен мысленный эксперимент, показывающий сложность в описании взаимодействия фотона с электроном атома с точки зрения классического взаимодействия электромагнитной волны с антенным устройством. Предложено рассматривать поглощение фотона электроном как его инерционный коллапс на атоме.

**Ключевые слова.** Поляризованный свет, правило Ленца в терминах конструктивной и деструктивной индукции, элементарная частица, перманентная инфляция, самоизмерение Вселенной,  $N$ -я сумма фейнмановских историй, инерционный коллапс.

**Для цитирования.** Сазоненко, О.И. Относительность: фотон / О.И. Сазоненко, В.И. Сапон // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 109–119. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-109-119>.

## RELATIVITY: PHOTON

*I. O. SAZONENKO, Mogilev, Belarus. E-mail: sazonenko2@mail.ru,  
V. I. SAPON, Minsk, Belarus*

For the case of interaction of polarized light with an analyzer (a polarizing device), an experimental scheme based on the Feynman idea of path integrals is proposed. Real and virtual photons are considered in the context of the Lenz rule (in terms of constructive and destructive induction). The Planck formula for the photon energy in the format of a verbal description is considered. The complexity of identifying the wave description of the photon with the ideas of the Ancient Greeks about elementary particles is shown. From the point of view of chronogeometry, it is shown that the stationary observer does not exist at the point of intersection of the cone of the past and the future, but in the time interval separating these regions. It is proposed to consider the fluctuations of the physical vacuum as a relic of the process of permanent inflation according to Linde.

Based on the assumption of the self-measurement of the Universe, the quantum Zeno effect, and Hawking's idea of the Universe being a quantum object with the  $N$ th sum of Feynman stories, it is assumed that the history of the Universe is deterministic. From the perspective of the orthogonality of the electromagnetic field vectors  $E$  and  $B$ , the Heisenberg equation of the form  $\Delta p \times \Delta x = \hbar/2$  is considered. A thought experiment is considered showing the complexity in describing the interaction of a photon with an electron of an atom from the point of view of the classical interaction of an electromagnetic wave with an antenna device. It is proposed to consider the absorption of a photon by an electron as its inertial collapse on an atom.

**Keywords.** Polarized light, Lenz's rule, constructive and destructive induction, elementary particle, permanent inflation, self-measurement of the universe, the  $n$ th sum of Feynman stories, inertial collapse.

**For citation.** I. O. Sazonenko, V. I. Sapon. Relativity: photon. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 2, pp. 109–119. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-109-119>.

Один из основных законов, описывающих распространения поляризованного света, – закон Малюса. Он определяет значение интенсивности линейно поляризованного света при его прохождении через анализатор (поляризационный прибор) [1]. Эта зависимость имеет вид:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha,$$

где  $I$  – интенсивность выходящего из анализатора света;

$I_0$  – интенсивность падающего на анализатор света;

$\alpha$  – угол между плоскостями поляризации падающего света и анализатора.

На рис. 1 представлена схематическая визуализация этого закона.

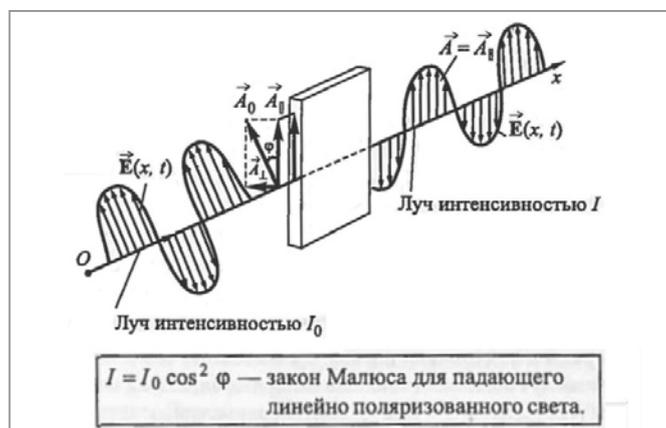


Рис. 1. Закон Малюса (сюжет с сайта <https://en.ppt-online.org/396173>)

Рассматривая данную схему, нам вспомнился дивный сон Чжуан Чжоу [2]: «Однажды я, Чжуан Чжоу, увидел себя во сне бабочкой – счастливой бабочкой, которая порхала среди цветков в свое удовольствие и вовсе не знала, что она – Чжуан Чжоу. Внезапно я проснулся и увидел, что я – Чжуан Чжоу. И я не знал, то ли я Чжуан Чжоу, которому приснилось, что он – бабочка, то ли бабочка, которой приснилось, что она – Чжуан Чжоу». Ведь с этой мистико-философской точки зрения у закона Малюса два варианта возможного взаимодействия линейно поляризованного света с анализатором.

Первый, назовем его условно «классический». Предполагает «дворачивание» анализатором плоскости линейно поляризованных фотонов до своей плоскости с вероятностью  $\cos^2\alpha$ . Таким образом, мы предполагаем существование строго определенной абстрактной плоскости, за пределы которой поляризация фотона «выйти» самостоятельно не может.

Второй, с условным названием «квантовый». Предусматривает возможность существования в соответствующем образом линейно поляризованном свете фотонов с плоскостью поляризации, параллельной плоскости анализатора с вероятностью  $\cos^2\alpha$ , т.е. соответствует условию, что через анализатор проходят только те фотоны, плоскость поляризации которых параллельна плоскости анализатора (такое граничное условие селекции). Основа данного варианта – идея Фейнмана о том, что фотон движется из точки А в точку В по всем мыслимым путям с соответствующими вкладами каждого из путей в траекторию фотона [3].

Соответственно при современном уровне развития нанотехнологий вполне осуществим эксперимент, схематически изображенный на рис. 2. В нашем эксперименте на наноанализатор под некоторым углом к плоскости его поляризации падает линейно поляризованный свет. Соответственно наноанализатор оснащен индикатором угловых перемещений.

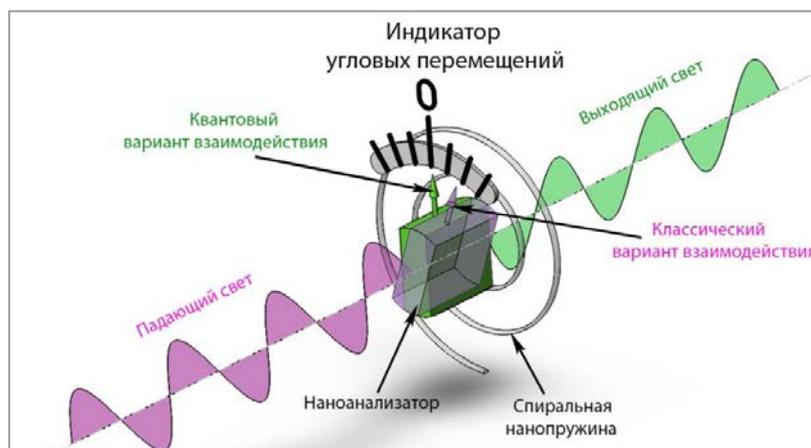


Рис. 2. Схема проведения эксперимента

Предположим, закон сохранения момента количества движения выполняется в квантовом мире. Тогда в случае «классического» варианта индикатор должен зарегистрировать некоторое значение крутящегося момента, пропорционального интенсивности падающего света. В случае с условным названием «квантовый» угловое перемещение наноанализатора должно быть пропорционально разности интенсивностей падающего и выходящего лучей.

Может возникнуть вопрос – зачем мы пытаемся переосмыслить закон, который известен уже очень давно. Дело в том, что закон Малюса и экспериментальная проверка теоремы Белла базируются на одном и том же явлении – взаимодействия света с поляризационным прибором. Теорема утверждает, что локальные теории соответствуют неравенству Белла, в то время как квантовая механика нарушает это неравенство. Другими словами, теорема утверждает, что квантовые параметры не являются локальными (согласно копенгагенской интерпретации, они не являются объектом реальности, т.е. до измерения не существуют). Но вот закон Малюса говорит нам, что поляризация света есть объективная реальность. В противном случае трудно объяснить, почему при совпадении плоскости поляризации падающего света и анализатора интенсивность падающего и выходящего лучей остается неизменной. Здесь уместно привести следующее высказывание, которое приписывают Гедделю по утверждению [4]: «голый результат – это труп, оставивший позади себя тенденцию». Ведь при измерении мы получаем «голый результат», теряя при редукции фон Неймана, что-то сокрытое за понятием «тенденция».

Возможно, Вам доводилось задаваться вопросом. Каково не математическое описание фотона, которое выражает форму, а не его содержание? Мы имеем ввиду не количественное, а качественное представление фотона в терминах волна или частица. В обозримой литературе для фотона, рассматриваемого как частица, мы нашли достаточно скромное описание. Фотоны – это «домены», на которые распадается в данной области пространства электромагнитная волна, поле в которых эквивалентно полю одного фотона [5]. Описание же процесса формирования свободной электромагнитной волны достаточно подробно дано в [6]. Оно базируется на теории Максвелла и использует понятия тока смещения и вихревого электрического поля. Но в этом описании за скобками стоит правило Ленца, и, с нашей точки зрения, – это очень интересный момент. Суть правила примерно в следующем: возникающий индукционный ток имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле стремится компенсировать то изменение поля, которым вызывается данный ток [7].

На рис. 3 показано схематическое изображение процесса формирования свободной электромагнитной волны.

Процесс формирования свободной волны сводится к следующему [6]: «Представим себе, что в некоторой точке  $O$  внутри безграничной непроводящей среды создано каким-либо способом электрическое поле  $E$ . Если нет электрических зарядов, поддерживающих это поле, то оно будет **исчезать**. Но **убывающее** поле  $E$ , согласно Максвеллу, вызывает магнитное поле  $H$ . Так как поле  $E$  **убывает**, то плотность тока смещения  $j = \epsilon_0 \frac{dE}{dt}$  направлена противоположно  $E$  и линии индукции магнитного поля направлены по часовой стрелке. Так как в среде нет постоянных токов, поддерживающих поле  $H$ , то последнее в свою очередь будет **исчезать** и вызовет вихревое электрическое поле  $E_1$ . Линии напряженности этого поля будут направлены против часовой стрелки, как показано на рис. 3. Поле  $E_1$  уничтожит первоначальное поле  $E$  в точке  $O$ , но зато проявится в соседней точке  $1$ . **Исчезая** в точке  $1$ , электрическое поле  $E_1$  приведет к появлению магнитного поля  $H_1$ , которое будет направлено, как и поле  $H$ , по часовой стрелке. Поле  $H_1$  уничтожит поле  $H$  и обнаружится в более удаленной точке. **Исчезая**, оно вызовет вихревое электрическое поле  $E_2$ , которое уничтожит поле  $E_1$  в точке  $1$ , но проявится в точке  $2$  и т.д. Таким образом, вместо первоначального поля  $E$  мы получим и электрическое, и магнитное поля, взаимно связанные друг с другом и распространяющиеся в пространстве, т.е. электромагнитную волну».

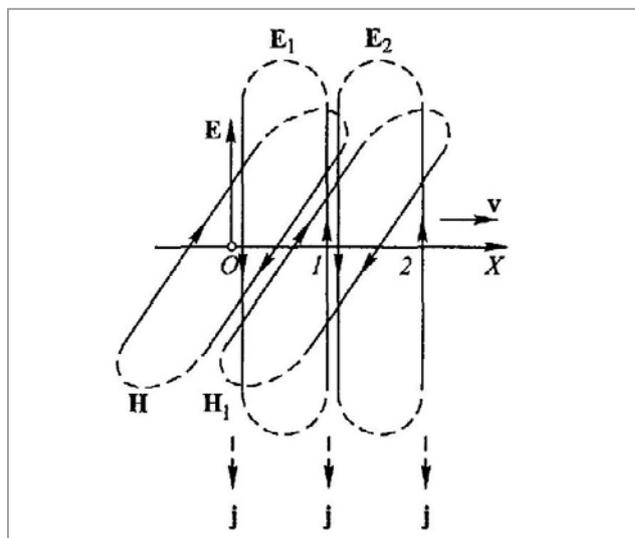


Рис. 3. Процесс формирования свободной электромагнитной волны (сюжет из книги С. Г. Калашникова «Электричество»)

В тексте мы выделили условия существования свободной электромагнитной волны, и оно описывается одним словом – *исчезновение*. Применяя здесь правило Ленца, можно предположить, что убывающее поле поддерживается конструктивной индукцией, обеспечивая процесс существования свободной волны. Соответственно возрастающее поле должно характеризоваться деструктивной индукцией. Такой вид индукции должен приводить к подавлению свободно распространяющихся электромагнитных волн. Возможно, последствие этого процесса – виртуальные электромагнитные волны (фотоны) нашего мира. Но тогда, чтобы существовали виртуальные электромагнитные волны, должен также существовать изначальный этап зарождения этих волн, которые благодаря деструктивной индукции гасятся, так сказать, в зародыше. Вероятно, стремление что-либо «породить» – это исконное свойство вакуума без относительно того, как его называют – истинным или ложным. Ведь каким-то образом давным-давно в нашей истории случился Большой взрыв. А бозон Хиггса потребовался Стандартной теории для того, чтобы придать массу изначально безмассовым частицам (не имеющим массу покоя). Тогда возникает любопытный вопрос. Каковы условия существования электромагнитных волн при возрастающих полях? Ответ прост – они могут существовать вдоль проводных линий и антенн и в этом случае к ним понятие «свободная волна» не применимо. Сразу же возникает следующий наивный вопрос. Каковы граничные условия, которые могли бы послужить проводником, обеспечившим переход тенденции в реальность? Ведь рассмотрение электромагнитной волны в терминах конструктивной и деструктивной индукции приводит к внутреннему ощущению, что наша реальная материя все время пытается «исчезнуть» из нашего пространство-времени, тогда как виртуальная материя пытается «проявиться» в нем... Конечно, может возникнуть закономерный вопрос о правомочности использования в нашем рассуждении логического метода индукции. Но в свое оправдание мы хотим привести, для примера, следующие утверждения, на первый взгляд, не имеющие между собой никакой связи:

- правило Ленца (возникающий индукционный ток имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле стремится компенсировать то изменение поля, которым вызывается данный ток);
- принцип Ле-Шателье (внешнее воздействие на систему, находящуюся в состоянии равновесия, приводит к смещению равновесия в направлении, при котором эффект произведенного воздействия ослабляется);
- квантовый эффект Зенона (чем чаще производится измерение над частицей, тем больше вероятность найти ее в исходном состоянии).

Рассматривая эти правила-принципы, у нас появилась некая внутренняя убежденность. Вряд ли мы сильно погрешим против истины, если возьмемся утверждать – все это, частные описания такого фундаментального свойства материи, как инертность (в ее более узком смысле – инерции). И в данном случае под понятием материи мы принимаем расширенную формулировку, данную автором [4]: *«Современный физический вакуум есть скорее всё, чем ничто»*.

Другой, наивно-простой вопрос – каковы линейные размеры фотона? У фотона, как известно, есть, по крайней мере, одна размерная характеристика – это длина волны, входящая в формулу энергии фотона. Используя общепризнанное схематическое представление электромагнитных волн, мы попробовали изобразить фотон на рис. 4. И вот то, что у нас получилось, вызвало ряд вопросов.

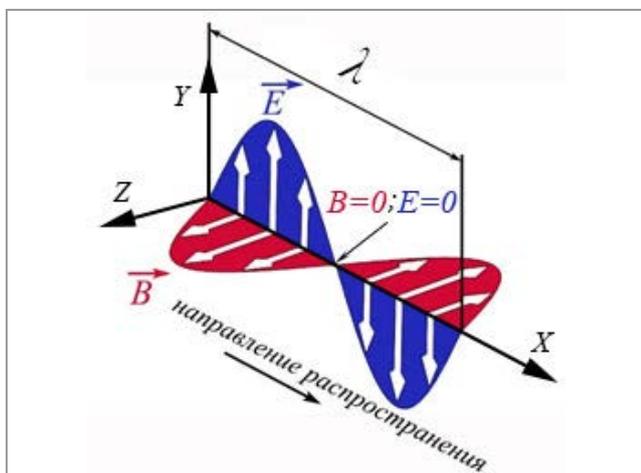


Рис. 4. Фотон как волна на основании общепризнанного представления электромагнитных волн

Рассмотрим следующую ситуацию. Источник единичных фотонов неподвижен относительно наблюдателя. Этим условием мы исключаем из рассмотрения эффект Доплера и его релятивистское расширение. Но тогда в предположении, что фотон является материальным объектом возникает вопрос. Почему на фотон, имеющий в направлении распространения определенную размерную характеристику (длину волны), не действует лоренцево сокращение длины? На наш взгляд, это возможно в случае, когда движение фотона соответствует апории Зенона – «Стрела». Содержание апории сводится к следующему [8]: *«Время полета стрелы можно представить себе в виде множества мгновений, в виде мельчайших неделимых далее элементов; во время полета стрела каждое*

мгновение находится в каком-то определенном месте, и это, в свою очередь, означает, что каждое мгновение она находится в покое...». И вроде, как в случае электромагнитной волны, так оно и есть. Ведь это поперечная волна. Но вот фотон также и частица, как же тогда движется он? (Имеется ввиду движения как порции энергии без деления его на поля E и B, векторы которых ортогональны направлению движения).

Следующий вопрос. Любая монохроматическая волна, ограниченная в пространстве конечным количеством периодов, должна иметь сложный спектр. По современным представлениям фотон – это электромагнитное поле, распавшееся на отдельные области размером порядка длины волны излучения, внутри которых применимо понятие когерентности и содержится вся энергия фотона [5]. Но мы попытались «перевести» знаменитую формулу Планка в формат словесного описания. У нас получилось следующее: энергия фотона пропорциональна количеству единиц Планка, равному количеству длин волн фотона, умещающихся на отрезке длиной  $\approx 300\,000\,000$  м. На рис. 5 дана визуализация формулы Планка. Из рисунка видно, что при условиях, в которых формула «рассматривает» (расчетный отрезок  $\approx 300\,000\,000$  м) энергию фотона, даже волны километровой длины будут выглядеть вполне себе монохроматическими. Но почему это так, не вполне понятно. Отсюда же получается, что предельная длина волны, к которой можно отнести понятие «фотон», равна приблизительно  $300\,000\,000$  м?

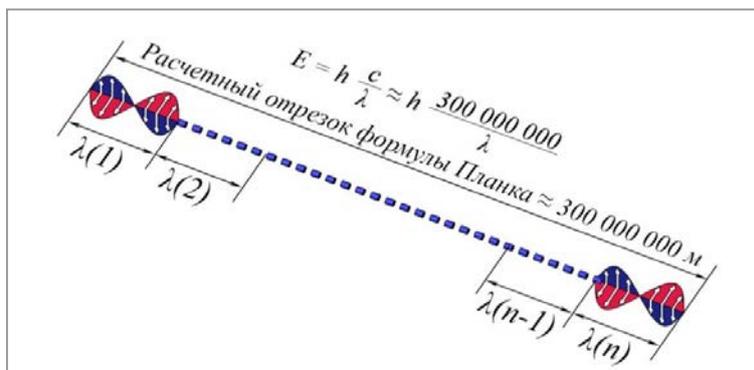


Рис. 5. Визуализация формулы Планка

Теперь предлагаем отойти от общепризнанного представления электромагнитной волны (см. рис. 4) и воспользоваться представлениями Фарадея о силовых линиях, взяв за исходный сюжет из [6]. Здесь следует отметить следующее. Современный взгляд на электромагнитные волны подчеркивает их подобие механическому осциллятору, т.е. массе на пружине [9]. В этой аналогии энергия электрического поля соответствует потенциальной энергии деформации пружины. Энергия магнитного поля – аналог кинетической энергии движущейся массы. Но в классическом механическом осцилляторе при его колебаниях мы наблюдаем переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно. Соответственно мы никогда при колеблющемся осцилляторе не сможем наблюдать состояние, в котором одновременно равны нулю потенциальная и кинетическая энергии (рис. 6). Но в классическом представлении (см. рис. 4) существует состояние, когда энергии электрического и магнитного поля одновременно равны нулю.

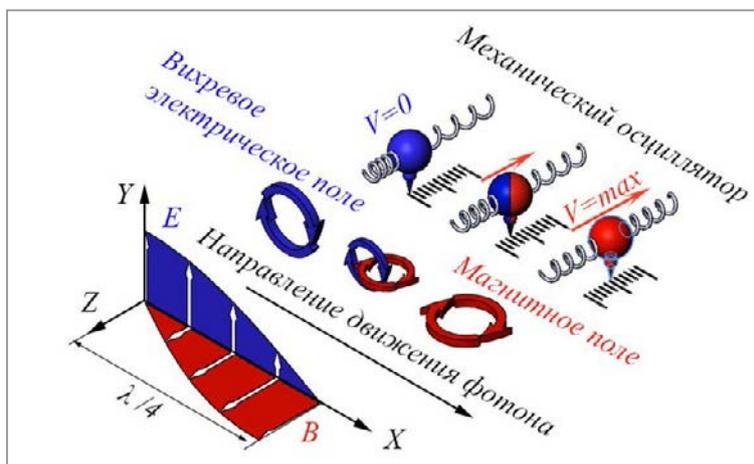


Рис. 6. Фотон по Фарадею и механический осциллятор

Таким образом, у нас получилась странная конструкция фотона (рис. 7). При этом, исходя из аналогии между фотоном и механическим осциллятором, энергия вихревого электрического поля должна преобразовываться в энергию магнитного поля (и наоборот) в пределах пространственной области с размерами  $\lambda/4$  (четверть длины волны) (см. рис. 6).

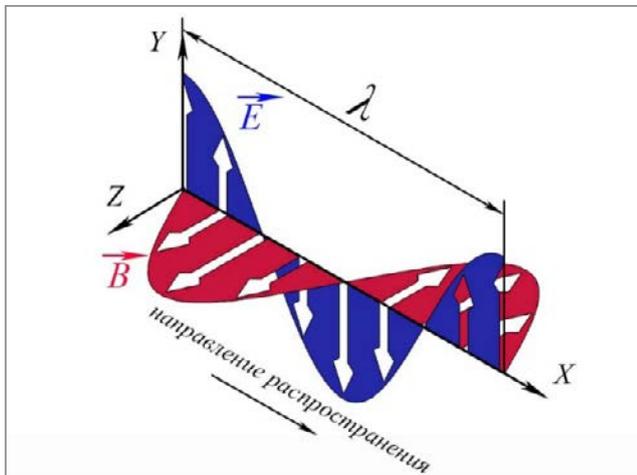


Рис. 7. «Странный» фотон

электромагнетизм – живые и искусственные системы). Все это многообразие, по нашим представлениям, формируется, развивается и умирает со временем. Согласно геометрическому представлению Минковского, мы как наблюдатели существуем в точке настоящего, являющейся точкой пересечения конуса прошлого и конуса будущего. Естественно любое рассмотрение геометрии пространство-времени базируется на понятии систем отсчета. По большому счету в отношении к определению момента времени какого-либо события существуют две системы отсчета: монадная и хроногеометрия [11]. Монадному методу соответствует случай, рассматривающий континуум наблюдателей, т.е. основанный на конгруэнции временно-подобных мировых линий. Хроногеометрия – система отсчета, в которой происходит регистрация приходящих световых сигналов.

Исторически так сложилось, что хроногеометрия отошла на вторые позиции при рассмотрении пространство-времени. Возможно, это произошло из-за следующего высказывания Альберта Эйнштейна [12]: «Желая определить время событий, мы могли бы, конечно, удовлетвориться тем, что заставили бы некоторого наблюдателя, находящегося с часами в начале координат, сопоставлять соответствующее положение стрелки часов с каждым световым сигналом, идущим к нему через пустоту и дающим знать о регистрируемом событии. Такое сопоставление связано, однако, с тем **неудобством**, известным нам из опыта, что оно не будет независимым от местонахождения наблюдателя, снабженного часами.» С тех пор, по-видимому, и повелось рассматривать все события из монадных систем отсчета, которым соответствует плоскость одновременных событий № 1 на нашем рис. 8. Соответственно плоскость одновременных событий хроногеометрии представлена нами под № 2. Эта кривая, описываемая уравнением  $t^2 - x^2 = 1$ .

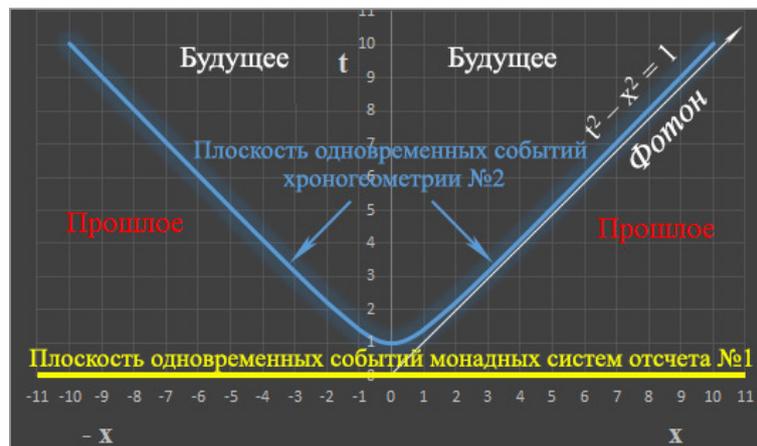


Рис. 8. Плоскости одновременных событий двух систем отсчета

Еще в прошлом столетии Хазеном высказывалась следующая идея [10]: «Адиабатическое уравнение состояния в классической механике есть аналог соотношения неопределенности Гейзенберга. В специфических формах неопределенность типа гейзенберговской существует для классических механических траекторий». В связи с этим нет ничего удивительного в том, что при некотором перестроении [13] кривая  $\Delta p \cdot \Delta x = \hbar/2$  (где  $\Delta p$  – среднее квадратическое отклонение импульса;  $\Delta x$  – среднее квадратическое отклонение координаты) совпадет с плоскостью одновременных событий в хроногеометрической интерпретации (рис. 9). Соответственно также ложится и другое равенство  $\Delta E \cdot \Delta t = \hbar/2$  (где  $\Delta E$  – среднее квадратическое отклонение энергии;  $\Delta t$  – среднее квадратическое отклонение времени).

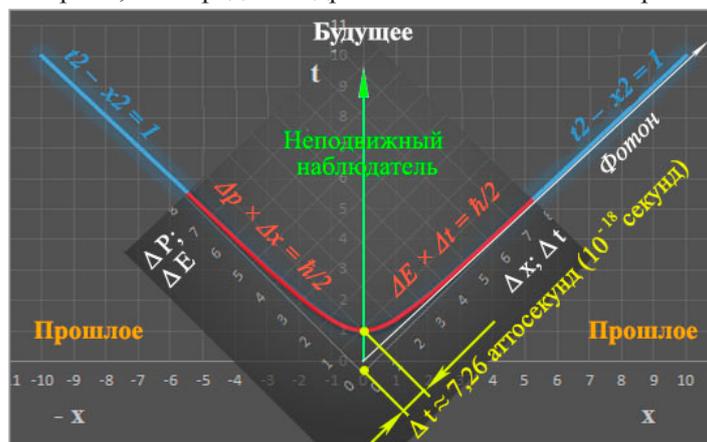


Рис. 9. Совмещение области будущего в хроногеометрии и области действительных значений неравенств Гейзенберга

И если хорошо присмотреться к рисунку, то мы увидим, что настоящее для неподвижного наблюдателя – это не временная точка, а некоторый временной промежуток. Другими словами, постоянная Планка определяет для него:

«...миг

Между прошлым и будущим

Именно он называется жизнь» [14].

И тогда числовое значение временного промежутка в нашей неподвижной системе отсчета (с учетом того, что числовые значения  $\Delta t$  и  $\Delta E$  равны между собой) по порядку величины будет:

$$\Delta E = \Delta t = \sqrt{\hbar / 2} \approx \sqrt{1,054 \cdot 10^{-34} / 2} \approx 7,26 \cdot 10^{-18}.$$

Согласно Ричарду-Фейнману, все электромагнитное взаимодействие можно кратко описать тремя действиями [3]:

- электрон летит из одного места в другое;
- электрон поглощает фотон;
- электрон излучает фотон.

Но перед тем, как электрон полетит из одного место в другое, он должен покинуть соответствующую орбиту в атоме. И очень любопытен тот факт, что, согласно [15], электрон отправляется летать от связей своего родительского атома в невероятно быстром процессе. Все происходящее от начала до конца занимает от 7 до 20 аттосекунд ( $10^{-18}$  с). При сопоставлении этого значения с нашим элементарным расчетом возникает вопрос – это случайное совпадение? Возможно, где-то здесь «маячит» антропный призрачок (принцип)?

Предлагаем еще раз, обратиться к идее конструктивной и деструктивной индукции и соответствие ее реальным и виртуальным фотонам. Предположим, конструктивной индукции соответствует электромагнитная волна, амплитуда которой изменяется по синусоидальному закону. Тогда возможно виртуальную электромагнитную волну необходимо рассматривать как лежащую «по другую сторону» от нашей синусоиды (рис. 10).

Далее из этой идеи мы продолжили цепь суждений в сторону стремления вакуума что-либо «породить» без относительности того истинный он или ложный. С этой точки зрения сделаем следующее простейшее предположение о «картинке мира». Процесс рождения Вселенной, в контексте вечной инфляции по Линде, выродился в состоянии виртуальные частицы + квантовая пена по Уилеру в нашем пространство-времени. Другими словами, его величество Вакуум – реликт перманентной инфляции.

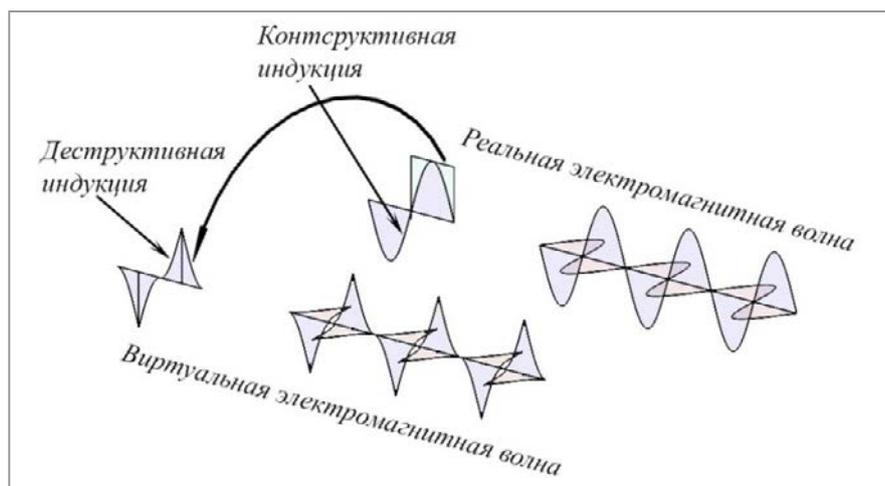


Рис. 10. Реальная и виртуальная электромагнитная волна

Зададимся резонным вопросом. Чем процесс рождения виртуальных частиц не перманентная инфляция Линде в миниатюре? Ведь если взять за основу идею деструктивной индукции, то любая виртуальная частица – это «неудавшаяся попытка» зарождения другой Вселенной в рамках нашей Вселенной. Следующий шаг. Вакуум определяет пространственно-временную конфигурацию нашей Вселенной. Он, выражаясь терминами математических задач, является граничным условием существования нашей Вселенной. И такая граница полностью соответствует интересному мнению из [16]: «Граница Вселенной не может находиться в одном фиксированном месте, так как согласно космологическому принципу во Вселенной не могут существовать привилегированные точки и направления. Поэтому граница Вселенной должна проходить через любую произвольную точку...». Пройдем еще чуть-чуть далее по обозначенному нами пути. Сделаем следующее допущение: флуктуации вакуума есть перманентная процедура измерения нашего реального четырехмерного пространство-времени. Воспользуемся, в контексте самоизмерения Вселенной квантовым эффектом Зенона и идеей Хокинга о том, что Вселенная является квантовым объектом с  $N$ -й суммой фейнмановских историй [17]. В результате получим механизм, по которому в момент рождения Вселенной, ей из множества вариантов историй выпал один единственный, по которому сейчас она и движется. С нашей точки зрения история Вселенной детерминирована.

Неравенства Гейзенберга – это удивительнейшие по своей простоте математические выражения. Считается, что одно из них описывает возможность появления в вакууме виртуальных частиц с массой, эквивалентной энергии  $\Delta E$  на время  $\Delta t$ , т.е. в данном случае его необходимо рассматривать как равенство. Но мы, в литературе по квантовой механике, нигде не встречали запрета на существование обратного процесса – «исчезновение» массы эквивалентной энергии  $\Delta E$  на время  $\Delta t$ .

При квантовом подходе к описанию фотона принято рассматривать операторы  $\Delta E$  и  $\Delta E/\Delta t$  как не коммутирующие [5]. Оператор  $\Delta E/\Delta t$  в свою очередь определяет значение тока смещения и соответственно магнитное поле. Также не оспорим тот факт, что векторы электромагнитного поля  $E$  и  $B$  взаимно ортогональны. Давайте с этого ракурса рассмотрим равенство Гейзенберга вида  $\Delta p \cdot \Delta x = \hbar/2$  (где  $\Delta p$  – среднеквадратическое отклонение импульса;  $\Delta x$  – среднеквадратическое отклонение координаты). Известно – импульс векторная величина [18]. В трехмерном пространстве произвольный импульс раскладывается на три проекции. С наивной точки зрения в нем «заключена» структура наших трех пространственных измерений.

Если теперь в нашем равенстве вида  $\Delta p \cdot \Delta x = \hbar/2$  предположить, что в импульсе «заключены» три наших пространственных измерения, то тогда любая ортогональная к нему координата может находиться только в другом измерении. Такая интерпретация позволяет получить ситуацию, в которой периодически изменяющийся импульс будет преобразовываться в дополнительное измерение (рис. 11).

В квантовой механике принято рассматривать частицы, имеющие массы покоя, как волну де Бройля. Естественно возникает желание представить частицу как механический осциллятор. В нем мы бы допустили переход импульса в дополнительное пространственное измерение. Обладая врожденным отсутствием должного пиетета к математическим формулировкам, мы вычеркнули из нашего арифметического действия понятие физической корректности. В равенстве Гейзенберга, связывающего неопределенность импульса с неопределенностью положения частицы, мы допустили изменение импульса по

косинусоидальному закону. Соответственно получили следующее выражение для неопределенности координаты:

$$\Delta x = \frac{\hbar}{2\Delta p_0 \cos \alpha},$$

где  $\hbar$  – постоянная Дирака;

$\Delta p_0$  – амплитуда неопределенности импульса.

На основании этого выражения мы провели некоторые расчеты. За амплитуду неопределенности импульса было взято значение импульса ультрахолодного нейтрона, рассматриваемого в работе [19], при его 1D-движении. На рис. 12 отображены результаты расчетов. В нашем расчете значение дополнительного измерения получилось ограниченным предельным значением  $1,515 \cdot 10^{11}$  м. Это ограничение вызвано применением программного средства таблиц Excel. В теории значение стремится к бесконечности. Такой результат вполне себе в духе фейнмановских идей интегралов по путям. При таком подходе возможна следующая трактовка. Стремящаяся к нулю вероятность обнаружения в данном месте частицы – это следствие перехода импульса в дополнительное измерение, теоретически в бесконечность.

Несколько сложнее, по нашему мнению, дела обстоят в случае фотона. По идеям волнового электромагнетизма «внутри» его должен осуществляться переход энергии электрического поля в магнитное и наоборот. Если твердо стать на представление Фарадея о силовых линиях, то можно предложить следующий мысленный эксперимент (рис. 13). В нем в качестве детекторов электрического и магнитного полей задействованы углеродные нанотрубки. Одна из них размещена в зоне вихревого электрического поля и выполняет роль нанополосы. Но в отличие от нанополос, которые используются для прямого преобразования света в электричество [20], наша нанотрубка

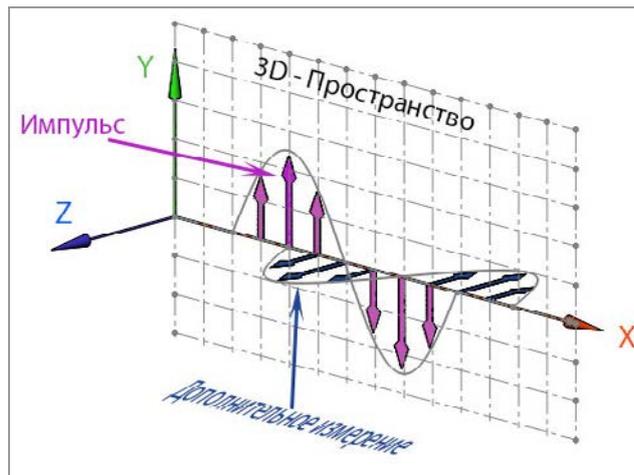


Рис. 11. Преобразование импульса в дополнительное измерение

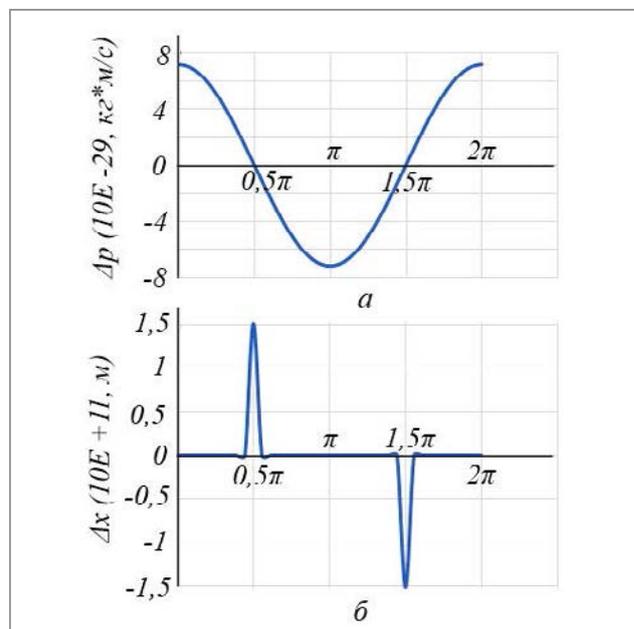


Рис. 12. Результат расчетов: а – изменение импульса; б – изменение дополнительного измерения

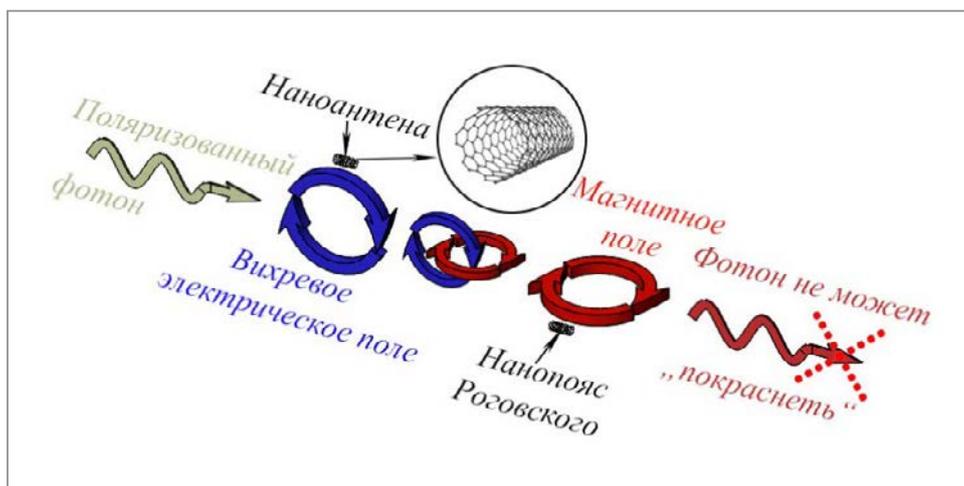


Рис. 13. Мысленный эксперимент по детектированию фотона как волны

должна иметь длину существенно меньше  $\lambda/4$  (четверть длины волны) фотона. Соответственно такая же нанотрубка, помещенная в зоне магнитного поля, могла бы выполнить роль фрагмента короткозамкнутого пояса Роговского. При прохождении такой наноструктуры фотоном в предположении, что он электромагнитная волна, можно было бы ожидать «покраснение» фотона на выходе из нашего устройства. Но проблема в том, что, как известно, фотон, взаимодействуя с электроном атома, переводит его на более высокий энергетический уровень, поглощаясь при этом целиком, без остатка.

Таким образом, в нашем мысленном эксперименте возникает следующий вопрос. Возможно ли взаимодействие фотона с какой-либо материальной структурой без его поглощения и переизлучения электроном? По всем квантовым канонам такого взаимодействия быть не должно.

Но тогда возникает вопрос. Каким образом энергия фотона, заключенная, согласно [5] в объеме  $\lambda^3$ , переходит в объем, занимаемый возбуждаемым атомом, который заведомо меньше? Приведем пример. Важнейшие спектральные линии гелия в видимой части спектра лежат между 706,52 и 447,14 нм, а размер атома гелия имеет радиус порядка 32 пм. На рис. 14 мы попытались воспроизвести соотношение масштабов фотона и атома гелия. В рамках нашего рисунка это получилось не совсем корректно. Чтобы хоть как-то в выбранном масштабе атом отобразить в виде точки, нам пришлось увеличить его размер в 100 раз.

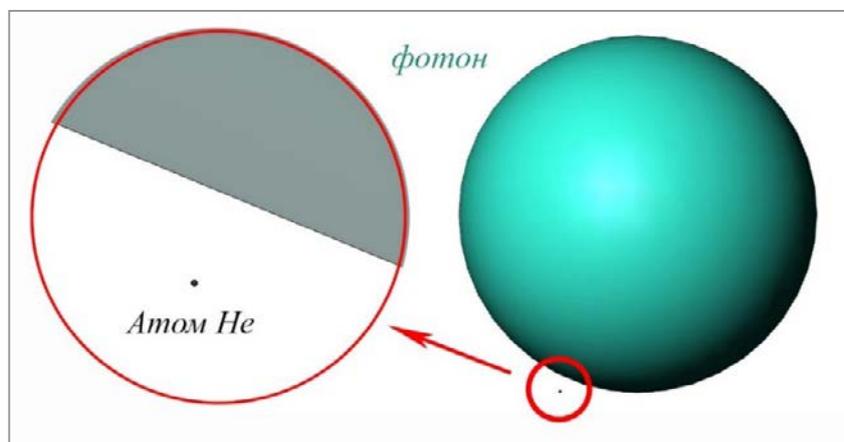


Рис. 14. Отношение масштабов фотона с длиной волны 447,14 нм и атома гелия (32 пм)

При таких соотношениях размеров наши классические представления о взаимодействии электромагнитных волн с антенными устройствами явно не подойдут. Как ни странно, но простейшее объяснение взаимодействия в данном случае могло бы основываться на эйнштейновском принципе эквивалентности, который он использовал при построении общей теории относительности. Ведь фотон всегда фотон. Он летит и поглощается всегда с одной и той же скоростью – скоростью света. При поглощении в зоне «контакта» он должен «затормозиться». А поле инерционных сил обладает интересным свойством «включаться» и «выключаться» в силу отсутствия у него источников. Рассмотрение этого же поля в терминах «дальнодействующих» и «близкодействующих» сил приведет нас к выводу, что оно является короткодействующим. По определению оно вряд ли может выйти за пределы взаимодействующих тел. Используя эти соображения, можно тогда рассматривать поглощение фотона электроном как его инерционный коллапс на атоме. И эта довольно странная идея, в конечном итоге, появилась на основе понятий, известных нам со школьной и институтской скамьи.

В заключение хотелось бы отметить. Как и в предыдущих публикациях, мы попытались посмотреть на наш мир взглядом человека, непосредственно не связанного в профессиональной деятельности с областью знаний под названием «физика микромира» и «космология».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Физическая энциклопедия / А. М. Прохоров и др. М.: Большая Рос. энциклопедия. 1992. Т. 3. 672 с.
2. Чжуан-цзы, Ле-цзы / Пер. с кит. В. В. Малявина. М.: Мысль, 1995. 439. с.
3. Фейнман Р. КЭД – странная теория света и вещества / Пер. с англ. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 144. с.
4. Полищук Р. Ф. Современная картина мира. [http://www.chronos.msu.ru/old/RREPORTS/polischuk\\_kartina.pdf](http://www.chronos.msu.ru/old/RREPORTS/polischuk_kartina.pdf)
5. Канавин А. П., Крохин О. Н. Что такое фотон: структура и волновая функция // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 8. С. 711–714. с.
6. Калашников С. Г. Электричество: Учеб. пособ. 6-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 624. с.

7. **Кабардин О.Ф.** Физика. Справ. материалы. Учеб. пособ. для учащихся. 3-е изд. М.: Просвещение, 1991. 367. с.
8. **Кессиди Ф.** От мифа к логосу: Становление греческой философии / А.Е. Зимбули. Алетейя, 2003. 360 с.
9. **Зельдович Я.Б.** Теория вакуума, быть может, решает загадку космологии // Успехи физических наук. Март 1981 г., Т. 133. Вып. 3. С. 479–503.
10. **Хазен А.М.** Введение меры информации в аксиоматическую базу механики. 2-е изд. М.:РАУБ, 1998. 241 с.
11. **Владимиров Ю.С.** Системы отсчета в теории гравитации. М.: Энергоиздат, 1982. 256 с.
12. **Эйнштейн А.** Собрание научных трудов. Работы по теории относительности. 1905–1920. Т. 1. М.: Наука, 1965. 702 с.
13. **Сазоненко И.О., Сазоненко В.И.** Частная теория относительности: взгляд стороннего наблюдателя // Литье и металлургия. 2019. № 4. С. 26–30.
14. Песня из кинофильма «Земля Санникова». сл. Леонида Дербенева.
15. Ученые измерили самый маленький отрезок времени в истории. <https://www.sciencealert.com/scientists-measure-the-smallest-fragment-of-time-ever-witness-an-electron-escaping-an-atom>.
16. **Лешан К.З.** От конечной Вселенной – к дырочному вакууму. <http://holevacuum.narod.ru/>
17. **Хокинг С., Млодинов Л.** Высший замысел / Пер.с англ. СПб.: Амфора. ТИД. Амфора, 2013. 208 с.
18. Физическая энциклопедия. М.: Большая Рос. энциклопедия, 1992. т. 2. 705 с.
19. **Артемьев В.А.** О взаимодействии ультрахолодных нейтронов вблизи поверхности твердых тел // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». 2002. № 2. С. 56–65.
20. Наноантенна. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Наноантенна>.



Поэтическая страничка

### **БОГ И ПРИРОДА**

*Если жизнь – творение природы,  
То ей обязательно нужен творец.  
Бог – глобальный разум природы  
И ее совершенных законов отец.*

*Бог без природы не существует,  
Без Него природа не управляема.  
Они органически взаимосвязаны.  
Без Бога природа не вразумляема.*

*Если Бога оторвать от природы и  
Абсолютизировать – имеем теизм.  
Если природу оторвать от Бога и  
Абсолютизировать – имеем атеизм.*

*Теисты считают: все создал Бог,  
Который находился вне создания,  
Природа была создана из ничего.  
Но из ничего не будет мироздания.*

*Атеисты утверждают, что Бога нет,  
А природа существует по ее канонам.  
Но для этого нужна разумная сила,  
Управляющая природой по законам.*

*Бог разумно организует природу,  
Предотвращая хаоса образование.  
Бог разумно управляет природой,  
Что дает им вечное существование.*

Владимир Стеценко

### **МУДРЫЙ УЧИТЕЛЬ**

*Мудрый учитель Иисус Христос  
Унищивал очень важный вопрос:  
Будут ли у учеников хорошие знания,  
Если учить под страхом наказания?*

*Он называл учеников друзьями,  
Не смотрел на большие авторитеты.  
Но завистливые книжники, фарисеи  
И саддукеи Его не любили за это.*

*А ученики любили Иисуса Христа.  
Это вызывало злобу у фарисеев.  
Они клеветали на Него и говорили,  
Что Он учит против законов евреев.*

*Хитрый Иуда предал Иисуса Христа,  
Возлюбив деньги, дающие успех.  
Но неблагодарный ученик повесился.  
Предать учителя – смертный грех.*

*Мудрый учитель считает, что законы  
Должны быть разумными, для людей.  
Догматы, не соответствующие истине,  
Пожны, рождают много вредных идей.*

*Мудрый учитель добр к ученикам,  
Учит их не под страхом наказания.  
Такая методика очень эффективна.  
Она дает плоды – хорошие знания.*

Владимир Стеценко

# ПАМЯТИ

## Николая Ивановича

### БЕХА

#### 1946–2021



3 апреля ушел из жизни Николай Иванович Бех – председатель Редсоветов журналов «Литейное производство» и «Металлургия машиностроения», Президент ОАО «Звезда-Энергетика», доктор технических наук, доктор транспорта, академик академий РФ – Инженерной и Транспорта, академик международных академий – Инженерной и Бизнеса, Инженерной академии Украины.

После окончания Киевского политехнического института Николай Иванович с 1969 по 1980 г. работал на АвтоВАЗе – инженером-технологом, начальником бюро, начальником отдела, главным инженером металлургического производства. С 1980 по 1984 г. он – директор Литейного завода КамАЗа. Это были не лучшие времена для Литейного завода. КамАЗ лихорадило из-за литых деталей из ковкого чугуна. Новый директор нашел решение – за три с лишним года более 100 тыс. т отливок были переведены на высокопрочный чугун. Личный научный результат – кандидатская, а затем и докторская диссертации. А КамАЗ стал в нашей стране пионером в освоении высокопрочного чугуна. В 1984 г. Н.И. Беха назначают Генеральным директором Камского тракторного завода (г. Елабуга), с 1987 по 1997 г. он – Генеральный директор КамАЗа. С 1997 по 2001 г. Н.И. Бех – советник мэра и Правительства Москвы по промышленной политике, Генеральный директор Московской управляющей финансовой компании, с 2001 по 2002 г. – старший вице-президент АК «Сибур». В 2003 г. он становится Генеральным директором, а с 2005 г. – Президентом ОАО «Звезда-Энергетика». Под его руководством компания заняла лидирующие позиции в области распределенной энергетики.

Николай Иванович Бех активно занимался общественной работой: был народным депутатом СССР, депутатом Верховного Совета Татарской АССР, заместителем председателя Совета по промышленной политике при правительстве СССР. С 1990 по 1991 г. – он член Президентского Совета СССР и попечительского совета независимой организации «Гражданское общество».

По единодушному мнению коллег, Николай Иванович был лидером, способным увлечь и повести за собой людей. Где нужно было сделать невозможное, туда направляли Николая Ивановича. Так было в Елабуге, так было и на КамАЗе. Все поставленные задачи он успешно решал. Мы убеждены, что такие люди рождаются нечасто и существуют вне времени, им подвластно и людей организовать, и промышленным гигантом управлять, и науку двигать, и при этом сохранять скромность и доступность. Все эти трудные годы Николай Иванович активно поддерживал журналы «Литейное производство», «Металлургия машиностроения» и «Библиотека литейщика».

Николай Иванович Бех был награжден орденами: За заслуги перед отечеством III степени, Трудового Красного Знамени, Дружбы Народов, Знак Почета, а также премией Правительства в области науки и техники и золотым почетным знаком «Общественное признание». В 1992 г. Международный географический центр (Кембридж, США) присвоил Н.И. Беху звание «Человек XX века» в области бизнеса. В 2003 г. он получил премию Российской Академии Бизнеса и предпринимательства «Элита Российского бизнеса» в номинации «Патриарх бизнеса».

В 2005 г. Николай Иванович был награжден орденом «Ответственность и благородство» I степени. Николай Иванович был одним из инициаторов создания Российского Союза Промышленников и Предпринимателей (РСПП), вице-президентом которого он являлся в течение 15 лет.

От имени редакции журнала «Литье и металлургия», Ассоциации литейщиков и металлургов Республики Беларусь приносим глубокие соболезнования родным и близким Николая Ивановича, друзьям, коллегам по работе.

## О ЖУРНАЛЕ

Ежеквартальный научно-производственный журнал «Литье и металлургия» – единственный, издаваемый на территории Республики Беларусь, профессиональный журнал для ученых, инженеров и производителей, работающих в области литейного и металлургического производств.

Журнал выпускается на русском с аннотацией на английском языке, который распространяется не только в Беларуси, России, но и более чем в 20 странах мира. В течение последних лет он признается одним из лучших в Европе специализированных изданий.

Журнал выпускается в соответствии с требованиями международной системы SCOPUS, которая предусматривает включение статей авторов в мировые справочно-информационные системы баз данных.

**Подписаться на журнал можно через редакцию, а также через подписные каталоги:**

*РУП «Белпочта», ООО «Информнаука» (РФ), АО «МК-Периодика» (РФ),  
ООО «Прессинформ» (РФ), ГП «Пресса» (Украина), ГП «Пошта Молдовей»,  
АО «Летувос паштас», ООО «Подписное агентство PKS» (Латвия),  
фирма «INDEX» (Болгария)*

Подписной индекс журнала «Литье и металлургия»:  
Ведомственный – **75034**      Индивидуальный – **750342**

### Информация о стоимости размещения рекламы в журнале «Литье и металлургия»

Вид рекламного модуля	Для Республики Беларусь Стоимость в бел. руб. с НДС	Для стран СНГ Стоимость в рос. руб.	Для стран дальнего зарубежья Стоимость в ЕВРО
На обложке (стр. 1, 4 ), полноцветный	619,66	21 350	700
На обложке (стр. 2, 3 ), полноцветный	557,69	19 825	650
Внутри журнала (формат 1/1 ), полноцветный	418,26	13 725	450
Внутри журнала (формат 1/2 ), полноцветный	209,14	7 625	250
Внутри журнала (формат 1/1 ), черно-белый	278,84	7 625	250
Внутри журнала (формат 1/2 ), черно-белый	139,42	3 965	130

Размещение рекламы в очередном номере осуществляется  
только после предварительной оплаты Заказчиком.

#### Адрес и телефоны редакции:

*Республика Беларусь, 220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 24, комн. 8М  
тел. (+375-17) 292-74-75, тел/факс (+375-17) 331-11-16.  
www.alimrb.by E-mail: limrb@tut.by, alimrb@tut.by*

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

## ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ

К публикации принимаются материалы, касающиеся результатов оригинальных научно-технических исследований и разработок, не опубликованные и не предназначенные для публикации в других изданиях. Тематика предоставляемого материала должна соответствовать рубрикам журнала (литейное производство, металлургия, САПР, охрана труда, материаловедение).

Основным критерием целесообразности публикации статьи является ее новизна и информативность.

Статьи должны быть написаны в сжатой и ясной форме и содержать соответствующий индекс УДК; название на русском и английском языках; инициалы и фамилии авторов на русском и английском языках; полное название учреждений (с указанием адреса), в которых выполнялось исследование; аннотацию на русском и английском языках (150–200 знаков).

Редакция журнала подготавливает статьи к предоставлению для включения в зарубежные индексы цитирования SCIVERSE SCOPUS. В связи с этим **необходимо соблюдать основные требования к оформлению статей** (см. [www.alimrb.by](http://www.alimrb.by)).

Необходимо представить экспертное заключение о возможности опубликования материалов в открытой печати.

Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

По решению редколлегии статьи направляются на рецензирование, затем визируются членом редколлегии. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста. Рукописи авторам не возвращаются.

Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи.

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Рукопись предоставляется на бумажном и электронном носителях. Текст набирается на страницах формата А4 в одну колонку, без абзацного отступа, шрифт *Times New Roman*, 12 пт, интервал одиночный. Поля не менее 1,5 см, страницы пронумерованы. Объем не более 8 страниц машинописного текста. Электронный вариант должен быть набран в *MS Word*. Статьи могут быть предоставлены в других форматах только по согласованию с редакцией. Электронный вариант рукописи должен быть идентичен бумажному. В случае расхождений правильным считается бумажный вариант.

Для набора сложных формул использовать формульный редактор *MS Word* или *Mathtape*. Набор простых формул и вставку отдельных символов выполнять через меню «Вставка/символ». Верхние и нижние индексы ( $C^2$ ,  $C_2$ ) выполнять через меню «Формат/шрифт/надстрочный или подстрочный». При наборе греческих символов и математических знаков использовать гарнитуру «Symbol» прямым начертанием, латинские буквы набирать *курсивом*. Формулы в тексте следует нумеровать подряд, в круглых скобках. Нумеровать рекомендуется те формулы, на которые имеются ссылки в последующем тексте.

Если в статье встречаются символы специфической гарнитуры, она должна быть предоставлена вместе со статьёй.

Правильно набирать «10 °С», «10°», «№ 34», «23%», «34–68», «+12°», «42 + 16». Нельзя заменять букву «О» и знак градуса «°» нулем (0).

Таблицы располагаются в тексте статьи и не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Ссылки на литературу приводятся в порядке их появления в тексте статьи и заключаются в квадратные скобки [ ]; цитирование двух или более работ под одним номером не допускается.

## ТРЕБОВАНИЯ К ИЛЛЮСТРАЦИЯМ

Иллюстрации представляются в виде отдельных файлов в форматах *TIF*, *PSD*, *JPEG* (растровые), *AI*, *EPS*, *CDR* (векторные), а также *PDF*. Цветовая модель *RGB* или *CMYK*, разрешение 300 точек на дюйм (dpi). Цветовая модель *Grayscale* или *Bitmap* (серый или черно-белый), разрешение не менее 600 dpi. Использование других форматов файлов допустимо только по согласованию с редакцией.

Формат иллюстрации при верно заданном разрешении в dpi должен на 100 процентов соответствовать формату, с которым она будет печататься. Масштабирования и трансформации в программах ведут к ухудшению качества изображения. Недопустимо сильное увеличение размеров растрового файла (более чем на 50–70 процентов относительно исходного размера), так как это приведет к ухудшению четкости изображения. Формат журнала 210 × 297 мм до реза. Если рисунок должен полностью заполнять страницу журнала, то его размер должен быть не менее данного формата. Информативные текстовые элементы не должны выходить за пределы размера 190 × 277 мм.

Текст на рисунках должен быть набран шрифтом *Arial*, светлый *курсив*. Размер шрифта должен быть соизмерим с размером рисунка (желательно 9 пт). Все обозначения на рисунках должны быть расшифрованы. Подписи к рисункам представляются отдельным файлом в *MS Word* и на отдельной распечатке. Нумерация рисунков и нумерация подписей к ним должны совпадать.

При преобразовании изображений из цветовой модели *RGB* в *CMYK*, не следует использовать общее количество краски, большее, чем 300–320 процентов (параметр *Total ink*).

Если около краев изображения имеются практически безцветные области (например, яркие светлые облака или солнечные блики), то рекомендуется заключать все изображение в тонкую технологическую рамку темного цвета во избежание появления в печати «дыр» по краям картинки.

Крайне не рекомендуется печатать мелкие элементы (например, тонкие линии толщиной 0,1 мм и меньше) или текст размером менее 8 пт с использованием двух или более красок. Те же элементы не рекомендуется печатать белым цветом на составном цветном фоне.

Текстовые блоки в программах векторной графики (*Illustrator*, *CorelDraw*) желательно преобразовать в кривые или предоставить используемые в работе шрифты.

## ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ МОДУЛЯМ

*Реклама внутри журнала* – 205 × 290 мм. *Реклама на обложке*: 1-я стр. – 205 × 225 мм; 4-я стр. – 205 × 280 мм; *внутренние страницы обложки* – 205 × 290 мм. К указанным размерам нужно добавить по 5 мм с каждой стороны для обрезки. Значимые элементы макета должны располагаться не ближе 5 мм от края страницы (10 мм с учетом отступа для обрезки). Требования к изображениям в рекламных макетах аналогичны требованиям к иллюстрациям в статьях. Рекламные модули могут быть предоставлены в других форматах только по согласованию с редакцией.

Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Возвращение статьи автору на доработку не означает, что она принята к печати.

## Литые детали из износостойких чугунов для узлов дробления центробежных мельниц и строительной техники

Разработаны составы синтетических износостойких хромистых чугунов ИЧХ18ВН и ИЧХ18ВМ и способы их литья в комбинированные и металлические формы (кокили). Время работы деталей, изготовленных из данных чугунов, в 1,5–2 раза больше, чем у существующих аналогов.

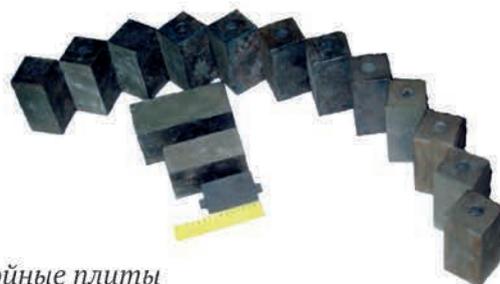
### Для центробежных мельниц



*Кольцо нижнее*



*Конус*



*Отбойные плиты*



*Конус*



*Кольцо входное*



*Подкладные листы*



*Воронка*

### Для строительной техники



*Диски бисерной  
мельницы*



*Лопатки смесителя*



*Ножи шнека*

## Антифрикционный силумин

В Институте разработан и запатентован антифрикционный силумин — новый, относительно легкий и износостойкий сплав на основе алюминия, с высокими механическими и триботехническими свойствами. Применяется для замены бронз, латуни и баббитов при изготовлении деталей, работающих в условиях трения скольжения.

Детали из антифрикционного силумина по механическим свойствам и износостойкости превосходят бронзовые в 2–6 раз.

*Из силумина изготавливают:*

- Направляющие втулок;
- Подшипники скольжения;
- Вкладыши;
- Шестерни червячных колес;
- Поршни гидроцилиндров;
- Другие детали, работающие в условиях трения скольжения.

*Технические характеристики:*

Твердость, НВ .....	110–150
Временное сопротивление разрыву, МПа.....	300–450
Относительное удлинение, % .....	1–5
Допустимая нагрузка (по результатам испытаний), кН .....	1250
Коэффициент трения скольжения со смазкой .....	0,05–0,1
Коэффициент трения скольжения при сухом трении .....	0,12–0,2

Специальная термическая обработка заготовок по ускоренному режиму позволяет получить глобулярные кристаллы кремния и повысить механические и триботехнические свойства деталей. Антифрикционный силумин обладает высокой коррозионной стойкостью и малочувствителен к нефти, газовому конденсату, бензину, керосину, воде и атмосферным загрязнениям; не применяется в щелочных средах, соляной и серной кислотах.



# Литейное производство и металлургия 2021. Беларусь

## Уважаемые коллеги!

Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь и Белорусский национальный технический университет приглашают Вас и Ваших партнеров принять участие в 29-й Международной научно-технической конференции и информационной выставке «Литейное производство и металлургия 2021. Беларусь», которая состоится 17–19 ноября 2021 г. в Минске по адресу: пр-т Победителей, д. 19, гостиничный комплекс «Юбилейный»

## Тематика конференции:

- Литейное производство.
- Металлургия и материаловедение.

Предлагаем Вам принять участие в работе конференции и выступить с докладом или презентацией вашего предприятия. Данные материалы будут включены в сборник трудов конференции. Требования к оформлению публикаций указаны на сайте [www.alimrb.by](http://www.alimrb.by).

В рамках конференции будет проходить награждение Лауреатов премий Ассоциации литейщиков и металлургов РБ по следующим номинациям:

- «Лучший инновационный проект, внедренный на литейном и металлургическом производствах, направленный на повышение качества продукции, энерго- и ресурсосбережение»
- «Лучшая научно-производственная работа молодого ученого (инженера)» (премия им. Д. М. Кукуя).



Координаты оргкомитета:  
220013, г. Минск,  
ул. Я. Коласа 24, комн. 8м  
Тел./факс: +375 17 331 11 16,  
e-mail: [alimrb@tut.by](mailto:alimrb@tut.by)



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
**РЕЧИЦКИЙ МЕТИЗНЫЙ ЗАВОД**

[www.rmz.by](http://www.rmz.by)

## Основные направления деятельности:

- Ресурсосберегающие технологии в металлургии и литейном производстве
- Комплексные проекты по созданию новых и модернизации действующих литейных предприятий и цехов
- Технологии и оборудование для производства отливок из цветных и железоуглеродистых сплавов
- Технологии и оборудование для производства песчаных стержней
- Смесеприготовительное оборудование
- Формовочное оборудование
- Проектирование и изготовление литейной технологической оснастки
- Мелкосерийное литье



*Машина стержневая*



*Комплекс стержневой*



*Машина центробежная карусельная*



*Машина кокильная карусельная*



*Комплекс кокильный*



*Машина кокильная специальная (наклонная)*



*Комплекс оборудования для изготовления форм и стержней из ХТС*

## Смесители для приготовления песчано-смоляных смесей



*Непрерывного действия*



*Периодического действия*



*Комплекс смесеприготовительный*

## ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

Беларусь, 220118, г.Минск, ул.Машиностроителей, 28/2

Тел.: +375 17 341 0822. Факс: +375 17 340 0322

[belniilit@belniilit.by](mailto:belniilit@belniilit.by); [marketing@belniilit.by](mailto:marketing@belniilit.by)

[www.belniilit.by](http://www.belniilit.by)

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОЙ ОСНАСТКИ



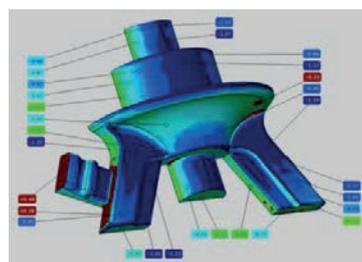
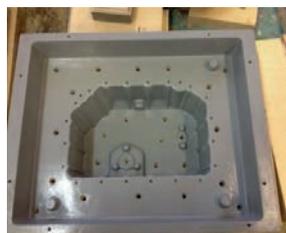
ОАО «БЕЛНИИЛИТ» проектирует и изготавливает сложнопрофильную оснастку для литейного производства с применением станков с ЧПУ.



## ОАО «БЕЛНИИЛИТ» осуществляет изготовление:

- комплектов модельной оснастки (из древесины, металла или пластика) для получения отливок деталей машиностроения любой сложности;
- кокилей любой сложности;
- комплектов модельной оснастки для отливок по оригиналам деталей без специальной конструкторской документации с применением оптической оцифровки.

Полный цикл изготовления - от проектирования отливки и оснастки по чертежу детали, изготовления оснастки до отработки технологии и изготовления опытных форм, стержней и отливок. Все это позволяет сократить сроки запуска оснастки в производственную эксплуатацию и освоение производства.



## Преимущества при изготовлении оснастки в ОАО «БЕЛНИИЛИТ»:

- неограниченный размер оснастки из дерева или пластика;
- срок проектирования и изготовления – от нескольких дней;
- стоимость ниже за счет применения инновационных технологий;
- для изготовления модельной оснастки используется различный материал;
- поставка совместно с оборудованием и отработкой технологии «под ключ».



## ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

Беларусь, 220118, г.Минск, ул.Машиностроителей, 28/2

Тел.: +375 17 341 0822. Факс: +375 17 340 0322

[belniilit@belniilit.by](mailto:belniilit@belniilit.by); [marketing@belniilit.by](mailto:marketing@belniilit.by)

[www.belniilit.by](http://www.belniilit.by)

# **BELARUS** **MINSK TRACTOR WORKS**

*Минскому  
тракторному заводу  
75 лет!*

**75**  
1946  
2021



**От души поздравляем коллектив и руководство завода с юбилеем!  
Пусть эта значимая дата станет еще одним шагом вперед  
на пути освоения новых горизонтов, улучшения благосостояния,  
увеличения прибыли, исполнения всех задуманных планов и проектов!  
Желаем успеха и процветания!**

*Редакция журнала «Литье и металлургия»,  
Ассоциация литейщиков и металлургов Беларуси*