

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.

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.



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.



ЛИТЬЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

2021 г., № 1

Ежеквартальный научно-производственный журнал.
Выпускается на русском, с аннотацией на английском языке;
распространяется в БЕЛАРУСИ, РОССИИ, УКРАИНЕ, ЛИТВЕ, КАЗАХСТАНЕ,
ЧЕХИИ, ПОЛЬШЕ, ГЕРМАНИИ, ФРАНЦИИ.
Журнал издаётся 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

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

Подписано в печать 00.00.2020. Выход в свет .2020. Формат 60×84%. Цена свободная

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 00,0. Уч.-изд. л. 00,00. 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.

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
Анелкин 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., менеджер по региональным продажам в СНГ,
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
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. Л., д-р техн. наук, доцент, БНТУ, г. Минск, Беларусь
Садох М. А., канд. техн. наук, доцент, БНТУ, г. Минск, Беларусь
Стеценко В. Ю., канд. техн. наук, доцент, ГНУ ИТМ НАН Белару-
си, г. Могилев, 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

FOUNDRY PRODUCTION AND METALLURGY

2021, no. 1

Quarterly 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 «BELNILIT», 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 Metizny Plant», Rechitsa

PUBLISHER

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

CHAIRMAN OF EDITORIAL COUNCIL

Kharityonchik 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 Science, Associate Professor, BNTU, Minsk, Belarus

Samonchik V. G., OJSC Rechitsa Metizny 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 Science, 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., Area Sales Manager in CIS, 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

Nememenok 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

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 00,0. Account. publ. pages 00,00. 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

С ЮБИЛЕЕМ

Шинский О. И. (к 75-летию со дня рождения)	8
Прушак В. Я. (к 65-летию со дня рождения).....	9
Клименко С. И. (к 60-летию со дня рождения).....	11
Демченко Е. Б. (к 70-летию со дня рождения).....	12
Ровин С. Л. (к 55-летию со дня рождения)	13

КОНФЕРЕНЦИЯ

Ровин С. Л., Садоха М. А., БНТУ 28-я Международная научно-техническая конференция «Литейное производство и металлургия 2020. Беларусь», посвященная 100-летию БНТУ	14
Колтыгин А. В., Белов В. Д., Титов А. Ю., НИТУ «МИСиС», Москва, Россия Итоги X Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии».....	20

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Попов Е. С., ООО «М-ЛИТ», г. Никополь, Украина, Шинский О. И., ФТИ металлов и сплавов НАН Украины Анализ показателей качества колодок тормозных чугуновых и композиционных для железнодорожного подвижного состава	27
Садоха М. А., БНТУ, Андрушевич А. А., БГАТУ Технологии рафинирования алюминиевых сплавов продувкой газами	38
Ровин С. Л., БНТУ, Ровин Л. Е., Жаранов В. А., ГГТУ им. П. О. Сухого Получение чугуна при плавке минерального сырья в коксовых вагранках	43
Ткаченко С. С., Емельянов В. О., Мартынов К. В., филиал РАО «Творческая мастерская «Литейный двор» Современная технология литья по выплавляемым моделям для производства художественных отливок	49
Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., ГНУ ИТМ НАН Беларуси, Стеценко А. В., МОУВО «Белорусско-Российский университет» Методика физического моделирования макропроцессов затвердевания отливок на прозрачных моделях и жидкостях	53
Покровский А. И., Хина Б. Б., Толкачева О. А., ГНУ ФТИ НАН Беларуси Аусферритный (бейнитный) чугун: гармонизация международного стандарта ISO 17804 применительно к условиям Беларуси	56

МЕТАЛЛУРГИЯ

Пости А. И., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Влияние микролегирования стали ниобием на механические свойства термоупрочненной арматуры.....	73
Сидоренко Т. И., Возная В. И., Радионов А. В., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Выявление причин несоответствия механических свойств в деталях из борсодержащей стали	78
Макаров В. А., Савостеенко Т. К., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Определение массовой доли фосфора в сталях методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой	86
Дайнеко О. В., Калиновская Л. Ф., Бессонов Н. В., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Особенности метрологического контроля бесконтактных систем измерения геометрических размеров металлопродукции	91

Новиков Ф. М., Козырева Ю. И., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Пути повышения стойкости режущего инструмента (спеченных твердосплавных ножей) при производстве стальной фибры.....	95
Андреев Д. В., БНТУ Исследование эффективности сыродутного способа получения углеродистых сталей на территории современной Беларуси в доиндустриальный период	100
Римошевский С. Л., Прокопчук Д. А., Голуб Д. М., ОАО «БЕЛНИИЛИТ» Исследование процессов переработки пыли газоочистки сталеплавильных производств	106

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Черниченко Ю. Д., Верещагин М. Н., Целуева С. Н., ГГТУ им. П. О. Сухого, Целуев М. Ю., Институт механики металлополимерных систем им. Белого НАН Беларуси Взаимодействие лазерного излучения с материалом при получении порошков и волокон	114
Константинов В. М., Дашкевич В. Г., Плетенев И. В., БНТУ Исследование особенностей структуры и свойств термодиффузионных жаростойких покрытий на меди	124
Панасюгин А. С., БНТУ, Машерова Н. П., Цыганов А. Р., БГТУ, Павловский Н. Д., Гродненский государственный медицинский университет Обезвреживание паров растворителя марки 646 адсорбционно-каталитическим методом	130
Витязь П. А., НАН Беларуси, Николайчик Ю. А., Ровин С. Л., БНТУ, Свидуневич Н. А., Кунс Д. В., БГТУ Оборудование и технологии получения и использования наноструктурированных материалов	137
Жумаев А. А., Навойское отделение Академии наук Республики Узбекистан, Барановский К. Э., БНТУ, Мансуров Ю. Н., Институт общей и неорганической химии Академии наук Республики Узбекистан Анализ микроструктуры износостойких хромистых чугунов после термической обработки	142

ОХРАНА ТРУДА

Лазаренков А. М., Иванов И. А., БНТУ Исследование условий труда работающих в цехах алюминиевого литья	149
---	-----

ИНФОРМАЦИЯ

Витязь П. А., Толстой А. В., ГНУ ОИМ НАН Беларуси Итоги выполнения заданий программы «Металлургия» в 2016–2020 гг. и перспективы на 2021–2025 гг.	155
Поэтическая страничка	168
Памяти Яскевич И. А.	169
Памяти Гацуру В. М.	170
Памяти Жуковского С. С.	171

CONTENTS

Subscription 75034

HAPPY ANNIVERSARY

Shinsky O.I. (on the occasion of the 75th birthday)	8
Prushak V. Ya. (on the occasion of the 65th birthday)	9
Klimenko S.I. (on the occasion of the 60th birthday)	11
Demchenko E.B. (on the occasion of the 70th birthday)	12
Rovin S.L. (on the occasion of the 55th birthday)	13

CONFERENCE

Rovin S.L., Sadokha M.A. , BNTU 28-th International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2020. Belarus” dedicated to the 100th anniversary of BNTU	14
Koltygin A.V., Belov V.D., Titov A. Yu. , NUST “MISiS” Results of the X International scientific and practical conference “Progressive casting technologies”	20

FOUNDRY

Popov E.S. , LLC “M-LIT”, Shinsky O.I. , Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine Performance quality analysis of brake iron and composite pads for railway rolling composition	27
Sadokha M.A. , BNTU, Andrushevich A.A., Belarusian State Agrarian Technical University Technologies of refining of aluminum alloys by gas blowing	38
Rovin S.L. , BNTU, Rovin L.E., Jaranov V.A. , Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoj Production of cast iron during the melting of mineral raw materials in coke cupolas	43
Tkachenko S.S., Emelyanov V.O., Martynov K.V. , Branch of the Russian Academy of Arts “CREATIVE WORKSHOP “FOUNDRY YARD” Modern technology of investment casting for the production of artistic castings	49
Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu. , Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Stetsenko A.V. , Belarusian-Russian University Method of physical simulation of macro processes of solidification of castings on transparent models and liquids	53
Pokrovskii A.I., Khina B.B., Tolkacheva O.A. , The Physical-Technical Institute National Academy of Sciences of Belarus Ausferritic (bainitic) cast iron: Harmonization of international standard ISO 17804 in application to the conditions of Belarus	56

METALLURGY

Posti A.I. , OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC” Effect of micro alloying of steel with niobium on the mechanical properties of heat-strengthened rebar	73
Sidorenko T.I., Voznaya V.I., Radionov A.V. , OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC” Identification of reasons for non-compliance of mechanical properties in boron-containing steel parts	78
Makarov V.A., Savosteenko T.K. , OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC” Determination of phosphorus mass fraction in steels of plasma atomic emission spectrometry	86
Daineko O.V., Kalinovskaya L.F., Bessonov N.V. , OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC” Particularities of metrological control of non-contact systems for measuring the geometric dimensions of metal products	91

Novikov F. M., Kozyreva Yu. I. , OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC” The ways to increase the durability of cutting tools (sintered carbide knives) in the production of steel fiber	95
Andreev D. V. , BNTU Research of the efficiency of the one-step process for producing carbon steels on the territory of modern Belarus in the pre-industrial period	100
Rimoshevsky S. L., Prokopchuk D. A., Golub D. M. , OJSC “BELNIIIT” Investigation of the processes of dust processing gas cleaning of steelmaking industries	106

SCIENCE OF MATERIALS

Chernichenko Y. D., Vereschagin M. N., Tselueva S. N. , Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj, Tseluev M. Yu. , Belyi Metal-polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus Interaction of laser radiation with the material during production powders and fibers	114
Konstantinov V. M., Dashkevich V. G., Pletenev I. V. , BNTU Study of structure features and properties of thermodiffusion heat resistant coatings on copper	124
Panasyugin A. S. , BNTU, Masherova N. P., Tsyganov A. R. , Belarusian State Technological University, Pavlovskiy N. D. , Grodno State Medical University Neutralization of solvent vapors of brand 646 by the adsorption-catalytic method	130
Vityaz P. A. , National Academy of Sciences of Belarus, Nikalaichyk Yu. A., Rovin S. L. , BNTU, Kuis D. V., Svidunovich N. A. , Belarusian State Technological University Equipment and technologies for the production and use of nanostructured materials	137
Jumaev A. A. , Navoi branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Baranovsky K. E. , BNTU, Mansurov Yu. N. , Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan Analysis of the microstructure of wear resistant chrome cast irons after heat treatment	142

PROTECTION OF LABOUR

Lazarenkov A. M., Ivanov I. A. , BNTU Study of working conditions in aluminum casting shops worksites	149
---	-----

INFORMATION

Vitiaz P. A., Tolstoy A. V. , Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus The results of the tasks of the subprogram “Metallurgy” obtained in 2016–2020 and prospects for the years 2021–2025	155
Poetic page	168
In memory of Yaskevich I. A.	169
In memory of Gatsuro V. M.	170
In memory of Zhukovsky S. S.	171

С юбилеем!

Олег Иосифович ШИНСКИЙ

(к 75-летию со дня рождения)



Олег Иосифович Шинский родился 12.01.1946 г. В 1969 г. он окончил Киевский политехнический институт по специальности «Литейное производство» и всю свою трудовую и научную деятельность посвятил техническому развитию и популяризации этого направления.

Научную деятельность Олег Иосифович начал в 1974 г. поступлением в аспирантуру Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины (Институт проблем литья АН УССР), где продолжает работать и по настоящее время. В 1983 г. защитил кандидатскую, в 1997 г. – докторскую диссертацию, а в 1998 г. получил ученое звание профессора. С 1989 г. до настоящего времени работал в должности заведующего отделом, главного научного сотрудника, заместителя директора по научной работе.

Олег Иосифович Шинский – известный ученый в области литейного производства, в частности новых специальных методов литья. Основным научным направлением его исследований является разработка теории и технологии получения отливок из цветных и железоуглеродистых сплавов с заданными структурой и свойствами, которые можно получить воздействием на жидкий и твердеющий металл, использованием специальных литейных моделей и форм, созданием функциональных свойств деталей с помощью армирования дисперсными материалами или армирующими элементами.

На основе фундаментальных исследований закономерностей гидродинамических, тепломассообменных процессов в литейной форме с дисперсных сыпучих металлических и неметаллических материалов, которые физически укрепляются вакуумированием или замораживанием, созданы научные и технологические основы получения отливок из цветных и железоуглеродистых сплавов, в том числе с функциональными свойствами, методом литья по газифицируемым моделям.

Под его руководством разработаны разновидности технологических процессов, в частности, с использованием армирующих элементов в пенополистироловых моделях, с поровыми моделями (для уменьшения количества продуктов термодеструкции), разработаны системы контроля и мониторинга литейных процессов и экологического состояния окружающей среды.

Олег Иосифович постоянно занимается популяризацией научных разработок литейного производства, является президентом Всеукраинской ассоциации литейщиков Украины и принимает участие в выставках, конференциях, съездах, форумах.

Свои знания и опыт профессор О. И. Шинский передает студентам. Он читал лекции в НТУУ «Киевский политехнический институт им. Сикорского», Восточноукраинском национальном университете им. В. Даля, НТУ «Харьковский политехнический институт», Одесском национальном политехническом университете.

Олег Иосифович подготовил 14 кандидатов и 5 докторов технических наук (защитены диссертации), а в настоящее время руководит работой 2 аспирантов. Он является членом Ученого совета ФТИМС НАН Украины и Специализированного ученого совета по защите диссертаций, входит в состав редакционной коллегии журналов «Процессы литья» и «Металл и литье Украины».

Результаты научных разработок О. И. Шинского приведены в 492 научных работах, из которых 167 статей в профессиональных изданиях, 2 монографии, 196 авторских свидетельств и патентов.

Новые технологии получения литья, которые были созданы под руководством О. И. Шинского, внедрены в производство на предприятиях Украины, Беларуси, Вьетнама, Польши, Румынии, Индии, Венгрии.

За время трудовой, научной, педагогической деятельности О. И. Шинский показал не только свой профессионализм, аналитические способности, логическое мышление, способность к самосовершенствованию, но и качества, необходимые для успешной работы в управлении творческим коллективом, а именно организаторские способности, дисциплинированность, ответственность, целеустремленность, порядочность.

За активную научную, педагогическую деятельность и развитие украинской науки, высшей школы и литейного производства Украины Олег Иосифович Шинский представлен в «Золотой книге деловой элиты Украины» и «Золотой книге национальной элиты Украины».

Олег Иосифович – Заслуженный изобретатель НАН Украины, член-корреспондент академии технологических наук Украины, номинант изданий «Золотая книга национальной элиты Украины» и «Золотая книга деловой элиты Украины».

Редакция журнала «Литье и металлургия», Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь сердечно поздравляют Олега Иосифовича с юбилеем и желают ему успехов во всех начинаниях и творческого долголетия.

С юбилеем!

Виктор Яковлевич ПРУШАК

(к 65-летию со дня рождения)



24 января 2021 г. исполнилось 65 лет со дня рождения Виктору Яковлевичу Прушаку, члену-корреспонденту НАН Беларуси, доктору технических наук, профессору, Заслуженному изобретателю Республики Беларусь, Почетному гражданину г. Любань, директору ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством».

В. Я. Прушак родился в д. Яминск Любанского района Минской области. В 1978 г. окончил машиностроительный факультет Новополоцкого политехнического института и был направлен на работу на Гомельский литейный завод «Центролит». В 1978–1980 гг. служил в Советской армии. С 1980 по 1988 г. работал на Солигорском ремонтно-механическом заводе инженером-технологом, начальником инструментального участка, начальником механосборочного цеха. С 1988 г. работал директором строящегося Солигорского завода технологического оборудования, с 1993 г. – директором Института проблем ресурсосбережения, с 1999 г. – техническим директором, с 2017 г. – директором ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с опытным производством» (СИПРс ОП).

В 2000 г. окончил Московский государственный открытый университет (горный инженер-механик), а также защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. В 2001 г. ему присвоено ученое звание профессора, в 2014 г. он избран членом-корреспондентом НАН Беларуси.

Виктор Яковлевич Прушак является известным ученым в области геотехнологии и горного машиностроения, создателем горной машиностроительной отрасли в Республике Беларусь, под руководством научной школы которого разработаны импортозамещающий комплекс горнодобывающего оборудования, ресурсосберегающие технологии подземной выработки соляных пластов в сложных горногеологических условиях Старобинского месторождения, предложил ряд технологий добычи и переработки калийных удобрений в Республике Беларусь.

За сравнительно исторически короткий отрезок он подготовил около 30 докторов и кандидатов наук, большинство из которых успешно трудится и решает многие важнейшие проблемы в ЗАО «СИПР с ОП» научно-технического и инжинирингового сопровождения работы ОАО «Беларуськалий».

Неуемная энергия, талант организатора, ученого, педагога, генератора ключевых идей и оригинальных решений, огромное трудолюбие, стремление поддержать коллег, перспективную молодежь – вот главные отличительные особенности характера В. Я. Прушака.

Он принимает активное участие в подготовке инженерных и научных кадров для горнодобывающей отрасли в ряде технических вузов Беларуси, опубликовал около 300 научных и методических работ, в том числе 12 монографий, ряд учебников и учебных пособий, 166 патентов и авторских свидетельств на изобретения.

Является членом редколлегии ряда авторитетных научно-технических журналов Беларуси, признаваемых ВАК: «Вестник Гродненского государственного университета им. Янки Купалы», «Вестник Полоцкого государственного университета», «Литье и металлургия», а также главным редактором созданного им журнала «Горная механика и машиностроение».

Многие машиностроительные изделия специального назначения, созданные на основе работ В. Я. Прушака, успешно работают не только в Беларуси, но и в России, Украине, Литве, Латвии.

Закономерно, что результаты труда В. Я. Прушака отмечены высокими наградами: Государственной премией Республики Беларусь (2000 г.) в области науки и техники «Разработка и освоение производства подъемно-транспортного оборудования для горнодобывающей промышленности Республики Беларусь»; медалью «За трудовые заслуги» (2006 г.); золотой медалью Всемирного общества интеллектуальной собственности в сфере интеллектуальной собственности (2010 г.); многими Почетными Грамотами, в том числе НАН Беларуси и одной из самых высоких – Почетный гражданин г. Любань (2006 г.).

В. Я. Прушак редкой щедрости и доброй души человек, прекрасный семьянин. Редколлегия журнала «Литье и металлургия», к которой присоединяются многие знающие его представители НАН Беларуси и промышленности, желают юбиляру доброго здоровья, благополучия и дальнейших творческих достижений.

Прушаку Віктару Якаўлевічу!

Хто б мог згадаць нямала год назад
Што ён хлапчук звычайны з весачкі Ямінска
Такіх вышынь адолее падрад
Якіх адужаў рэдка хто з сталіцы Мінска.

Прафесар, доктар, член-карэспандэнт,
Заслужаны у Беларусі вынаходнік
Пачаў навуку ў Полацку як абітурыент
І разам з тым ля дома - агароднік.

Галоўнае ж ён шчодры чалавек
І шчыры да сяброў, сям’і і на рабоце
Свой талент, інтэлект за ўвесь свой век
Ён дорыць людзям і заўжды ў турбоце.

Такіх як ён патрэбна пашукаць,
Знайсці падобных Прушаку зусім няпроста!
Яму сардэчна застаецца пажадаць
Здароўя добрага, у далейшым росту.

І дзякуючы чыстым сельскім караням
Бацькоў наказам як святой малітве
Ўдзячны ён усім прайшоўшым дням
Бо ў кожны з дзён ён як салдат у бітве.

С юбилеем!

Степан Иванович КЛИМЕНКО

(к 60-летию со дня рождения)



1 января 2021 г. исполнилось 60 лет ведущему литейщику Украины, директору Государственного Департамента литейного производства Украины, вице-президенту Ассоциации литейщиков Украины, кандидату технических наук, старшему научному сотруднику Степану Ивановичу Клименко.

В 1979 г. С.И. Клименко закончил Бердичевский машиностроительный техникум по специальности «Литейное производство черных и цветных металлов», в 1989 г. – Киевский политехнический институт по той же специальности с присвоением квалификации инженер-технолог-металлург.

Свою трудовую деятельность начал мастером чугунолитейного цеха в Научно-производственном объединении «Большевик», г. Киев.

В 1996 г. был назначен директором Государственного Департамента литейного производства Украины при Минмашпроме и НАН Украины.

За время работы в Департаменте решал вопросы развития и оптимизации работы предприятий литейной отрасли Украины. Под его руководством разрабатывалась программа «Техническое перевооружение и структурная перестройка литейного производства Украины», а также принимал непосредственное участие при создании программ развития машиностроения. Проводил исследования по изучению состояния мощностей литейного производства и потребностей в литейной продукции на отечественном и мировых рынках, а также по анализу путей выхода отрасли из кризисного состояния. Под руководством С.И. Клименко в Департаменте были подготовлены проекты законов Украины и разработаны концепция развития отрасли, государственные отраслевые стандарты, предложения по приоритетным направлениям научно-технических программ.

Клименко Степан Иванович принимает активное участие в обмене опытом среди литейщиков России, Беларуси и Украины, неоднократно выступал с докладами на съездах литейщиков России, Беларуси. Награжден медалью Российской ассоциации литейщиков «За верность профессии».

Принимает активное участие в организации и проведении международных и отраслевых выставок, ярмарок, конгрессов, конференций и совещаний.

В 2015 г. С.И. Клименко защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук в области новых направлений литейных технологий: «Технология производства отливок головок и блоков цилиндров двигателей из серого и высокопрочного чугуна по газифицированным моделям с принудительным охлаждением формы хладагентами». Имеет более 100 опубликованных работ в научных специализированных изданиях, в том числе авторские свидетельства на изобретения и патенты Украины.

Совместно с Физико-технологическим институтом металлов и сплавов Национальной академии наук Украины ведет научные исследования, результаты которых внедряются на предприятиях отрасли.

Благодаря координации работы между предприятиями и ведущими академическими и отраслевыми институтами были успешно внедрены современные передовые технологии, за что Степан Иванович в 2008 г. был награжден Президентом НАН Украины Б. Е. Патоном медалью «За содействие в развитии науки», а также в 2011 г. отмечен грамотой Министра промышленной политики Украины и золотым орденом «За трудовые заслуги».

За большой вклад в развитие международного сотрудничества Украины со странами СНГ отмечен нагрудным знаком «Почетный литейщик» и «Знаком Пошани» Украинской ассоциацией литейщиков. В 2020 г. Степан Иванович награжден Почетной грамотой за высокий профессионализм и весомый личный вклад в развитие литейного и машиностроительного комплекса Украины.

Редакция журнала «Литье и металлургия», Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь от всей души поздравляют Степана Ивановича с 60-летием и желают крепкого здоровья, счастья, долгих лет жизни и свершения всех планов.

С юбилеем!

Евгений Борисович ДЕМЧЕНКО

(к 70-летию со дня рождения)



31 января 2021 г. исполнилось 70 лет со дня рождения доцента кафедры «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов», кандидату технических наук, доценту Евгению Борисовичу Демченко.

Е. Б. Демченко родился в г. Минске. В 1974 г. окончил механико-технологический факультет Белорусского политехнического института (БПИ). Трудовую деятельность начал в 1968 г. в АН БССР в качестве лаборанта и продолжил ее в 1972–1974 гг. в БПИ, работая лаборантом по совместительству на кафедре «Машины и технология литейного производства».

С 1974 по 1976 г. служил в Вооруженных Силах СССР. С 1976 г. работал в БПИ инженером, младшим научным сотрудником, научным сотрудником, старшим научным сотрудником научно-исследовательской лаборатории «Прогрессивные технологические процессы производства отливок» кафедры «Литейное производство черных и цветных металлов».

В 1985 г. Е. Б. Демченко окончил очную аспирантуру, а в 1989 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Литейное производство». С 1989 г. и по настоящее время работает на кафедре «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов», а с 1991 г. – доцентом.

Е. Б. Демченко специализируется в областях литейного и металлургического производства, контактной сварки, защитных покрытий, систем автоматизированного проектирования, технологии конструкционных материалов. Им опубликованы более 100 научных и методических работ, в том числе один учебник, две монографии, получены 10 патентов и авторских свидетельств на изобретения Республики Беларусь.

Евгений Борисович является ученым секретарем кафедры, руководит аспирантом, дипломным проектированием студентов специальности «Оборудование и технология сварочного производства». Являясь членом учебно-методического объединения вузов Республики Беларусь, активно участвует в разработке образовательных стандартов и учебных планов БНТУ.

Е. Б. Демченко – грамотный специалист и педагог, пользуется заслуженным авторитетом у коллег и студентов, активно пропагандирует здоровый образ жизни. За добросовестный труд он неоднократно поощрялся руководством университета, в том числе Почетной Грамотой БНТУ.

Желаем юбиляру доброго здоровья, дальнейшего роста, творческих успехов в научной и педагогической деятельности!

Что скажем Демченко ко дню рождения?

Высок, физически силен

С момента на свет появления

Умом и силой наделён.

Доцент, литейщик по призванию

Не топчется на месте никогда

И к воинскому капитана званию

Ученые отличья добавляет иногда.

Трудяге, не в союзе с ленью!

Желаем дальше так держать

А молодому поколению

Таким как он стремиться подражать.

Коллектив кафедры «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов»,
редакция журнала «Литье и металлургия»

С юбилеем!

Сергей Леонидович РОВИН

(к 55-летию со дня рождения)



9 марта 2016 г. исполнилось 55 лет со дня рождения доктору технических наук, доценту, заведующему кафедрой «Машины и технология литейного производства» БНТУ Сергею Леонидовичу Ровину.

В 1983 г. он с золотой медалью закончил школу и поступил в БПИ на специальность «Машины и технология литейного производства». С тех пор его жизнь неразрывно связана с литейным производством и БПИ-БГПА-БНТУ. Во время учебы он был ленинским стипендиатом, секретарем комитета комсомола специальности, активно участвовал в студенческой научно-исследовательской работе. В 1988 г. с отличием закончил механико-технологический факультет БПИ и был распределен инженером на родную кафедру. В декабре 1993 г. Сергей Леонидович успешно закончил аспирантуру и распределился в лабораторию материаловедения и технологии литейного производства БГПА, где проработал до 2001 г., пройдя путь от младшего научного сотрудника до заведующего лабораторией. В 1998 г. С. Л. Ровин защитил кандидатскую диссертацию. А в декабре 2001 г. стал директором научно-производственного республиканского унитарного предприятия «Технолит» – первого дочернего предприятия инновационного научно-технологического парка БНТУ «Политехник», которое возглавлял до конца 2018 г. Под его руководством УП «Технолит» стало одним из ведущих инжиниринговых предприятий Республики Беларусь, занятых конструированием, проектированием и внедрением нового оборудования и технологий в области литейного производства и металлургии. Разработки и продукция предприятия получили широкую известность не только у нас в стране, но и за ее пределами. Многие разработки УП «Технолит» отмечены медалями и грамотами представительных международных выставок и форумов. Дважды (в 2005 и 2008 гг.) Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь признавала УП «Технолит» лучшим инновационным предприятием отрасли. В 2009 г. разработка предприятия «Ротационная наклоняющаяся печь для переработки стальной и чугуновой стружки» была удостоена Премии Министерства промышленности РБ. В 2012 г. работа С. Л. Ровина в должности директора УП «Технолит» была отмечена Почетной грамотой Министерства образования Республики Беларусь, в 2018 г. Почетной грамотой ректора БНТУ, а в 2017 г. Сергей Леонидович стал Лауреатом Премии Ассоциации литейщиков и металлургов Республики Беларусь «За исследование и разработку технологии и оборудования для рециклинга дисперсных металлоотходов».

С 2007 г. С. Л. Ровин по совместительству занимался преподавательской деятельностью, читая лекции по специальным дисциплинам на кафедре «Машины и технология литейного производства» БНТУ. В 2015 г. ему было присвоено ученое звание доцента. В 2018 г. Сергей Леонидович защитил докторскую диссертацию «Технология и оборудование малотоннажного рециклинга дисперсных металлоотходов в ротационных печах с получением высококачественных шихтовых материалов для литейного производства», которая была признана ВАК Республики Беларусь лучшей диссертацией года в области технических наук.

В декабре 2018 г. Сергей Леонидович Ровин возглавил кафедру «Машины и технология литейного производства», став достойным продолжателем славных традиций его знаменитых предшественников А. М. Дмитриевича, Е. И. Бельского и Д. М. Кукуя.

С. Л. Ровин является автором двух монографий, 12 патентов Республики Беларусь и Российской Федерации, более 160 печатных работ, членом научных собраний МТФ и ЭФ по предварительной экспертизе диссертаций, членом редколлегии журналов «Литье и металлургия» и «Technical Science and Innovation», Республиканского сборника научных трудов «Металлургия».

Сергей Леонидович увлекается спортом и экстремальным туризмом, ежегодно ходит в горные и водные походы самых высоких категорий сложности, является мастером спорта по спортивному туризму.

Сердечно поздравляем юбиляра, желаем ему крепкого здоровья, долгих лет активной творческой деятельности и дальнейшего плодотворного сотрудничества с нашим журналом.



28-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МЕТАЛЛУРГИЯ 2020. БЕЛАРУСЬ», ПОСВЯЩЕННАЯ 100-ЛЕТИЮ БНТУ

*С. Л. РОВИН, М. А. САДОХА, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр-т Независимости, 65. E-mail: rovinsl@mail.ru*

С 25 по 27 ноября в г. Минске в гостиничном комплексе «Юбилейный» прошла 28-я Международная научно-техническая конференция «Литейное производство и металлургия 2020. Беларусь», посвященная 100-летию БНТУ. Главная цель конференций, которые начиная с 1993 г. ежегодно проводит Ассоциация литейщиков и металлургов РБ, – это развитие отечественного литейного и металлургического производств, повышение качества и конкурентоспособности белорусской продукции, а также экологичности и безопасности производства. Программа конференции 2020 г. включала в себя пленарное заседание, работу секций «Литейное производство» и «Металлургия и материаловедение», круглый стол, посвященный «Достижениям Белорусского металлургического завода в области производства и применения стали для автомобилестроения», а также экскурсию по литейным цехам ОАО «МТЗ».

Торжественное открытие конференции состоялось 25 ноября в гостиничном комплексе «Юбилейный». В президиум конференции были приглашены заместитель председателя Ассоциации литейщиков и металлургов Республики Беларусь, академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., дважды лауреат Госпремий БССР и РБ, Заслуженный изобретатель РБ Евгений Игнатьевич Марукович, руководитель представительства Ассоциации литейщиков Китая в Российской Федерации и странах СНГ Хань Юй-синь, проректор по научной работе БНТУ, член-корреспондент НАН Беларуси, д-р техн. наук Александр Михайлович Маляревич.

В этом году конференция впервые проводилась в off- и on-line режиме. Это позволило, несмотря на тяжелую эпидемическую ситуацию, выступить докладчикам из самых разных уголков мира, и послушать их выступления десяткам студентов БНТУ.

С приветственным словом к участникам конференции в прямом эфире обратился ректор БНТУ, д-р техн. наук Сергей Васильевич Харитончик: «Для университета большая честь выступать одним из организаторов Международной научно-технической конференции, которая на протяжении многих лет показывает свою востребованность как эффективная площадка для обмена мнениями, презентации новых технических решений, разработок и инновационных технологий».

Сергей Васильевич пожелал участникам продуктивной работы, а также поздравил механико-технологический факультет и всех собравшихся со 100-летним юбилеем, отметив, что именно МТФ уже больше 60 лет готовит для отечественных предприятий высококвалифицированных металлургов и литейщиков.

Конференция «Литейное производство и металлургия. Беларусь» традиционно объединяет профессионалов своего дела со всего мира, ученых и производственников. Она также позволяет студентам, магистрантам и аспирантам раскрыть потенциал и зарекомендовать себя в будущей профессии.

Первым докладчиком был выпускник кафедры «Машины и технология литейного производства» механико-технологического факультета, ученый из Соединенных Штатов Америки профессор Семен Наумович Леках. Среди тем его научных исследований – разработка алюминиевых сплавов, создание легированного высокопрочного чугуна, совершенствование технологии плавки сплавов на основе железа и др.

Интересный доклад был представлен профессором из Египта Аделем Нофалем, его доклад был посвящен получению и применению чугуна ADI (изотермический закаленный чугун с шаровидным графитом) в автомобильной промышленности.

С приветственным словом и докладом «Превосходное качество в каждом уголке формы» в режиме on-line выступил представитель генерального спонсора конференции компании “Heinrich Wagner Sinto” (Германия), менеджер по региональным продажам в СНГ Олаф Крамер.

С большим интересом были заслушаны доклады руководителя представительства Ассоциации литейщиков Китая в Российской Федерации и странах СНГ Хань Юйсина «Дефекты пористости при литье под давлением из алюминиевых сплавов и технологии их устранения» и директора ЗАО «МСП Технолоджи» (Беларусь) Г.П. Манжулы «Современные решения в технологии смесеприготовления, формообразования и дробеметной очистки для литейного производства от проектно-производственного предприятия IdeaPro, Польша. Представитель компании “Zanardi Fonderie” (Италия) Арзентан Мишель представил доклад «Изготовление деталей из отпущенных высокопрочного чугуна по опыту фирмы “Zanardi Fonderie” (в режиме on-line).

Одним из самых торжественных моментов конференции стало уже традиционное награждение лауреатов премии АЛиМ за 2020 год.

В этом году дипломом Лауреата премии АЛиМ за 2020 год и бронзовой статуэткой «Литейщика» в номинации «Лучший инновационный проект, внедренный на литейном и металлургическом производствах, направленный на повышение качества продукции, энерго- и ресурсосбережение» было награждено ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» «За расширение марочного сортамента сталей на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК». Методы внепечной обработки стали в сталеплавильном производстве, особенности производства низкоуглеродистых легированных марок стали.

Дипломы Лауреата премии АЛиМ за 2020 г. в номинации «Лучшая научно-производственная работа молодого ученого (инженера) (премия имени Д.М. Кукуя) были вручены коллективу авторов ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» В. А. Путееву, И. В. Пивцаеву, А. Г. Щеглову, Л. В. Савостьянову, а также магистранту кафедры «Машины и технология литейного производства» механико-технологического факультета БНТУ О. А. Русевичу.

В частности, О. А. Русевич, поблагодарил за почетную награду профессионального сообщества: «Я с первого курса занимаюсь исследовательской работой, а последние несколько лет – разработкой методов повышения эффективности использования жидкостекольных смесей под руководством Юрия Юрьевича Гуминского и Сергея Леонидовича Ровина».

После награждения лауреатов представители ОАО «МТЗ» от лица дирекции, литейщиков, кузнецов и термистов завода преподнесли в подарок БНТУ макет ваграночной установки. Владимир Михайлович Гацуро, заместитель технического директора по подготовке металлургического производства – главный металлург ОАО «МТЗ» отметил: «Мы привыкли, что каждый год нас награждают. В этом году в честь столетнего юбилея мы сами решили преподнести подарок БНТУ. Ведь именно в БНТУ было подготовлено абсолютное большинство наших высококвалифицированных кадров».

Второй день работы Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия 2020. Беларусь», посвященной 100-летию БНТУ, прошел в насыщенной работе двух секций: «Литейное производство» (руководитель – канд. техн. наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» БНТУ М. А. Садоха) и «Металлургия и материаловедение» (руководитель – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Материаловедение в машиностроении» БНТУ В. М. Константинов).

Секция «Литейное производство» проходила на базе ОАО «Минский тракторный завод». В работе секции участвовали руководители и главные специалисты литейного производства большинства ведущих машиностроительных предприятий Беларуси, в том числе Минского тракторного завода, ОАО «МАЗ – управляющая компания холдинга «БЕЛАВТОМАЗ», ОАО «ГЗЛиН» холдинга «ГОМСЕЛЬМАШ», холдинга «БелОМО», ОАО «Могилевлифтмаш», ОАО «МПЗ», ОАО «УКХ «Минский моторный завод» и его филиала в г. Столбцы, ученые Института технологии металлов НАН Беларуси, ОАО «БЕЛНИИЛИТ» и БНТУ, директор УП «Промышленные экологические системы» А. В. Прибылов, директор ЗАО «МСП Технолоджи Центр» Г. В. Манжула, генеральный директор ООО «Промышленные решения» (РФ) и руководитель представительства Ассоциации литейщиков Китая в Российской Федерации и странах СНГ Хань Юйсинь, проректор БНТУ по учебной работе Ю. А. Николайчик. Открылась секция выступлением заместителя технического директора по подготовке металлургического производства – главного металлурга ОАО «МТЗ» Гацуро Владимира Михайловича с докладом о масштабных планах переноса и модернизации кузнечного, термического и литейного производств Минского тракторного завода.

Проекты завода по строительству нового литейного завода и кузнечно-штампового производства являются самими масштабными в рамках всего литейного производства республики. В настоящий момент они находятся на прединвестиционной стадии.

В соответствии со стратегией развития холдинга «МТЗ-ХОЛДИНГ» до 2030 года предусмотрена глубокая модернизация всех существующих технологических переделов заготовительного производства со

28-я Международная научно-техническая конференция
и информационная выставка

Литейное производство и металлургия 2020. Беларусь

Минск, 25-27 ноября 2020



28-я
МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МЕТАЛЛУРГИЯ 2020. БЕЛАРУСЬ»
ПОСВЯЩЕННАЯ 100-ЛЕТИЮ
БЕЛОРУССКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE
«FOUNDRY PRODUCTION AND METALLURGY 2020. BELARUS»

25 НОЯБРЯ
Гостиничный комплекс «Юбилейный»
(проспект Победителей, 19)
(актовый зал)

9.00-10.30	РЕГИСТРАЦИЯ УЧАСТНИКОВ
11.00	ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ
11.15-13.00	ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ, НАГРАЖДЕНИЕ ЛАУРЕАТОВ ПРЕМИИ АЛИМ
13.00-14.00	ОБЕД
14.30-17.00	ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)
19.00-24.00	ТОРЖЕСТВЕННЫЙ ВЕЧЕР «ЛИТЕЙЩИКОВ И МЕТАЛЛУРГОВ «ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО» «ЛИТЕЙНЫЙ ЗАВОД»

Секция
ОА





строительством и организацией новых высокотехнологичных ресурсосберегающих современных производств. Планируется возведение литейного завода и кузнечно-штампового производства.

Производственная мощность нового литейного завода, который будет построен за пределами Минска, составит 300 тыс.т в год чугуна и 100 тыс. т в год стального.

Проектом строительства современного кузнечно-штампового производства предусматривается вынос кузницы с территории ОАО «МТЗ» и создание мощностей в объеме 200 тыс.т поковок в год.

В основу двух инвестиционных проектов заложены цифровые и аддитивные технологии, которые позволят многократно снизить финансовые, трудовые и временные затраты на освоение новой продукции и совершенствование литейной технологии.

Активное и грамотное применение компьютерного моделирования литейных и кузнечных процессов дает возможность на стадии проектирования проанализировать вероятность возникновения дефектов и оптимизировать технологию изготовления и конструкцию отливок и поковок. Также предусмотрена разработка новых методов литья, штамповки и технологий, обеспечивающих стабильность и высокое качество заготовок как в мелкосерийном, так и в массовом производствах. Применение новых материалов с «пакетом» уникальных характеристик расширит номенклатуру изделий.

Доклад С. Л. Ровина, д-ра техн. наук, зав. кафедрой «Машины и технология литейного производства» БНТУ на тему «Безотходное использование металлов» также вызвал живой интерес у слушателей, так как посвящен актуальной задаче вовлечения в оборот ценных ресурсов, которые до последнего времени зачастую уходили в отходы. В докладе был представлен сравнительный анализ традиционных подходов к переработке дисперсных металлоотходов и предлагаемой технологии малотоннажного рециклинга, основанной на процессе твердо-жидкофазного восстановления оксидов железа в ротационных наклоняющихся печах с получением чугуна или стали. Предлагаемый способ позволяет рентабельно решить задачу возвращения в производственный оборот дисперсных металлоотходов непосредственно на том машиностроительном или металлургическом предприятии, которое является их источником.

Доклад А. В. Прибылова, генерального директора УП «Промышленные экологические системы» был посвящен опыту применения биотехнологии для очистки вентиляционных выбросов в литейном производстве. Следует отметить, что работы этой белорусской компании являются пионерскими и представляют интерес для производителей отливок во многих странах мира.

Выступление М. А. Садохи, доцента кафедры «Машины и технология литейного производства» БНТУ было посвящено вопросам ресурсосбережения в литейном производстве и повышения его конкурентоспособности, что особенно актуально для современного уровня развития машиностроения и высокой конкуренции на мировом рынке.

Вопросы непрерывного литья алюминиевой катанки с применением последних разработок ГНУ ИТМ НАН Беларуси были освещены в докладе зам.заведующего лаборатории кинетики кристаллизации ИТМ НАН Беларуси В. А. Харькова. Представленная информация о реально используемых технологии и оборудования вызвала повышенный интерес, докладчику были заданы многочисленные вопросы.

На мероприятии были заслушаны работы молодых ученых-литейщиков из БНТУ. Так, магистрант О. А. Русевич рассказал о перспективах применения вакуумирования для отверждения жидкостекольных смесей, а аспирант Хоу Ябо представил доклад, посвященный покрытиям литейных форм (технологиям их получения и применения).

Итальянская фирма «Foundry Ecoser», специализирующаяся на обеспечении литейных производств современными материалами, презентовала свои последние достижения и опыт в области материалов для улучшения технологии литья алюминия.

Всего на секции было представлено более 15 докладов, которые вызвали большой интерес у специалистов.

Во второй половине дня для участников конференции была организована экскурсия по Минскому тракторному заводу с посещением литейных и механических цехов, а также сборочного конвейера флагмана белорусской промышленности, которая закончилась в музее трудовой славы завода.

Работа секции «Металлургия и материаловедение» проходила в гостиничном комплексе «Юбилейный». Здесь в общей сложности было представлено более 20 докладов. Значительное внимание на «металлургической» секции традиционно было уделено достижениям, новым разработкам и проблемам Белорусского металлургического завода. Доклады касались вопросов освоения выпуска новых марок сталей, энерго- и ресурсосбережения, плавки и внепечной обработки стали, прокатки и термообработки, качества продукции и эффективности инвестиций. С интересными докладами выступили представители

ОАО «БМЗ», Физико-технического института и Института технологии металлов НАН Беларуси. Семь докладов на секции были представлены работниками БНТУ. Большая часть этих докладов была посвящена актуальным вопросам поверхностного упрочнения металлических изделий, нанесению защитных антикоррозионных покрытий и термообработки.

А завершился насыщенный трудовой день работой круглого стола под руководством заместителя генерального директора по технологии и качеству ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», канд.техн.наук Сергея Валерьевича Терлецкого. Главной темой круглого стола в этом году стали вопросы, проблемы и достижения Белорусского металлургического завода в области производства и применения стали для автомобилестроения. В дискуссии приняли участие специалисты ОАО «БМЗ», а также ученые ФТИ НАН Беларуси, ИТМ НАН Беларуси и БНТУ.

Подведение итогов 28-й Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия 2020. Беларусь», посвященной 100-летию БНТУ, прошло 27 ноября. Выступая с заключительным словом, заместитель председателя Ассоциации литейщиков и металлургов Республики Беларусь, академик НАН Беларуси Евгений Игнатьевич Марукович отметил, что, несмотря на необычный формат проведения и организационные сложности, связанные с пандемией, которая в этом году внесла коррективы практически во все происходящее, конференция прошла на высоком научно-техническом и эмоциональном уровне, была наполнена интересными докладами, презентациями и дискуссиями, позволила обменяться идеями и мнениями по важнейшим вопросам, представить достижения и обсудить проблемы, и, безусловно, запомнится всем ее участникам и слушателям.



ИТОГИ X МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО–ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ПРОГРЕССИВНЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

А. В. КОЛТЫГИН, В. Д. БЕЛОВ, А. Ю. ТИТОВ, НИТУ «МИСиС», г. Москва, Россия

В НИТУ «МИСиС» с 9 по 12 ноября 2020 г. прошла юбилейная X Международная научно-практическая конференция «Прогрессивные литейные технологии».

Свое начало профессиональная конференция литейщиков получила в 2001 г. Тогда организатором конференции выступила кафедра «Технологии литейных процессов» (ныне – кафедра «Литейные технологии и художественная обработка материалов») НИТУ «МИСиС» совместно с Российской ассоциацией литейщиков (РАЛ). После чего было принято решение раз в два года организовывать встречу ведущих специалистов литейной отрасли для обмена опытом и новыми открытиями в промышленности.

Юбилейная X Международная научно-практическая конференция «Прогрессивные литейные технологии» была посвящена 90-летию кафедры литья НИТУ «МИСиС».

География участников конференции более чем за 20-летний период ее проведения обширна и включает в себя, кроме ученых и исследователей из России и стран СНГ, представителей таких стран, как Великобритания, Германия, Египет, Индия, Чешская Республика, Южная Корея, Япония. География российских участников конференции представлена на рис. 1.



Рис. 1. География российских участников X Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии»

Несмотря на все сложности и ограничения в связи с эпидемической обстановкой, юбилейная X Международная научно-практическая конференция «Прогрессивные литейные технологии» встретила своих гостей из разных уголков России и стран СНГ, и была организована в очно-дистанционном формате.

В конференции приняли участие студенты, аспиранты и сотрудники ведущих технических вузов Российской Федерации, Республики Беларусь и Украины, а также представители промышленных предприятий. На рис. 2 показана доля предприятий среди участников конференции, а на рис. 3 – распределение докладов по изучаемым материалам.

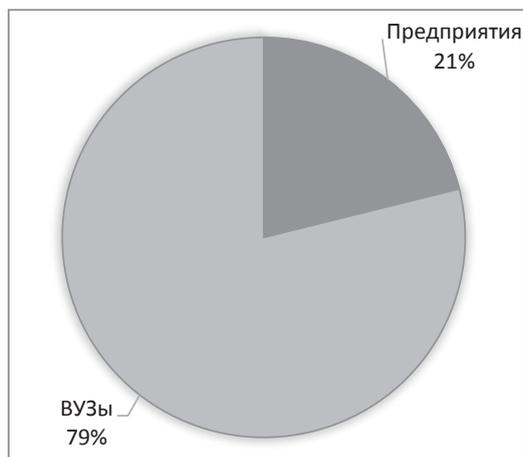


Рис. 2. Доля предприятий среди участников X Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии»

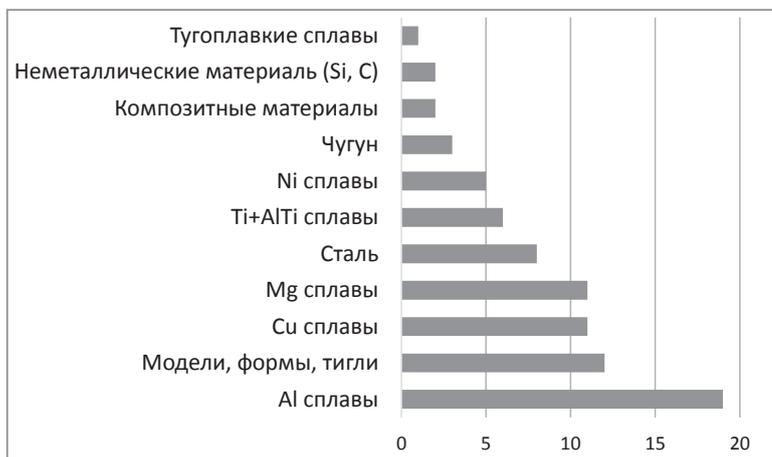


Рис. 3. Распределение докладов X Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» по основным направлениям работ

В очном формате работу конференции открыл заместитель председателя оргкомитета конференции, проректор по науке и инновациям НИТУ «МИСиС» Михаил Рудольфович Филонов. В своем выступлении он отметил важность проведения данного мероприятия для развития литейной отрасли России и значимый вклад в это ученых и специалистов литейной кафедры НИТУ «МИСиС».

В работе пленарного заседания принял участие заместитель председателя оргкомитета конференции, директор института ЭкоТех НИТУ «МИСиС» Андрей Яковлевич Травянов.

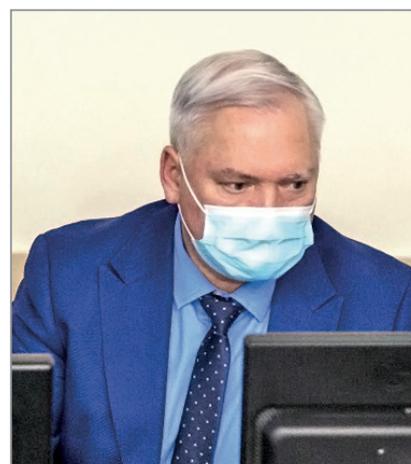
На пленарном заседании с докладами выступили известные специалисты в области литейного производства: И. А. Дибров – президент Российской ассоциации литейщиков; С. П. Павлинич – директор АО «ОДК «НИИД»; А. А. Шатульский – проректор по учебной работе, заведующий кафедрой материаловедения, литья и сварки Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П. А. Соловьева; В. Д. Белов – заведующий кафедрой «Литейные технологии и художественная обработка материалов» НИТУ «МИСиС»; В. П. Монастырский – профессор кафедры «Машины и технологии литейного производства» Московского политехнического университета и др.



Президент Российской ассоциации литейщиков
Иван Андреевич Дибров



Проректор по науке и инновациям
НИТУ «МИСиС»
Михаил Рудольфович Филонов



Директор института
ЭкоТех НИТУ «МИСиС»
Андрей Яковлевич Травянов



Заведующий кафедрой «Литейные технологии и художественная обработка материалов» НИТУ «МИСиС»
Владимир Дмитриевич Белов



Директор АО «ОДК «НИИД»
Сергей Петрович Павлинич



Проректор по учебной работе, заведующий кафедрой материаловедения, литья и сварки РГАТУ имени П. А. Соловьева
Александр Анатольевич Шатульский

На конференции обсуждались актуальные вопросы и современные тенденции в мире литья. Традиционно были рассмотрены проблемы развития теории литейных процессов, литья из черных и цветных сплавов, экономики и организации труда на литейных предприятиях.

Тематика конференции:

- Теория литейных процессов.
- Производство отливок из чугуна и стали.
- Производство отливок из сплавов цветных металлов.
- Материалы и оборудование литейного производства.
- Новые сплавы и материалы в литейном производстве.
- Цифровые и аддитивные технологии.
- Экономика и менеджмент в литейном производстве.

Распределение тезисов докладов по тематикам представлено на рис. 4.

Тезисы научных докладов конференции опубликованы в сборнике трудов конференции. В электронном виде он будет доступен в научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU. Всем участникам конференции направлен раздаточный материал, включая сборник трудов конференции.

Одновременно с X Международной научно-практической конференцией «Прогрессивные литейные технологии» в НИТУ «МИСиС» в формате вебинара 11 ноября 2020 г. состоялось заседание Федерального учебно-методического объединения в системе высшего образования по УГСН 22.00.00 «Технологии материалов».



Рис. 4. Распределение тезисов докладов по тематическим секциям X Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии»

Одним из вопросов в повестке дня было обсуждение необходимости разработки ФГОС ВО по программе специалитета по специальности «Литейные технологии».

По инициативе Российской ассоциации литейщиков был проведен опрос крупных литейных и машиностроительных предприятий об их удовлетворенности качеством подготовки специалистов-литейщиков, выпускаемых вузами России по двухуровневой системе подготовки (бакалавриат и магистратура), и о целесообразности возобновления подготовки специалистов по программе инженерной подготовки кадров (инженеры). Вопрос вызвал оживленную и неоднозначную реакцию членов ФУМО и послужил основой для жаркой дискуссии. В результате Председателю секции «Литейные технологии» было рекомендовано продолжить проработку вопроса по подготовке специалистов для литейной отрасли России в рамках отдельного НАПРАВЛЕНИЯ: «Литейные технологии» и исключению ее из НАПРАВЛЕНИЙ: *Металлургия, Машиностроение и Технология материалов*. При этом функционирование НАПРАВЛЕНИЯ «Литейные технологии» должно осуществляться только в одной структуре Федерального УМО по УГСН 22.00.00 «Технологии материалов».

В рамках конференции и при поддержке Российской ассоциации литейщиков 9 ноября 2020 г. в дистанционном формате прошло еще одно важное событие в «мире» литейного производства: Всероссийская студенческая олимпиада по литейному производству 2020 г. (Всероссийский этап).

К участию в олимпиаде допускались студенты-победители и призеры отборочных этапов олимпиады, обучающиеся по основным профессиональным образовательным программам высшего образования бакалавриата и магистратуры, изучившие или изучающие в текущем учебном году дисциплины, формирующие профессиональные компетенции федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования по направлениям «Металлургия», «Материаловедение и технологии материалов» и «Машиностроение».

27 участников – 13 студентов, обучающихся по программе бакалавриата, и 14 студентов, обучающихся по программе магистратуры, представляли свои вузы:

1. Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».
2. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.
3. Белорусский национальный технический университет.
4. Сибирский федеральный университет.
5. Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
6. Луганский государственный университет имени Владимира Даля.
7. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
8. Волгоградский государственный технический университет.
9. Брянский государственный технический университет.
10. Пензенский государственный университет.
11. Тихоокеанский государственный университет.
12. Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева.
13. Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет).

Задания для студентов, обучающихся по программе бакалавриата (рис. 5), предусматривали собой разработку технологии изготовления отливки по прилагаемому чертежу детали.

Задания для студентов, обучающихся по программе магистратуры (рис. 6), были рассчитаны на раскрытие теоретических и практических знаний по литейному производству (разработка технологии плавки, литья и термической обработки сплавов на базе анализа диаграмм состояния и свойств материалов).

Особенность олимпиады состояла в том, что студенческие работы оценивались специалистами литейных кафедр ведущих российских вузов, представляющих разные инженерные и научные школы, что позволило объективно оценить конкурсные работы.

Студенты продемонстрировали достаточно высокий уровень знаний и профессиональных компетенций по литейному производству.

Победителями и призерами Всероссийской студенческой олимпиады по литейному производству среди студентов, обучающихся по программе бакалавриата, стали:

I место – Сергей Романович Ракитин (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева).

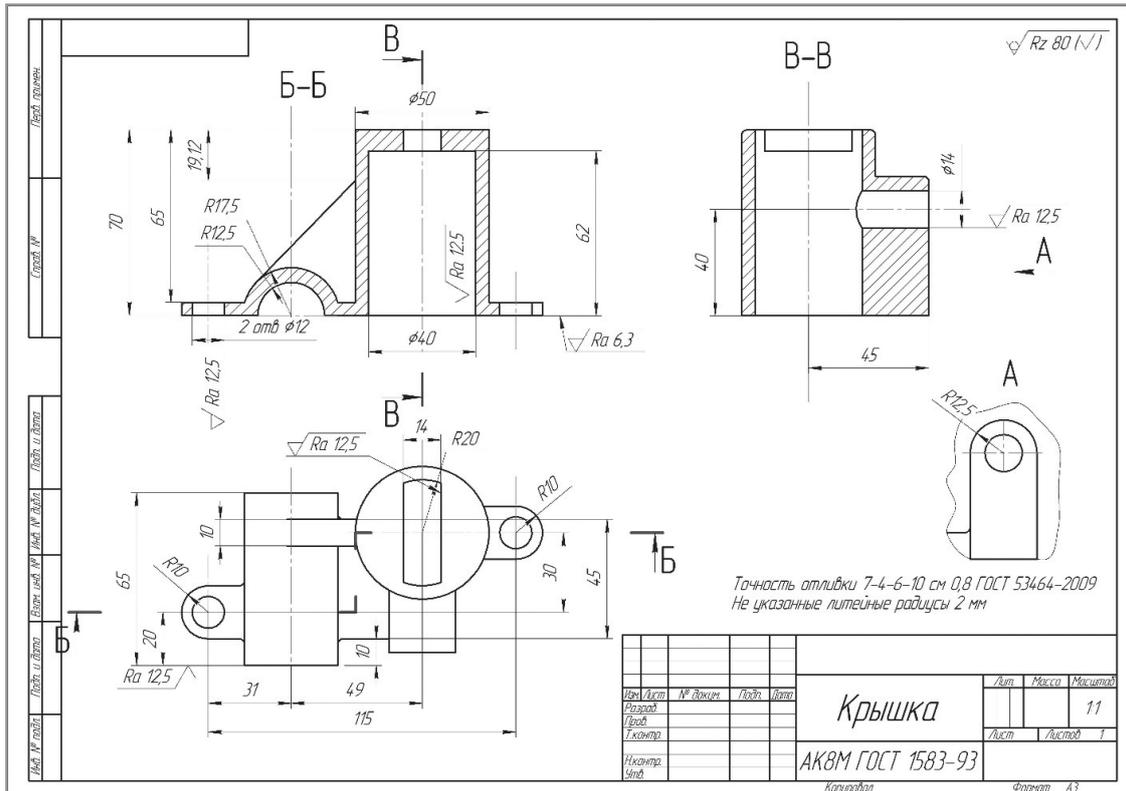


Рис. 5. Пример задания для студентов, обучающихся по программе бакалавриата

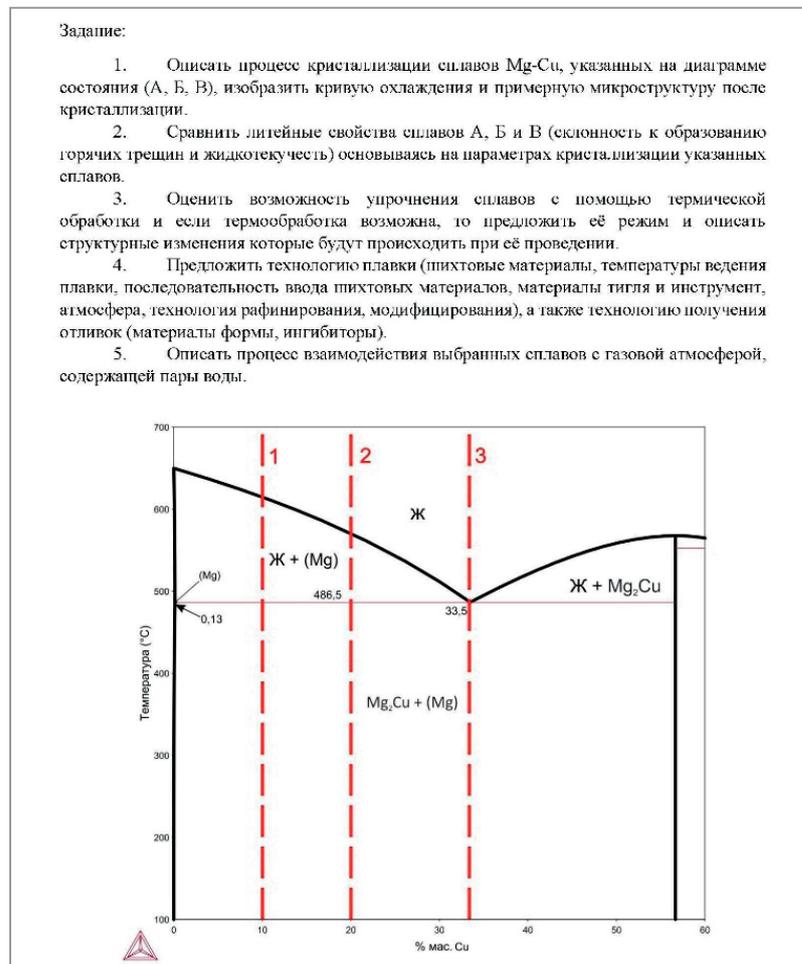


Рис. 6. Пример задания для студентов, обучающихся по программе магистратуры

II место – Денис Александрович Масков (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева).

III место – Глеб Максимович Белогуров (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»).

Победителями и призерами Всероссийской студенческой олимпиады по литейному производству среди студентов, обучающихся по программе магистратуры, стали:

I место – Элиана Романовна Дубова (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого).

II место – Данил Юрьевич Гребнев (Волгоградский государственный технический университет).

III место – Алексей Алексеевич Позизов (Брянский государственный технический университет).

Работа магистранта Белорусского национального технического университета Олега Александровича Русевича была отмечена поощрительным призом оргкомитета олимпиады (Энциклопедия «Металлургия и время», авторы: Ю. С. Карабасов, П. И. Черноусов, Н. А. Коротченко, О. В. Голубев).



Рис. 7. Дипломы победителей и призеров Всероссийской студенческой олимпиады по литейному производству – студентов, обучающихся по программе бакалавриата



Рис. 8. Дипломы победителей и призеров Всероссийской студенческой олимпиады по литейному производству – студентов, обучающихся по программе магистратуры

Результаты олимпиады были объявлены 10 ноября 2020 г. на пленарном заседании X Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии».

Победителям и призерам Всероссийской студенческой олимпиады по литейному производству направлены дипломы, подписанные ректором НИТУ «МИСиС» и президентом Российской ассоциации литейщиков. Кроме того, призеры олимпиады награждены экземплярами энциклопедии «Металлургия и время» (авторы: Ю.С. Карабасов, П.И. Черноусов, Н.А. Коротченко, О.В. Голубев), а победителям были вручены статуэтки «Литейщик», изготовленные к 90-летию кафедры «Литейные технологии и художественная обработка материалов» НИТУ «МИСиС» специалистами кафедры (рис. 9).

Всем участникам олимпиады направлены дипломы участников, а вузам-участникам – благодарственные письма.

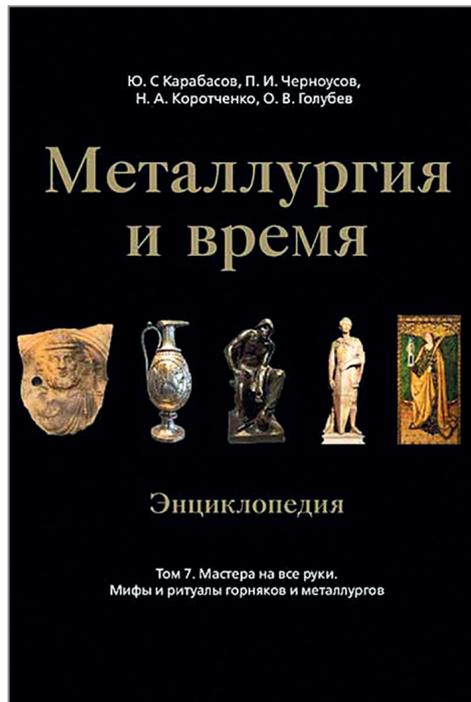


Рис. 9. Энциклопедия «Металлургия и время» (авторы: Ю.С. Карабасов, П.И. Черноусов, Н.А. Коротченко, О.В. Голубев); статуэтка «Литейщик»



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-27-37>
УДК 629.4.017: 62–592–11–034.13](045)

Поступила 20.10.2020
Received 20.10.2020

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА КОЛОДОК ТОРМОЗНЫХ ЧУГУННЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Е. С. ПОПОВ, ООО «М-ЛИТ», г. Никополь, Днепропетровская обл., Украина, ул. Электрометаллургов, 300.
E-mail: mlit-sbut@ukr.net; espgenie@gmail.com

О. И. ШИНСКИЙ, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина, бульвар Академика Вернадского, 34/1. E-mail: alupt@ukr.net

Проанализированы эксплуатационные показатели тормозных колодок железнодорожного подвижного состава, выполненных из различных материалов. Показаны преимущества чугунных тормозных колодок, производимых на литейных заводах. Отмечены недостатки тормозных колодок, изготовленных из композиционных материалов на основе каучука, асбеста, барита, технического углерода и других компонентов. Даны предложения по ужесточению требований к качеству тормозных колодок и направлениям совершенствования стандартов, технических условий и другой документации на эту продукцию.

Ключевые слова. Литейное производство, тормозные колодки, чугун, композиционные материалы, качество, стандартизация, совершенствование.

Для цитирования. Попов, Е. С. Анализ показателей качества колодок тормозных чугунных и композиционных для железнодорожного подвижного состава / Е. С. Попов, О. И. Шинский // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 27-37. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-27-37>.

PERFORMANCE QUALITY ANALYSIS OF BRAKE IRON AND COMPOSITE PADS FOR RAILWAY ROLLING COMPOSITION

E. S. POPOV, LLC “M-LIT”, Nikopol, Dnepropetrovsk region, Ukraine, 300, Electrometallurgists str.
E-mail: mlit-sbut@ukr.net; espgenie@gmail.com

O. I. SHINSKY, Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine, 34/1, Akademika Vernadsky Boulevard. E-mail: alupt@ukr.net

The requirements for the quality and performance of the brake pads of railway rolling stock made of various materials are analyzed. The advantages of cast iron brake pads produced at foundries are shown. The disadvantages of brake pads made of composite materials based on rubber, asbestos, barite, carbon black and other components are noted. Ways to improve standards, specifications and other documentation for these products are proposed.

Keywords. Foundry, brake pads, cast iron, composite materials, quality, standardization, improvement.

For citation. Popov E. S., Shinsky O. I. Performance quality analysis of brake iron and composite pads for railway rolling composition. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 1, pp. 27-37. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-27-37>.

Литейное производство является одним из традиционных способов изготовления многих деталей для железнодорожного подвижного состава, в том числе чугунных тормозных колодок [1–6]. Тормозные колодки из чугуна – наиболее надежные в эксплуатации, что подтверждено более чем сотней лет их эксплуатации. В последние десятилетия во многих странах активно ведутся работы в разных направлениях по совершенствованию конструкций тормозных колодок рельсового подвижного состава и созданию новых материалов колодок [3, 4, 7]. Ныне на железнодорожном транспорте используют тормозные колодки из так называемого «композиционного» (полимерного) материала [2, 5, 8]. Однако эталонным материалом для тормозных колодок служит чугун [2]. Требования к качеству и эксплуатационным показателям тормозных колодок повышаются из-за увеличения скорости движения поездов и соответственно усиления мер по обеспечению безопасности железнодорожного транспорта. В связи с этим возникла задача детального сопоставления показателей качества, оценки достоинств и недостатков тормозных колодок из чугуна и колодок из композиционных материалов. Такой анализ позволяет определить направления

развития производства этой продукции, допустимые и рациональные области применения различных тормозных колодок на железнодорожном транспорте.

Результаты исследования эксплуатационных характеристик тормозных колодок из чугуна и разных композиционных материалов, выполненных в промышленных условиях Белорусской железной дороги, приведены в работах [9–11]. Было установлено, что при использовании композиционных колодок длина тормозного пути электропоездов больше в среднем на ~ 14% по сравнению с длиной тормозного пути поездов, оборудованных чугунными тормозными колодками [10]. Эффективность тормозов с композиционными тормозными колодками уменьшается при скоростях ниже 70–80 км/ч. Сравнительные испытания показали, что чугунные колодки обеспечивают наиболее короткие тормозные пути при скоростях движения до 120 км/ч. В связи с этим рекомендовано ограничить применение композиционных тормозных колодок на пассажирских вагонах, движущихся со скоростью до 120 км/ч [9].

При использовании композиционных тормозных колодок резко возрастает повреждаемость колесных пар [2, 9–11]. Композиционные колодки более износостойкие, чем тормозные колодки из чугуна. Однако это преимущество нивелируется при сравнении эффективности использования колодок из чугуна и колодок из композиционного материала вследствие негативного воздействия композита на рабочую поверхность колес и, как результат, снижения безопасности движения поездов.

Заметим также, что композиционный материал обладает низкой теплопроводностью. Поэтому при аварийном торможении подвижного состава композиционные колодки и контактирующие с колодками колеса быстрее и сильнее нагреваются, чем при использовании чугунных колодок. Резкое повышение температуры может привести к перегреву бандажа колеса, сползанию бандажа с места посадки, что опасно [10]. Создаются также предпосылки возгорания поверхности контактирования тормозной колодки с колесом вследствие перегрева из-за слабого отвода тепла композиционным материалом.

Учитывая изложенное, более детально проанализируем требования стандартов, технических условий и других нормативных актов к качеству композиционных и чугунных тормозных колодок и рассмотрим рекомендации по их усовершенствованию. В проводимом анализе обратим внимание на нюансы технологии и возможности развития литейного производства тормозных колодок из чугуна.

Требования к химическому составу тормозных колодок

Эксплуатационные показатели и безопасность тормозных колодок зависят от состава материала, из которого они изготовлены. Состав и свойства чугуна, используемого в тормозных колодках, общеизвестны.

Композиционные материалы состоят из пластичной основы (каучука или смолы), называемой матрицей и служащей связующим веществом, и наполнителей – ингредиентов в виде порошков, волокон, стружки и других форм. Конкретный состав материала, используемого для изготовления композиционных колодок, приведен, например в [2]. Состоит он из каучука СКД – 19,25%; асбеста V группы – 14,00; баритового концентрата – 15,70; шлифпыли – 19,70; выпрессовки дробленой – 15,70; углерода технического П-803 – 14,00; серы молотой – 1,5; 2-меркаптобензотиазола – 0,10; тиурама «Д» – 0,05%. Допускается замена дробленой выпрессовки на измельченный брак готовой продукции. Композиционный материал для тормозных колодок изготавливают смешением указанных ингредиентов в смесителе. После смешения массу измельчают на дробилках, засыпают в пресс-формы при температуре 175–180 °С и выдерживают при удельном давлении 200–300 кгс/см² (атмосфер).

В технических условиях и сопровождающей документации на тормозные колодки наименования и химический состав компонентов композиционного материала, из которого они изготовлены, как правило, не указаны. Поэтому потребители не могут проверять состав материала композиционных колодок, что существенно снижает уровень контроля качества таких колодок и соответственно их надежность и безопасность эксплуатации. Согласно п. 4.1 ГОСТ 2.114-95 «Единая система конструкторской документации. Технические условия», состав разделов и их содержание определяет разработчик в соответствии с особенностями продукции. Выходит, что отсутствие в тексте технических условий на тормозные композиционные колодки раздела, который регламентирует химический состав композиционного материала, будто бы не нарушает требования этого стандарта. Однако нарушения законодательства в технических условиях на тормозные композиционные колодки есть и они существенные.

Согласно ГОСТ 2.114-95, разработчик технических условий может не регламентировать процентное содержание компонентов и их химический состав в композиционном материале колодок. Но только в тех случаях, когда химический состав материала колодок уже указан, регламентирован в их чертежах. Согласно ГОСТ 2.109-73 «ЕСКД. Основные требования к чертежам», материал обозначается в чертежах

деталей в основной надписи, спецификации или в электронной структуре изделия. Это определяющее требование к технической документации является неизменным и непререкаемым на протяжении десятилетий. Однако изготовители тормозных колодок из композиционных материалов и разработчики технических условий на эти изделия игнорируют требования стандарта, а потребители колодок, прежде всего железная дорога, на это грубейшее нарушение не реагируют. Указанное недопустимое нарушение законодательства необходимо немедленно устранять.

Требования к химическому составу чугуна, из которого изготавливают тормозные колодки, жестко регламентируются абсолютно во всех стандартах. Так, в разделе 6.1.4 Межгосударственного стандарта ГОСТ 33695-2015 «Колодки тормозные чугунные для железнодорожного подвижного состава» указаны марки чугуна и его химический состав применительно к изготовлению тормозных колодок разного типа и назначения. В этом стандарте регламентированы не только нормы массовой доли химических элементов (C, Si, Mn, P, S, Ba, Ca), но и форма, размеры, дисперсность, строение, структуризация включений (графита, перлита, цементита, фосфидной эвтектики), поскольку именно химический состав, макро- и микроструктура определяют прочность, пластичность, твердость, износостойкость, другие технические и эксплуатационные показатели материала тормозных колодок. В [3] рассмотрено влияние химических элементов (марганца, фосфора, никеля, молибдена, алюминия, кремния, меди и др.) в составе чугуна на его графитизацию и теплопроводимость. В [2] показана эффективность применения частично графитизированного чугуна для изготовления тормозных колодок. Главный вывод здесь состоит в том, что химический состав материала тормозных колодок является одним из основных и важнейших показателей качества и уклоняться от его регламентирования в стандартах, технических условиях и другой документации недопустимо.

Обращает на себя внимание тот факт, что в Технических условиях на широко рекламируемые колодки тормозные композиционные с чугунными вставками, например, в ТУ У 30.2-350462740059:2016, которые зарегистрированы в Украине, и аналогичных ТУ, действующих в Российской Федерации и Беларуси, химический состав чугуна не регламентируется. Отмечается лишь, что материал вставок – чугун С4 согласно ГОСТ 1412. Таким образом, наблюдается существенное несоответствие подходов к обеспечению качества тормозных колодок из разных материалов. Технические требования к чугунным тормозным колодкам предусматривают жесткое регламентирование химического состава и микроструктуры чугуна, а особых требований к химическому составу чугуна в составе тормозных композиционных колодок фактически нет совсем. Хотя условия эксплуатации полностью чугунных колодок и чугунных вставок в композиционных колодках одинаковые. Снижение требований к чугуну во вставках в композиционном материале колодок технически никак не обосновано и нарушает общепринятый системный подход к обеспечению качества и эксплуатационных характеристик тормозных колодок из любых материалов.

В технической и патентной литературе много информации о применении разных материалов для изготовления тормозных колодок. Например, известны сотни рецептур композиционных материалов, предлагаемых для изготовления тормозных колодок железнодорожного подвижного состава. Некоторые составы композиционных материалов тормозных колодок испытаны при эксплуатации подвижного состава на железных дорогах [7, 8]. Разрабатываются тормозные колодки металлокерамические из бронзово-графитового и других, скажем так, экзотических материалов [3, 8], которые интересны с познавательной точки зрения. Результаты таких исследований заслуживают внимания.

Механические свойства материалов, используемых для изготовления тормозных колодок

Во всех стандартах и технических условиях на тормозные колодки из чугуна или композита указаны **требования к твердости** материала. Согласно ГОСТ 33695–2015 «Колодки тормозные чугунные для железнодорожного подвижного состава», твердость по Бринеллю НВ тела колодок различных типов составляет минимально от 127 и максимально до 303 единиц. ГОСТ 33421-2015 «Колодки тормозные композиционные и металлокерамические для железнодорожного подвижного состава» предусматривает твердость по Бринеллю разную для различных типов подвижного состава. В частности, величиной 1,2–3,0 НВ для тормозных колодок, предназначенных для грузовых вагонов, моторвагонного подвижного состава, колодок с высоким (каким именно, не определено) коэффициентом трения для пассажирских вагонов. Значение этого показателя для колодок с низким коэффициентом трения для пассажирских вагонов составляет 2,0–8,0 НВ. Такие же нормы твердости предусмотрены и в технических условиях на тормозные колодки из различных композиционных материалов.

Результаты сравнения величин этого показателя качества чугунных и композиционных колодок очевидны и не требуют комментариев. Необходимо лишь заметить, что твердость композиционных колодок

может различаться в 4 раза (от 2,0 до 8,0 НВ). Такой недопустимый разброс важнейшего показателя свидетельствует о высокой нестабильности качества колодок из композиционных материалов в целом. Обусловлено это, прежде всего, отсутствием фиксации в стандартах веществ, составляющих композит, рецептуры его компонентов и их химического состава. Свидетельствует также о том, что композиционный материал может состоять из произвольно выбранных и неконтролируемых ингредиентов, а технология изготовления композиционного материала и непосредственно тормозных колодок из него допускает неконтролируемое варьирование параметров.

В соответствии с ГОСТ 33695-2015 (п. 6.1.10) **надежность** стальной спинки и конструкционная **прочность** колодок тормозных чугунных должны быть обеспечены при испытании на изгиб нагрузкой 127,5 или 156,8 кН в зависимости от типа колодки. Конструкционную прочность колодок проверяют в соответствии с п. 8.6 этого стандарта путем излома их под прессом, развивающем усилие не менее 300 кН (30 тс). Предел прочности чугуна на сжатие общеизвестен и поэтому в стандартах и технических условиях на чугунные колодки не указывается. Предел прочности при сжатии композиционного материала тормозных колодок должен быть не менее 15,0 МПа, т. е. прочность композиционного материала ~ в 15 раз меньше прочности чугуна.

В связи с изложенным возникает очевидный вопрос: по какой причине тормозные колодки из композиционного материала не подлежат проверке на прочность, в частности испытаниям на излом, если условия эксплуатации тормозных колодок из чугуна и композиционных материалов одинаковые. С технической точки зрения испытывать на излом следует в первую очередь тормозные колодки из композиционного материала, прочность которых существенно меньше, чем прочность чугунных колодок. Низкая прочность при сжатии композиционных материалов создает опасность разрушения колодок при торможении поездов со всеми вытекающими последствиями. Таким образом, одним из главных недостатков композиционных тормозных колодок является меньшая прочность по сравнению с чугунными, что ослабляет их надежность и повышает вероятность аварий тормозных систем.

Свойства композиционных материалов в осенне-зимний период существенно ухудшаются под воздействием дождя, снега, низкой температуры, что требует дополнительного обслуживания таких колодок, замены их на чугунные. На некоторых железных дорогах вынуждены композиционные тормозные колодки в зимний период менять на чугунные для предупреждения образования дефектов на поверхности катания колес и снижения эффективности торможения. Этот фактор является весомым аргументом в выводах о том, что композиционный материал не является универсальным заменителем чугуна в тормозных колодках.

Эффективность торможения поездов, оснащенных композиционными и чугунными тормозными колодками

Тормозное усилие создается силой трения между рабочими поверхностями тормозной колодки и колеса. В соответствии с классическими положениями теории трения, в частности, согласно закону Амонтона-Кулона, сила трения прямо пропорционально зависит от силы прижатия тормозных колодок к колесу. Коэффициентом пропорциональности в рассматриваемых условиях служит коэффициент трения.

Анализ технической литературы и нормативно-технической документации (стандартов, технических условий, инструкций по эксплуатации тормозных систем подвижного состава на железных дорогах и др.) свидетельствует, что тормозные колодки из композиционных материалов не обеспечивают стабильность величины коэффициента трения с колесами при торможении подвижного состава, что отрицательно сказывается на режимах движения поездов. Например, согласно п. 1.3–1.4 ТУ У6-05495578.017-2001, коэффициент трения композита со сталью меняется в очень широких пределах: от 0,187 до 0,370 (согласно данным табл. 3, п. 1.4). При этом допускается отклонение коэффициента трения от приведенных значений на 15%, а еще хуже, что даже на участке 25 км тормозного пути коэффициент трения колодок из композиционных материалов может изменяться на 20%. Допускаемые отклонения коэффициента трения вначале на 15%, а затем еще на 20% приводят к возможности изменения значений этого показателя от 0,127 до 0,51, т. е. почти в 4 раза, что недопустимо в технических условиях на столь ответственную деталь, как тормозная колодка. Более того, данные табл. 3 противоречат норме коэффициента трения 0,34–0,65, который приведен в табл. 2, п. 1.3 этого же документа.

О нестабильности коэффициента трения во время торможения подвижного состава различных типов при использовании композиционных тормозных колодок свидетельствуют данные, приведенные в Государственном стандарте Республики Беларусь ГОСТ 33421-2015 «Колодки тормозные композиционные и металлокерамические для железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия». Так, в соответствии

с табл. 2 этого стандарта значения коэффициента трения лабораторного образца композиционного материала (заметим, неизвестного состава) тормозной колодки в паре с колесной сталью (сталь марки 2) могут изменяться, в частности, от 0,34 до 0,65 или, как для локомотивов, в диапазоне 0,30–0,60. Тот факт, что коэффициент трения при неизменной силе нажатия на натуральную колодку с увеличением скорости начала торможения от 50 до 160 км/ч уменьшается в отдельных случаях почти в 1,5 раза также свидетельствует о нестабильности величины этого показателя для композиционных тормозных колодок. Допустимые изменения на 15% коэффициента трения при попадании воды на композиционные тормозные колодки и на 20% при постоянной скорости подвижного состава на 25 км тормозного пути негативно характеризуют композиционные тормозные колодки. Обусловлено это, в том числе отсутствием жесткой регламентации рецептуры и химического состава компонентов композиционного материала таких колодок.

Заметим, что тормозные колодки из композиционного материала значительно чаще, чем чугунные, реагируют (в смысле нестабильности коэффициента трения) на изменение скорости движения, что отрицательно влияет на безопасность железнодорожного транспорта. Приведенные в указанных Технических условиях значения статического коэффициента трения колодок тормозных из композиционных материалов не совпадают также с величинами, которые указаны, например, в табл. Г.15 Межгосударственного ГОСТ 34434-2018 «Тормозные системы грузовых железнодорожных вагонов (технические требования и правила расчета)», которые подписала Украина. Не исключено, что отмеченная неопределенность значений коэффициента трения введена в указанные и другие аналогичные ТУ преднамеренно для затруднения контроля этого показателя.

Данные по коэффициенту трения пары композиционный материал тормозной колодки – сталь железнодорожного колеса применительно к рассматриваемым условиям должны учитывать твердость стали, так как поверхностные слои катания колес могут иметь твердость в относительно широких пределах. Твердость стали колес в исходном состоянии и твердость поверхностных слоев катания колес в процессе эксплуатации разная. Обеспечение высокого коэффициента трения не всегда является показателем высокого качества колодки. Из-за сложности в реализации оптимальных режимов торможения высокий коэффициент трения иногда способствует юзу и образованию дефектов на поверхности катания колес с нежелательными последствиями [2]. Поэтому чугун остается стандартным материалом для тормозных колодок с позиций обеспечения оптимальных величин коэффициента трения.

Приведенные выше доводы о преимуществах тормозных колодок из чугуна перед колодками из композиционных материалов подтверждают сравнительные результаты их натуральных испытаний, выполненных применительно к условиям торможения электропоездов [10, 11]. Установлено, что при высоких скоростях длина тормозного пути при использовании композиционных колодок увеличивается более чем на 30% по сравнению с протяжностью тормозного пути, обеспечиваемого чугунными тормозными колодками. Использование композиционных колодок снижает уровень безопасности в пригородном движении. Вследствие пониженной тормозной эффективности композиционных колодок машинисты при приближении к пунктам остановки начинают тормозить раньше, а затем на перегонах вынуждены повышать скорость движения, что приводит к увеличению расхода электроэнергии [10]. Отметим, что приведенные в ГОСТ 33421-2015 значения коэффициента трения с точностью до третьего знака после запятой применительно к тормозным колодкам из композиционного материала вряд ли повышают точность и достоверность результатов, поскольку не соответствуют условиям необходимости и достаточности.

Влияние материала тормозных колодок на образование дефектов на рабочей поверхности колес и долговечность их эксплуатации

Вывод о том, что при сравнении эффективности применения чугунных и композиционных колодок следует учитывать их влияние на состояние поверхности колес и безопасность движения подтвержден практикой.

Тормозные колодки должны обеспечивать безопасность движения подвижного транспорта и долговечность работы колесных пар. Эти вопросы всегда рассматриваются неотъемлемо при оценке качества тормозных колодок. Композиционные колодки увеличивают износ колесных пар, приводят к образованию дефектов на поверхности качения колес подвижного состава со всеми негативными последствиями. По мере износа колес утончается их обод, изменяется профиль катания колес, на поверхности катания возникают дефекты термоусталостного происхождения и дефекты, обусловленные использованием некачественных колодок (кольцевые выработки, задиры, др.). Изменение профиля поверхности катания ухудшает самоцентрировку колесных пар и способствует повышению износа как гребня колес, так

и рельсов, особенно на участках изменения направления железнодорожного полотна. Восстанавливают профиль катания колес и устраняют дефекты на поверхности катания переточкой колесных пар, что приводит к утончению обода колес и сокращению срока их эксплуатации. Тормозные колодки воздействуют на поверхность качения колес как прямым путем, так и косвенно. Высокая сила трения между колодкой и колесом способствует юзу колесных пар (скольжению по рельсам) и появлению в связи с этим дефектов на поверхности катания колес [2, 3, 5, 8, 10].

Специалисты считают [2], что тормозные колодки в оптимальном режиме трения должны изнашивать слои усталого металла и удалять с поверхности качения колес слои металла с зародившимися микротрещинами. Композиционные колодки не выполняют этой функции, способствуют повышенному упрочнению металла, приводящему в последующем к образованию дефектов на поверхности качения колес в виде трещин и вырывов. Практика показала, что композиционные колодки, полирующие поверхность катания колес, хотя и характеризуются увеличенной долговечностью по сравнению с чугунными колодками, но нередко сокращают продолжительность эксплуатации колесных пар, что в целом приводит к отрицательному результату их применения. Наибольший недостаток композиционных колодок, отмечаемый железнодорожниками при использовании их на пассажирских вагонах, сводится к образованию ползунов, трещин и вырывов металла на поверхности качения колес и частой переточке колесных пар. Этих проблем практически нет при использовании чугунных колодок. В [2] сообщается, что, по данным ряда железных дорог, при эксплуатационных испытаниях композиционных тормозных колодок были получены отрицательные результаты. Взаимодействие с композиционными тормозными колодками приводило к повышенному износу колес.

Возникновение дефектов на поверхности катания колес подвижного состава при использовании композиционных тормозных колодок является настолько обычным явлением, что предельные значения браковочных размеров дефектов (ползунов, выбоин, выщербин, раковин, вмятин, трещин) указаны даже в ГОСТ 33421-2015. Конечно же, возникающие выщербины, раковины или вмятины глубиной до 10 мм, длиной 50 мм на колесах грузовых вагонов и 25 мм на колесах пассажирских вагонов однозначно снижают безопасность движения поездов, уменьшают продолжительность эксплуатации колес и повышают эксплуатационные затраты. В [9] приведено, что в результате перевода пассажирских вагонов собственности Белорусской железной дороги на композиционные колодки резко возросла повреждаемость колесных пар. В одном из депо Витебска количество колесных пар, выкаченных из-под вагонов вследствие возникших выщербин, наваров и ползунов, увеличилось более чем в 7 раз. Было рекомендовано ограничить применение композиционных тормозных колодок на пассажирских вагонах при скоростях движения до 120 км/ч.

Экологические проблемы, обусловленные применением тормозных колодок из различных материалов

Тормозные колодки из композиционных материалов (асбестовых, безасбестовых и др.) содержат в продуктах их износа опасные для здоровья людей и окружающей среды вредные вещества, в частности асбест и др. Асбест, который составляет основу материала композиционных колодок, является канцерогенным веществом. Например, в Технических условиях ТУ У6-05495578.017-2001 и других подобных приведены допустимые значения асбесто-резиновой и силикосодержащей пыли синтетических минеральных волокон, которая выделяется при изготовлении тормозных колодок из так называемых композиционных материалов. Эта пыль выделяется не только при изготовлении, а еще в больших количествах и при эксплуатации колодок вследствие их износа в процессе торможения поездов. Пыль, содержащая продукты износа композиционных тормозных колодок, крайне опасна для здоровья людей и окружающей среды.

Тормозные колодки из композиционного материала существенно уступают чугунным по показателям вредности для людей из-за наличия канцерогенов, в частности асбеста и других вредных веществ в продуктах их износа. В материале так называемых «безасбестовых» композиционных колодок асбест будто бы заменен на другие вещества, которые, похоже, не менее вредные. Наименование, состав и свойства этих веществ в технической документации на композиционные колодки не сообщается. В технической литературе приведена информация, что в процессе эксплуатации на подвижном составе железной дороги тормозные колодки истираются в шлам. Это тысячи тонн отходов материала, из которого были изготовлены колодки. Использование на железной дороге тормозных колодок из асбестовых, безасбестовых и других, вредных для людей и окружающей среды композиционных материалов, возрастает. Как следствие, население дышит воздухом, насыщенным пылью резиново-асбестовой смеси, которая образуется при истирании в процессе эксплуатации тормозных колодок, изготовленных из композиционных материалов неизвестного химического состава.

Территории вокруг железнодорожных путей загрязняются вредными для населения отходами износа тормозных колодок из композиционных материалов, включающих опасные для здоровья людей химические элементы и соединения неизвестного и неконтролируемого химического состава.

Согласно п. 3.5 раздела 3 «Требования к охране окружающей среды, утилизация» ТУ-У-6-05495578.017-2001, изношенные тормозные колодки из композиционного материала относятся к категории отходов IV класса опасности. **Отходы должны подлежать утилизации на полигонах захоронения согласно Закону Украины «Про отходы»** в соответствии с договорами или возвращаться на предприятие, где они были изготовлены для использования в качестве вторичного сырья. По имеющейся информации этот пункт ТУ в полной мере не всегда выполняется.

В [6] отмечается, что молекулярно-механическое трение полимерных композиционных тормозных колодок по колесам сопровождается образованием ядовитого смога вокруг каждого поезда. При этом мелкодисперсные частицы резины, сажи, асбеста, барита, электрокорунда, графита, серы и других химических компонентов рабочей массы колодок отравляют окружающую природную среду, воздействуют на дыхательные пути людей и животных. После использования колодки превращаются в твердые полимерные промышленные отходы, переработка и утилизация которых пока не получила необходимого развития. В результате тысячи тонн не полностью изношенных колодок накапливаются на промышленных свалках. По мнению авторов [6], использование на железнодорожном транспорте тормозных колодок из композиционных материалов должно быть запрещено.

Отработанные тормозные колодки из композиционных материалов, как, в частности и автомобильные покрышки [12], отнесены к отходам четвертого класса опасности из-за нанесения ими колоссального вреда окружающей среде. Пыль от изношенных колодок состоит из частиц микронных размеров, взвесь которых вздымается турбулентными потоками воздуха от движущихся поездов и вдыхается людьми. Можно ожидать, что риск онкологических заболеваний людей, возникающих от воздействия композиционного материала тормозных колодок при их изготовлении и эксплуатации, такой же, а может и больший, чем от автомобильных шин, поскольку в их пыли содержатся одни и те же канцерогены – бензопирен, продукты разложения каучука, другие реакционные и токсические химические соединения [12].

Сравнение экономической эффективности применения чугунных и композиционных тормозных колодок

Композиционные колодки легче чугунных (~ 4,5 вместо ~ 14 кг). Стоимость композиционных колодок разная и зависит от состава компонентов, рецептуры и технологии приготовления композиционного материала. Рыночная цена композиционных колодок в Украине несколько ниже цены тормозных колодок из чугуна. Однако ценовая ситуация на рынке может измениться при удорожании композиционных материалов. Судя по котировкам на западных рынках, качественные композиционные колодки значительно дороже колодок из чугуна.

Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что тормозные колодки из различных материалов необходимо оценивать не только по величине коэффициента трения и износостойкости, а и по таким показателям, как влияние их на поверхность качения и образование ползунов, трещин, вырывов металла, требующих переточки колес. Распространяемая коммерческими структурами реклама, что благодаря низкой цене тормозных колодок из композиционных материалов их эксплуатация на транспорте более выгодна, чем колодок из чугуна, не соответствует действительности, поскольку экономическая эффективность не оценивается комплексно. Не учитывается то обстоятельство, что из-за повышенного выхода из строя колесных пар, увеличения расходов на их обслуживание и других негативных факторов при использовании колодок из композиционных материалов суммарные расходы транспортников при их применении в большинстве случаев оказываются выше, чем при использовании чугунных колодок. Анализ результатов эксплуатации композиционных полимерных колодок, изготовленных из асбестовых или безасбестовых составов с чугунными вставками или без них, свидетельствует о необходимости критического отношения к рекламе относительно эффективности и перспективности их применения. Причина в том, что экономические интересы производителей колодок и их потребителей не совпадают.

Железнодорожники при объективном подходе к выбору колодок сопоставляют расходы на приобретение тормозных колодок и расходы, связанные с переточкой колесных пар и ресурсом их эксплуатации при использовании чугунных и композиционных колодок. Сопоставление величин экономии на стоимости колодок и потерь на эксплуатации колесных пар часто оказывается не в пользу композиционных

колодок из-за негативного их влияния на образование дефектов поверхности качения колес и обусловленной этим необходимостью затрат на ремонт колес или приобретение новых.

Экономические расчеты затрат на приобретение и эксплуатацию тормозных колодок из композиционных материалов по сравнению с колодками из чугуна показывают следующее. В расчетах и оценке использованы ориентировочные цены, которые действовали в Украине в конце 2019 года.

Цена тормозной колодки типа «С» из чугуна для грузовых вагонов без НДС с доставкой составляла ~ 380 грн./шт., тормозной колодки из композиционного материала ~ 204 грн./шт., т. е. чугунная колодка стоила примерно в 1,86 раз дороже. Цена колеса для грузовых вагонов – ~28 000 грн./шт. Стоимость обточки (ремонта) колеса для удаления дефектного слоя поверхности катания колеса – ~ 718 грн./шт., ремонта колесной пары с полной ревизией буксового узла с обтачиванием колес – ~ 5810 грн./пара, капитального ремонта колесной пары с заменой отдельных деталей и обточки колес – ~ 13 661 грн./пара. Стоимость ремонта колесных пар соответствует значениям, которые имели место на одном из ремонтных предприятий, которое входит в структуру АО «Укрзалізниця».

Различие в ценах чугунных колодок, использование которых гарантирует отсутствие повреждений поверхности катания колес, и композиционных составляло всего ~ 176 грн. Эта цифра несопоставима с ценой колеса ~ 28 000 грн. Разница в цене тормозных колодок из чугуна или композиционного материала ~ в 157 раз меньше стоимости одного колеса для грузовых вагонов и, по сути, является незначительной в суммарной цене колесной пары вместе с тормозными колодками. При этом, как было отмечено выше, тормозные колодки из композиционных материалов повреждают колеса (приводят к дефектам: ползуны, трещины, вырывы металла и др.), что требует ремонта колесных пар, который предусматривает обточку колес. В частности, требуются выключение вагонов из состава, отцепление колесных пар, переточка колес и последующая установка колесных пар на вагоны. Это существенные затраты.

Расходы на ремонт (5810 или 13661 грн.) колесной пары, вызванные необходимостью обточки колес из-за появления дефектов, почти в 40–80 раз превышают «экономия» в 175 грн. на закупку композиционных колодок вместо чугунных. Получается, что экономия в 175 грн., якобы достигаемая при покупке композиционных колодок (которые повреждают колеса) вместо чугунных (которые колеса не повреждают), в целом приводит к убыткам – железнодорожников. При этом тормозные колодки из композиционных материалов требуют еще и дополнительных затрат на обслуживание: замену на чугунные в осенне-зимний период.

Приведенные цены на товары и услуги могут быть уточнены применительно к рассматриваемому периоду, но соотношение цен тормозных колодок и стоимости ремонта колесных пар из-за повреждений и дефектов, появляющихся на поверхности катания колес при применении колодок из композиционного материала, принципиально не изменится. Главный вывод состоит в том, что экономический эффект от применения тормозных колодок следует оценивать не обособленно, ориентируясь на цену покупки колодок, а совместно с затратами на эксплуатацию колесных пар при использовании рассматриваемых колодок.

Недостатки стандартов и технических условий на тормозные колодки и предложения по их усовершенствованию

В дополнение к сказанному выше еще раз подчеркнем, что основные документы, определяющие технические требования к тормозным колодкам из композиционных материалов (асбестовых, безасбестовых и других), а именно стандарты и технические условия, не регламентируют процентное содержание входящих в эти материалы веществ и их химический состав. В результате железнодорожный подвижной состав оснащается тормозными колодками из композиционных материалов без всякого контроля процентного содержания входящих в него ингредиентов, веществ и их химических характеристик. Потребители таких колодок (железнодорожники, собственники вагонов) лишены возможности проверять состав и качество композиционного материала. Это недопустимо с позиций гарантирования качества композиционных колодок и безопасности эксплуатации подвижного состава. Согласно ГОСТ 2.109-73 «ЕСКД. Основные требования к чертежам», материал любого оборудования, соответственно и тормозных колодок, должен быть указан на чертежах деталей тормозных систем в основной надписи, в спецификации изделия (колодок). Но нигде, ни в одном документе, ни в одном чертеже тормозных колодок из композиционного материала не указаны компоненты (ингредиенты, вещества), входящие в композиционный материал, их количество, химический состав. В технических условиях и стандартах на композиционные колодки нет гарантий изготовителя на то, что эксплуатация их не приведет к образованию на

поверхности катания колес дефектов (кольцевых выработок и др.). Поскольку **состав композиции не регламентирован, то изготовитель может его произвольно изменять.**

В Украине Технические условия ТУ У-6-05495578.017-2001 и другие на композиционные тормозные колодки разработаны и принадлежат их изготовителю ТОВ «Трибо». При этом ТОВ «Трибо» утверждает, что состав материала композиционных колодок является предметом их изобретения и поэтому не указан в технических условиях и стандартах. Такое объяснение отсутствия в нормативных документах регламентирования состава веществ и процентного содержания каждого компонента в композиционном материале тормозных колодок является безосновательным. Если изготовители колодок считают, что используемые в композиционных колодках материалы обладают новизной, то его авторы могут запатентовать этот материал и далее без каких-либо опасений относительно утраты авторских прав указывать состав композиционного материала в стандартах, технических условиях и другой документации. Однако за несколько десятков лет с момента создания технических условий на композиционные колодки в их текст не внесен состав композиционного материала, как это должно быть и имеет место в стандартах на тормозные колодки из чугуна, где детально регламентирован не только химический состав чугуна, но и параметры его микроструктуры, чтобы потребитель тормозных колодок мог контролировать их соответствие требованиям стандарта.

Колодки тормозные композиционные не предусматривают контроля прочности и надежности тормозных колодок из композиционного материала путем излома колодки под прессом. Причина такого отклонения от общепринятых требований к надежности и безопасности тормозных колодок состоит, по-видимому, в нежелании изготовителей и поставщиков таких колодок, чтобы потребители композиционных колодок проверяли их качество путем испытания на излом, и неуверенности в том, что композиционные колодки обладают требуемыми прочностью и надежностью.

В [2], подготовленной по материалам исследований, выполненных в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины, показано, что усовершенствование нормативной документации, включая стандарты и технические условия, является значительным резервом повышения качества тормозных колодок, экономической эффективности их использования, безопасности движения железнодорожного транспорта. Технические условия на композиционные тормозные колодки необходимо существенно изменить, заложив в них требования к таким показателям, которые заказчик (потребитель) может определить и проконтролировать их соответствие декларируемым. В первую очередь это относится к процентному составу и соотношению веществ, из которых композиционный материал состоит, а также к его влиянию на поверхность катания колес. Целесообразно в стандарты и технические условия на тормозные колодки внести изменения, которые должны содержать однозначно определенные значения коэффициента трения тормозных колодок по колесной стали и показатели износа как колодок, так и колес при их использовании.

Возможности литейных производств обеспечить потребность железных дорог в качественных чугунных колодках

Потенциал литейных предприятий Республики Беларусь и Украины, несмотря на недостаточную эффективность структуры литейного производства [1], позволяет удовлетворить потребность железных дорог своих и соседних государств в тормозных колодках различных типов из чугуна. Украина импортирует значительное количество чугунных тормозных колодок из Республики Беларусь, но при этом обновляет собственное литейное производство. Так, в конце 2018 г. в г. Никополе Днепропетровской области на заводе трубопроводной арматуры ТОВ «М-ЛИТ» введен в эксплуатацию новый комплекс оборудования для производства литья из серого и высокопрочного чугуна. Этот комплекс представляет первую очередь масштабной реконструкции завода. Производственная мощность его составляет до 800 т литья в месяц, из которых 200 т отливок уходит на собственное потребление. После второго этапа реконструкции общая производственная мощность составит до 1500 т литья в месяц.

Цех чугунного литья на заводе, в котором изготавливают тормозные чугунные колодки (см. рисунок), оснащен современным оборудованием. Плавильные мощности представляет трехтонная индукционная печь «Inductotherm» (Англия, 2017 г.). Вторая очередь завода предусматривает приобретение еще и шеститонной печи. В состав оборудования входят спектральная лаборатория ARL03460, ThermoFisherScientific (Швейцария, 2017 г.); автоматическая формовочная линия «DISA MATCH 32×32» (Дания, 2007 г.) с размером кома 813×813×650 мм и производительностью до 100 форм в час; автоматический смесеизготовительный комплекс «Eirich» (Германия, 2017 г.); стержневые машины «Leamre» (Германия, 2016 г.),

способ изготовления Cold-box-процесс; участок крупной формовки OmegaFoundryMachinery (Англия, 2016 г.); очистные дробеметные камеры и галтовочные барабаны; печь для термической обработки литья; оборудование для изготовления модельно-стержневой оснастки HAAS (США, 2017 г.).



Образцы чугунных тормозных колодок типов «М» и «Ф» производства ТОВ «М-ЛИТ» (Никопольский завод трубопроводной арматуры)

Возможности производства: изготовление литья сложной конфигурации из чугуна разных марок (СЧ200-350, ВЧ40-50); изготовление литья массой до 120 кг на автоматической формовочной линии (АФЛ), на участке крупной формовки до 3000 кг; изготовление литья с максимальными габаритами 650×650×350 мм на АФЛ, на участке ручной формовки 2000×1300×800 мм; изготовление стержней для литейного производства; дробеструйная обработка литья; покраска отлитых изделий.

Введение в эксплуатацию этого современного литейного производства свидетельствует о развитии промышленной сферы, в том числе для обеспечения железнодорожного транспорта качественными (эталонными) чугунными тормозными колодками.

Выводы

Производимые на литейных заводах тормозные колодки из чугуна для подвижного состава железных дорог являются эталонными изделиями соответствующего назначения. Тормозные колодки из ныне применяемого композиционного материала существенно уступают тормозным колодкам из чугуна по прочности, способности отвода тепла при торможении, надежности, требуют замены в осенне-зимний период, негативно влияют на стойкость и работоспособность колесных пар из-за образования дефектов на поверхности колес, приводящих к необходимости их ремонта, демонтажа и перетачивания.

Экономическая эффективность применения каких-либо тормозных колодок определяется суммой затрат на их покупку и затрат на эксплуатацию колесных пар, работающих в комплекте с колодками. Из-за увеличения затрат на эксплуатацию колес и уменьшения срока их службы при использовании тормозных колодок из композиционного материала по сравнению с чугунными колодками суммарные затраты железной дороги нередко возрастают при применении композиционных колодок.

Стандарты и технические условия на колодки тормозные композиционные не соответствуют в полной мере требованиям качества, безопасности движения, экологическим нормам из-за отсутствия в этих нормативных документах регламентирования состава компонентов, из которых состоит так называемый «композиционный» материал, процентного содержания в нем различных компонентов и их химического состава. Необходимо внести в стандарты и технические условия изменения, предусматривающие конкретные требования к составу и процентному содержанию компонентов, входящих в композиционный материал, из которого изготавливаются тормозные колодки, а также величины коэффициента трения и требования, предусматривающие проверку на прочность и надежность композиционных колодок путем излома колодки под прессом подобно тому, как испытывают чугунные тормозные колодки.

До внесения в стандарты и технические условия требований, регламентирующих состав композиционных материалов и другие условия, необходимо ограничить использование композиционных тормозных колодок на железнодорожном транспорте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Витязь П. А., Толстой А. В., Садох М. А. Анализ состояния литейных производств Республики Беларусь // Литье и металлургия. 2019. № 3. С. 35–40.
2. Неижко И. Г., Найдек В. Л., Гаврилюк В. П. Тормозные колодки железнодорожного транспорта. Киев, 2019. 121 с.
3. Ямшинский М. М., Назаренко В. С., Кравченко К. О. Аналіз гальмівних колодок та шляхи оцінки їх перспективних конструкцій // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2015. № 1(218). С. 204–209.
4. Тартаковский, Э. Д. Использование тормозных колодок новой конструкции на железных дорогах Украины / Э. Д. Тартаковский, Е. Н. Фалендыш, Е. Н. Шапран, Л. И. Залеский, А. Л. Сумцов // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. 2014. Вип. 145. С. 100–103.
5. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Винстрот Бернд Уве, Муковоз С. П. Испытания перспективных тормозных колодок на железных дорогах Украины // Реалії та перспективи. 2015. № 07–08. С. 20–22.
6. Мартинов І. Е., Негволода К. С. Аналіз чинників, що впливають на ефективність використання автоматичних гальм вантажних вагонів // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. 2013. Вип. 139. С. 230–235.
7. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Винокурова С. В. Пути развития, тенденции и перспективы дальнейшего совершенствования тормозной колодки рельсового подвижного состава // Вагонный парк. 2015. № 5–6 (98–99). С. 32–34.
8. Бабаев А. М., Мурадян Л. А., Винокурова С. В. О тормозных колодках дорог Украины // Вагоны и вагонное хозяйство. 2010. № 4. С. 43–44.
9. Галай Э. И., Рудов П. К. Эффективность торможения пассажирских поездов – фактическая и по нормативам // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2006. Вип. 11. С. 116–119.
10. Галай Э. И., Рудов П. К., Галай И. Э., Сидорович О. А. Тормозные колодки для электропоездов: чугунные или композиционные. Режим доступа: <http://scbist.com/xx2/43779-06-2005-tormoznye-kolodki-dlya-elektropoezdov-chugunnye-ili-kompozicionnye.html>
11. Галай Э. И., Куровский М. В. Рудов П. К., Галай И. Э., Сидорович О. А. Эффективный тормоз для электропоездов // [04–2005] СЦБИСТ // Режим доступа: <http://scbist.com/xx2/43725-04-2005-effektivnyi-tormoz-dlya-elektropoezdov.html> // С. 1/11–11/11.
12. Чистяков А. В. Резиновый лебедь // Еженедельник «2000», 31.VII. 2020. № 25.

REFERENCES

1. Vytiaz P. A., Tolstoi A. V., Sadokha M. A. Analiz sostoiannya lyteinykh proyzvodstv Respublyky Belarus [Analysis of the state of the foundries of the Republic of Belarus]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 3, pp. 35–40.
2. Neyzhko Y. H., Naidek V. L., Havryliuk V. P. *Tormoznye kolodky zheleznodorozhnoho transporta* [Railway brake pads]. Kyev, 2019, 121 p.
3. Yamshynskiy M. M., Nazarenko V. S., Kravchenko K. O. Analiz halmivnykh kolodok ta shliakhy otsinkyk ikh perspektivnykh konstruktssii [Analysis of brake pads and ways to evaluate their promising designs]. *Visnyk skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia = Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 2015, no. 1(218), pp. 204–209.
4. Tartakovskij E. D., Falendysh E. N., Shapran E. N., Zaleskij L. I., Sumcov A. L. Ispol'zovanie tormoznykh kolodok novoj konstrukcii na zheleznykh dorogah Ukrainy. *Zbirnik naukovih prac UkrDAZT = Collection of scientific works UkrDAZT*, 2014, vyp. 145, pp. 100–103.
5. Muradyan L. A., Shaposhnik V. Yu., Vinstrot Bernd Uve, Mukovoz S. P. Ispytaniya perspektivnykh tormoznykh kolodok na zheleznykh dorogah Ukrainy [Tests of promising brake pads on the railways of Ukraine]. *Realii ta perspektivy = Realities and prospects*, 2015, no. 07–08, pp. 20–22.
6. Martynov I. E., Nehvoloda K. S. Analiz chynnykiv, sheho vplyvaiut na efektyvnist vykorystannia avtomatychnykh halm vantazhnykh vahoniv [Analysis of the factors influencing efficiency of use of automatic brakes of freight cars]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT = Collection of scientific works of UkrDAZT*, 2013, vyp. 139, pp. 230–235.
7. Muradyan L. A., Shaposhnik V. Yu., Vinokurova S. V. Puti razvitiya, tendencii i perspektivy dal'nejshego sovershenstvovaniya tormoznoj kolodki rel'sovogo podvizhnogo sostava [Ways of development, tendencies and prospects for further improvement of the brake shoe of railway rolling stock]. *Vagonnyj park = Wagon fleet*, 2015, no. 5–6 (98–99), pp. 32–34.
8. Babaev A. M., Muradyan L. A., Vinokurova S. V. O tormoznykh kolodkah dorog Ukrainy [About brake pads of roads of Ukraine]. *Vagony i vagonnoe hozyajstvo = Wagons and wagon facilities*, 2010, no. 4, pp. 43–44.
9. Galaj E. I., Rudov P. K. Effektivnost' tormozheniya passazhirskih poezdov – fakticheskaya i po normativam [The efficiency of braking of passenger trains – actual and according to standards]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana = Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 2006, vyp. 11, pp. 116–119.
10. Galaj E. I., Rudov P. K., Galaj I. E., Sidorovich O. A. *Tormoznye kolodki dlya elektropoezdov: chugunnye ili kompozicionnye* [Brake pads for electric trains: cast iron or composite].
11. Galaj E. I., Kurovskij M. V. Rudov P. K., Galaj I. E., Sidorovich O. A. *Effektivnyj tormoz dlya elektropoezdov* [Effective brake for electric trains]. <http://scbist.com/xx2/43725-04-2005-effektivnyi-tormoz-dlya-elektropoezdov.html>.
12. Chistyakov A. V. *Rezinovyj lebed'* [Rubber Swan]. *Ezhenedel'nik "2000"* – 31.VII, 2020, no. 25.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-38-42>
УДК 621.74

Поступила 27.01.2021
Received 27.01.2021

ТЕХНОЛОГИИ РАФИНИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРОДУВКОЙ ГАЗАМИ

М. А. САДОХА, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: cadoxa.m@gmail.com, тел. +375-29-778-84-65

А. А. АНДРУШЕВИЧ, Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 99. E-mail: andru49@mail.ru, тел. +375-29-774-12-30

Представлены результаты анализа различных методов рафинирования алюминиевых сплавов от растворенных газов и неметаллических включений. Изучено влияние ряда технологических факторов каждого метода на качество расплава. Приведены примеры оборудования для реализации процессов. Для анализа эффективности применения разных вариантов технологий рафинирования алюминиевых сплавов проведено их ранжирование. Результаты анализа находятся в корреляции с тенденциями распространения в литейных цехах различных процессов рафинирования алюминиевых сплавов. Показано, что продувка расплава инертными газами через вращающийся импеллер по комплексу показателей наиболее эффективна по сравнению с другими методами.

Ключевые слова. Алюминиевый сплав, расплав, отливка, рафинирование, инертный газ, флюс, установка рафинирования, плазменная обработка, импеллер.

Для цитирования. Садоха, М. А. Технологии рафинирования алюминиевых сплавов продувкой газами / М. А. Садоха, А. А. Андрушевич // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 38–42. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-38-42>.

TECHNOLOGIES OF REFINING OF ALUMINUM ALLOYS BY GAS BLOWING

M. A. SADOKHA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: cadoxa.m@gmail.com, tel. +38 375-29-778-84-65

A. A. ANDRUSHEVICH, Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus, 99, Nezavisimosti ave. E-mail: andru49@mail.ru, tel. + 375-29-774-12-30

The results of the analysis of various methods of refining aluminum alloys from dissolved gases and non-metallic inclusions are presented. The influence of a number of technological features of each method on the quality of the melt has been studied. Examples of equipment for the implementation of processes are presented. To analyze the effectiveness of the use of various technologies for refining aluminum alloys, their ranking was carried out. The results of the analysis are in correlation with the trends in the spread of various processes for the refining of aluminum alloys in foundries. It is shown that blowing the melt with inert gases through a rotating impeller is the most effective in terms of a set of indicators in comparison with other methods.

Keywords. Aluminum alloy, melt, casting, refining, inert gas, flux, refining unit, plasma treatment, impeller.

For citation. Sadokha M. A., Andrushevich A. A. Technologies of refining of aluminum alloys by gas blowing. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 38–42. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-38-42>.

Проблема приготовления алюминиевого расплава с пониженным содержанием газов и неметаллических включений актуальна по нескольким причинам: во-первых, стабильно получать качественные отливки с высокими физико-механическими свойствами без литейных дефектов при наличии неметаллических включений и растворенных газов практически невозможно; во-вторых, широкое применение вторичных алюминиевых сплавов сопряжено с нестабильностью содержания в них газов и неметаллических включений. Таким образом, в настоящее время технология производства отливок из алюминиевых сплавов обязательно должна включать в себя такую металлургическую подготовку расплава, как рафинирование [1, 2].

Известно много методов рафинирования алюминиевых сплавов, но большинство из них характеризуется выделением вредных веществ.

На многих предприятиях широко применяется двойное рафинирование алюминиевых сплавов: в плавильных печах их обрабатывают дегазирующими препаратами, а затем, после перелива, рафинируют в раздаточных печах флюсами на основе хлористых и фтористых солей различных металлов [1–3]. Недостатками обработки солями являются выделение в процессе рафинирования значительного количества вредных газообразных продуктов, быстрое зарастание тиглей и ковшей, дополнительное введение в расплав избыточного количества натрия.

Наиболее экологически чистым и экономически выгодным признана обработка расплава инертными газами, которые могут вводиться различными методами. Одним из наиболее простых эффективных методов является продувка расплава газами в раздаточных или плавильных печах, в том числе с использованием пористых элементов (рис. 1). Продувка расплава инертными и защитными газами через пористые элементы позволяет улучшить качество металла и исключить недостатки флюсового рафинирования [3].

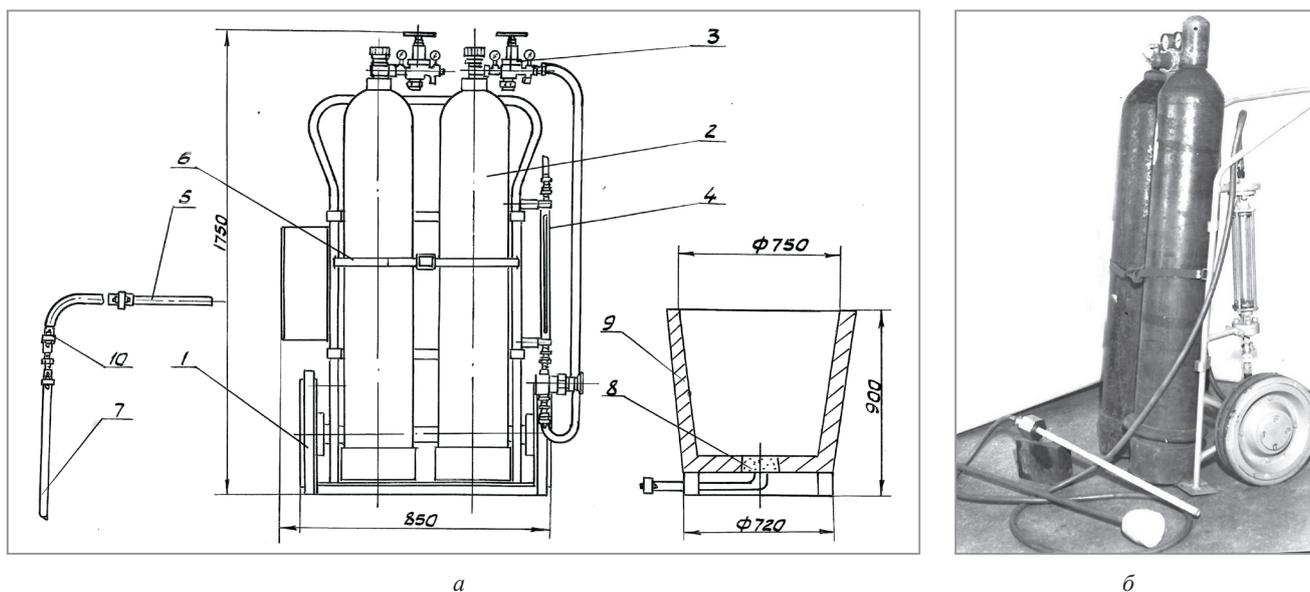


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) установки для продувки расплава инертными газами в тигле раздаточной печи:
1 – тележка; 2 – баллон с технически чистым азотом; 3 – редуктор; 4 – ротаметр; 5 – футерованная трубка, погружаемая в расплав; 6 – стяжка; 7 – газопровод; 8 – пористый элемент; 9 – ковш; 10 – переходной штуцер

Главные недостатки данного способа обработки заключаются в невозможности обеспечения равномерной продувки газа по сечению тигля, что влечет за собой необходимость в увеличении длительности обработки и может привести к чрезмерному падению температуры расплава. При этом возможно засорение пор керамической вставки (пористого элемента) и потеря эффективности процесса. Достоинством является простота способа и низкие затраты на его реализацию.

В последние десятилетия получила развитие технология плазменной обработки расплавов металлов струей аргоновой плазмы, имеющей температуру 1800–2000 °С [4]. По сравнению с технологией рафинирования холодным потоком инертного газа плазменная обработка алюминиевого расплава высокотемпературной струей обеспечивает эффективность удаления водорода и неметаллических включений без снижения температуры расплава. Характер взаимодействия такого холодного потока газа и плазменной струи с жидким металлом существенно различается. Глубина проникания плазменной струи в расплав в 2–3 раза больше, чем у холодного потока. Дробление потока газа на отдельные мелкие пузырьки, являющиеся абсорбентами водорода и неметаллических включений, начинается при меньших по сравнению с обычной продувкой давлениях и расходах газа (соответственно для аргона в 2,5–3,0 и 1,6–1,8 раза). Эффективность перемешивания жидкого металла за счет интенсификации тепло- и массообмена для плазменной струи также в 3–4 раза выше. При плазменной обработке значительно интенсифицируются процессы рафинирования и модифицирования.

Имеются передвижные и стационарные установки для плазменной обработки алюминиевых расплавов в печах и ковшах различного объема (рис. 2).

Источником питания таких установок служит сварочный выпрямитель или аналогичный с напряжением холостого хода не менее 70 А и падающей вольтамперной характеристикой. Плазменная установка

может располагаться непосредственно возле раздаточной печи или заливочного ковша, в удобном для обслуживания месте литейного цеха.

Ход вертикального перемещения позволяет обрабатывать расплав в тиглях глубиной до 2 м. Система снабжения плазмообразующим газом обеспечивает расход газа до 1,5–2,0 м³/ч.

Эффективность плазменной обработки проверена на сплаве АК9ч (ГОСТ 1583-93) при производстве алюминиевого литья в кокиль, под низким давлением и в песчано-глинистые формы. В качестве плазмообразующего газа применялся аргон. При этом степень удаления водорода обеспечивалась в пределах 70–75% от первоначального, содержание неметаллических включений до 60%. Пористость снижается с 2–3 баллов до 1 балла. Высокая эффективность достигается за счет увеличения энергетических параметров плазменной струи в сравнении с холодным потоком.

После обработки происходит изменение размеров включений α -твердого раствора, эвтектической и интерметаллидной фаз. Повышение сопровождается ростом производительности процесса (не более 8–10 мин) и сокращением на 40–60% флюсовых материалов, идущих на обработку расплава. Относительное удлинение сплава АК9ч возрастает в 1,5–1,6 раза с сохранением прочностных характеристик.

Наряду с преимуществами плазменной обработки ей присущи и недостатки: техническая сложность в реализации; относительно небольшой срок службы плазмотрона; необходимость специальной подготовки персонала.

В последние годы развитие и широкое применение получила технология обработки алюминиевого расплава инертными газами с использованием вращающегося импеллера [2].

Используется ряд установок различного конструктивного исполнения для металлургической обработки расплава инертными газами при помощи вращающегося импеллера. На рис. 3 показан общий вид переносимой цеховым краном установки мод. 46161 (конструкция ОАО «БЕЛНИИЛИТ»), а в табл. 1 приведена ее техническая характеристика.

Таблица 1. Техническая характеристика установки мод. 46161

Наименование параметра	Величина, характеристика
Время обработки не более, мин	15
Режим работы	Полуавтоматический
Применяемые рабочие газы	Азот, аргон (газообразные)
Давление газа, МПа (кгс/см), не более	0,63 (6,3)
Система управления	Электрическая
Частота вращения импеллера, мин ⁻¹	473/533/600
Скорость перемещения каретки, м/с	0,079
Ход каретки не более, мм	780
Установленная мощность, кВт	1,5
Габаритные размеры (д×ш×в), мм:	1022×997×1849
Масса, кг, не более	680

Опыт эксплуатации установки мод. 46161 в условиях ОАО «Сухоложский завод «Вторцветмет» (Россия) свидетельствует о высокой эффективности обработки вторичных алюминиевых сплавов аргоном. Обработка в течение 10 мин расплава, имеющего изначально 4-й балл пористости по шкале ВИАМ, позволяет гарантированно снизить пористость до 1-го балла без применения флюсов.

На рис. 4 показана схема установки, предназначенной для обработки расплава непосредственно в раздаточной печи (тигле) мод. П1873, а в табл. 2 приведена ее техническая характеристика. Установка мобильна в передвижении от одного рабочего места к другому и может быть использована также для комплексной обработки расплава инертными газами с одновременным введением в расплав порошковых флюсов.



Рис. 2. Плазменная установка для рафинирования в работе



Рис. 3. Установка для рафинирования алюминиевых сплавов мод. 46161

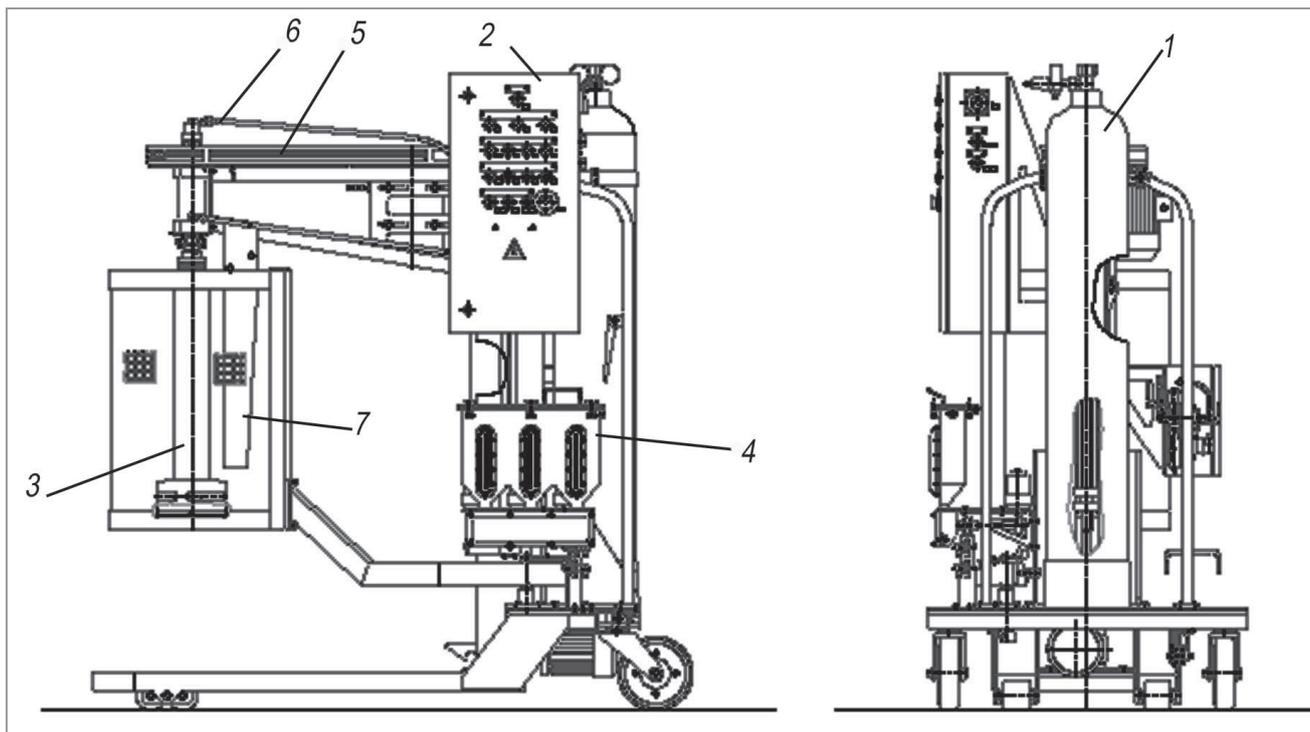


Рис. 4. Схема установки продувки расплава П1873:
 1 – баллон инертного газа; 2 – пульт управления; 3 – импеллер; 4 – бункер для загрузки флюса;
 5 – привод вращения; 6 – трубопровод подачи газа; 7 – рассекатель

Т а б л и ц а 2. Основные технические параметры установки П1873

Параметр	Величина, характеристика
Система управления	Электрическая
Режим работы	Пооперационный / полуавтоматический
Время обработки, мин, не более	22,5
Применяемый для обработки газ	Аргон, азот
Частота вращения импеллера, об/мин	466
Скорость перемещения каретки, м/с	0,05
Ход каретки, мм, не более	700
Масса установки, кг	295
Габариты установки (д×ш×в), мм	1613×860×(1746–2304)
Установленная мощность, кВт, не более	1,5

Для анализа эффективности применения различных вариантов технологий рафинирования алюминиевых сплавов проведено их ранжирование (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Показатели эффективности применения методов рафинирования

Параметр	Метод рафинирования			
	флюсовая обработка	простая продувка	плазменная обработка	продувка через импеллер
Стоимость обработки	3	1	2	1
Простота реализации	2	1	3	2
Стоимость оборудования	1	1	3	2
Длительность обработки	3	2	1	1
Частота замены рабочих органов	1	2	3	2
Качество обработки	2	3	1	1
Экология и условия труда	3	1	1	1
ИТОГО	15	11	14	10

Примечание. 1 – наилучший показатель; 2 – средний показатель; 3 – наихудший показатель.

Таким образом, из таблицы видно, что по совокупности показателей наиболее приемлемой и экологически чистой технологией рафинирующей обработки алюминиевого расплава является продувка инертным газом с применением вращающегося импеллера. Затем идет вариант простой продувки через трубку или пористые вставки в ковше. Варианты обработки флюсом и плазменной обработки, несмотря на хорошее качество получаемого сплава, в силу разных причин находятся на последних местах.

Все технологии рафинирования инертными газами оказывают положительное влияние на расплав и в разной степени позволяют:

1. Снизить в расплаве содержание газов и неметаллических включений (до 40%).
2. Усреднить и стабилизировать химический состав и температуру расплава за счет перемешивания его инертным газом.
4. Сократить расход рафинирующих, модифицирующих и легирующих добавок за счет их более полного усвоения и равномерного распределения.

5. Дополнительно повысить механические и эксплуатационные свойства алюминиевых отливок.

Данный анализ находится в корреляции с тенденциями распространения в литейных цехах в последнее время технологических процессов рафинирования алюминиевых сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гохштейн М. Б., Морозов Я. И. Рафинирование первичного алюминия от окисных включений и газов. М.: Metallurgija, 1979. С. 45–48.
2. Волочко А. Т., Садоха М. А. Алюминий: технологии и оборудование для получения литых изделий. Минск: Беларуская навука, 2011. 387 с.
3. Андрушевич А. А., Барбарич Е. Н., Шуляк П. Н. Рафинирование алюминиевых сплавов продувкой азотом // Технология автомобилестроения. 1983. № 11. С. 1–3.
4. Андрушевич А. А. Рафинирующая обработка алюминиевых сплавов // Литейное производство. 1995. № 3. С. 12–13.

REFERENCES

1. Gohshtejn M. B., Morozov Ja. I. *Rafinirovanie pervichnogo aljuminija ot okisnyh vkljuchenij i gazov* [Refining of primary aluminum from oxide inclusions and gases]. Moscow, Metallurgija Publ., 1979, pp. 45–48.
2. Volochko A. T., Sadoha M. A. *Aljuminij: tehnologii i oborudovanie dlja poluchenija lityh izdelij* [Aluminum: technologies and equipment for producing cast products]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2011, 387 p.
3. Andrushevich A. A., Barbarich E. N., Shuljak P. N. *Rafinirovanie aljuminievyh splavov produvkoy azotom* [Refining of aluminum alloys by blowing with nitrogen]. *Tehnologija avtomobilestroenija = Automotive technology*, 1983, no. 11, pp. 1–3.
4. Andrushevich A. A. *Rafinirujushhaja obrabotka aljuminievyh splavov* [Refining treatment of aluminum alloys]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 1995, no. 3, pp. 12–13.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-43-48>
УДК 621.745

Поступила 11.02.2021
Received 11.02.2021

ПОЛУЧЕНИЕ ЧУГУНА ПРИ ПЛАВКЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ В КОКСОВЫХ ВАГРАНКАХ

С.Л. РОВИН, Белорусский государственный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: rovinsl@mail.ru

Л.Е. РОВИН, В.А. ЖАРАНОВ, Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, г. Гомель, Беларусь, пр. Октября, 48. E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by

При производстве минерального сырья в вагранках в качестве побочного и вредного продукта образуется и, как правило, сбрасывается в отвал значительное количество чугуна (до 3% от исходного сырья). В статье представлены технические решения, обеспечивающие разделение минерального расплава и чугуна. Кроме того, описываются результаты оптимизации конструкции изложниц, используемых для слива жидкого металла из минераловатной вагранки и его транспортировки. Полученные в результате чугунные слитки затем вполне могут быть использованы в качестве шихты при выплавке марочных литейных сплавов.

Ключевые слова. Минеральный расплав, чугун, вагранка, установка слива металла, восстановление оксидов железа.

Для цитирования. Ровин, С.Л. Получение чугуна при плавке минерального сырья в коксовых вагранках / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, В.А. Жаранов // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 43–48. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-43-48>

PRODUCTION OF CAST IRON DURING THE MELTING OF MINERAL RAW MATERIALS IN COKE CUPOLAS

S. L. ROVIN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty ave. E-mail: rovinsl@mail.ru

L. E. ROVIN, V. A. JARANOV, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoy, Gomel, Belarus, 48, Ochyabrya ave. E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by

In the production of mineral raw materials in cupolas, as a by-product and harmful product, a significant amount of cast iron (up to 3% of the raw material) is formed and, as a rule, thrown into the dumps. The article presents technical solutions that ensure the separation of mineral melt and cast iron. In addition, the article describes the results of optimizing the design of ladders used for draining liquid metal from the mineral wool cupola and transporting it. The resulting cast iron ingots can then be used as a charge in the smelting of branded cast alloys.

Keywords. Mineral melt, cast iron, cupola furnace, install the drain of the metal, the reduction of iron oxides.

For citation. Rovin S. L., Rovin L. E., Jaranov V. A. Production of cast iron during the melting of mineral raw materials in coke cupolas. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 43–48. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-43-48>

Шахтные плавильные печи, к которым относится минераловатная коксовая вагранка, отличаются высокой эффективностью работы: высокая удельная производительность – до 150 т и более расплава на 1 м² сечения печи в сутки, тепловой КПД – до 60–70%, относительная простота управления тепловым и газодинамическим режимами, низкий уровень удельных эксплуатационных затрат [1, 2].

Полученный в вагранке минеральный расплав при температуре 1450–1470 °С разливается на орошаемые водой валки, что приводит к образованию нитей (волокон), которые затем смачиваются связующим и спрессовываются в маты различной плотности и толщины. Теплоизоляционные свойства минераловатных матов обуславливаются высокой пористостью изделий, которая достигает 90–95% [3].

Сырьем для производства минеральной ваты и теплоизоляционных материалов на ее основе являются горные породы базальтовой группы, осадочные породы типа доломитов и техногенные отходы, например, металлургические шлаки. Все перечисленные материалы, в том числе базальт, содержат примеси железа, в основном в виде оксидов Fe₂O₃. Общее содержание железа в сырье составляет в среднем около 2,5–3,5%. В качестве топлива в минераловатных вагранках, как правило, используется кокс [3].

Вместе с нагревом и расплавлением минерального сырья в вагранке происходят процессы твердофазного, а затем и жидкофазного восстановления железа. Восстановителями при этом выступают, в первую очередь, CO, углерод кокса и в определенной степени водород. По мере опускания шихты в шахте вагранки протекают следующие реакции:

в зоне прогрева – предварительное восстановление при температурах от ~ 350 до 1000 °С:



в зоне плавления и перегрева (при температурах ~ 1000–1400 °С) – косвенное восстановление за счет CO и H₂:



и прямое восстановление за счет взаимодействия расплава с коксом:



Количество образующегося металла зависит от исходного сырья и составляет, как правило, около 2–3% от массы минерального расплава. По составу металл близок к низкоуглеродистому чугуну, с некоторым превышением по примесям и содержанию серы: C – 2,4–3,2%, Si – 0,4–1,3, Mn – 0,50–1,25, P – 0,03–0,08, S – 0,3–0,9%, а также примеси Mo – 1,4–2,1%, Ni – до 0,5, Cr – до 0,3% и др.

Наличие железоуглеродистого расплава в горне минераловатной вагранки является негативным фактором, его попадание в минеральную вату снижает технико-эксплуатационные характеристики и качество готовых изделий (капли металла и корольки разрушают тонкие стеклообразные нити минеральной ваты, увеличивают плотность, снижают тепловое сопротивление теплоизоляционных матов и т.д.) и соответственно конкурентоспособность продукции. Кроме того, попадание капель чугуна в минеральный расплав приводит к быстрому износу и выходу из строя технологической оснастки и снижает технико-экономические показатели работы всей производственной линии [3].

В связи с этим из вагранки должен периодически производиться сброс накопленного металла. Как правило, при этом вместе с металлом теряется и значительное количество минерального расплава. Разделить эти материалы после затвердевания очень сложно, поэтому они вывозятся в отвал. Очевидно, что такая практика приводит к значительным потерям [4].

Для решения этой проблемы сотрудниками кафедры «Металлургия и технологии обработки материалов» ГГТУ им. П.О. Сухого и УП «Технолит» (дочернее предприятие Технопарка БНТУ «Политехник») были разработаны технология, оборудование и оснастка, предназначенные для отделения и отдельного слива чугуна, которые прошли успешную апробацию и внедрение на минераловатных вагранках различного типа ОАО «Гомельстройматериалы».

До внедрения разработанных технических решений металл периодически (2–3 раза в смену) сливали через рабочую летку вместе с минеральным расплавом и сбрасывали в приемную яму, откуда после охлаждения удаляли в отвал. Помимо 3–4 т металла в сутки при этом терялось не меньшее количество минерального расплава.

Для традиционных вагранок типа СМТ 208, расположенных на нулевой отметке, наиболее удачным техническим решением стал «слив через специальную металлическую летку»: футерованное днище вагранки профилируется с уклоном в сторону металлической летки, которая выполняется ниже основной на 200–250 мм и разворачивается в сторону приемного ковша для жидкого металла (рис. 1).

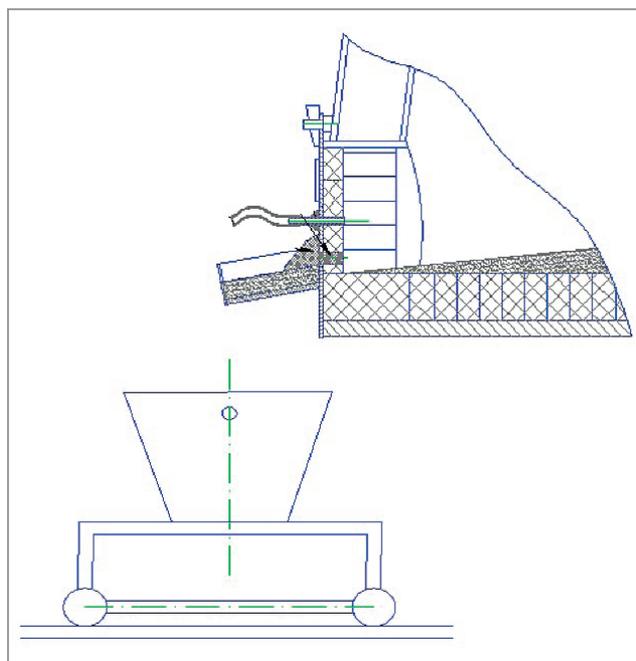


Рис. 1. Схема устройства для выпуска чугуна из минераловатной вагранки через третью летку

Для того чтобы эта зона горна не остывала в период накопления металла, над леткой выполняется дутьевое отверстие и подается воздух из дутьевого коллектора. Допускается использование и сжатого воздуха. Таким образом, над металлической леткой образуется дополнительная зона горения кокса, что повышает температуру металла и препятствует образованию настывлей. Контроль температуры осуществляется по термопаре, вмонтированной в горновой части вагранки.

Выпуск металла производится по мере его накопления в горне вагранки. Момент выпуска определяется визуально по первым каплям металла, появляющимся в летке для минерального расплава. После этого основная летка закрывается, пробивается металлическая летка, и накопившийся металл сливается в приемный ковш. При появлении в металлической летке минерального расплава она затыкается огнеупорным составом, снова открывается основная летка и возобновляется технологический процесс производства минерального волокна. Кроме технологических выпусков металла (2–3 раза в смену), производится слив чугуна в конце плавильной кампании (перед выбивкой) и при длительных (более 1 ч) остановках работы вагранки.

Внедрение разработанных технических решений позволило ОАО «Гомельстройматериалы» решить задачу регулярного отделения металла от минерального расплава, повысить качество продукции, на порядок снизить потери минерального расплава и сократить простои технологического оборудования. Кроме того, получило возможность ежемесячно сдавать на базы втормета около 100 т чугуна.

После проведения модернизации с целью увеличения объемов производства на ОАО «Гомельстройматериалы» была произведена замена плавильных печей на новые современные вагранки закрытого типа с высокотемпературным подогревом дутья, тонкой очисткой отходящих газов, автоматическим управлением и т.п. [5, 6]. Новые вагранки были установлены на высоте более 4 м от нулевой отметки и их конструкция предусматривала донное отверстие для слива металла (рис. 2). Соответственно разработанная схема отделения и слива металла оказалась неприемлемой.



Рис. 2. Прожигание донного отверстия кислородом для слива металла

Была поставлена задача разработать устройство, которое принимало бы металл непосредственно под днищем вагранки, затем опускало его на нулевую отметку для дальнейшего использования, при этом устройство не должно было препятствовать открыванию створок днища (в момент выбивки), а также прожиганию донного отверстия, контролю процесса слива металла и перекрытию донного отверстия после слива расплава.

На стадии предварительной проработки решения рассматривались различные варианты подачи ковша или изложницы под сливное отверстие в днище вагранки, в том числе с помощью шаржирного крана и поворотного крана-укосины. Один из таких вариантов представлен на рис. 3.

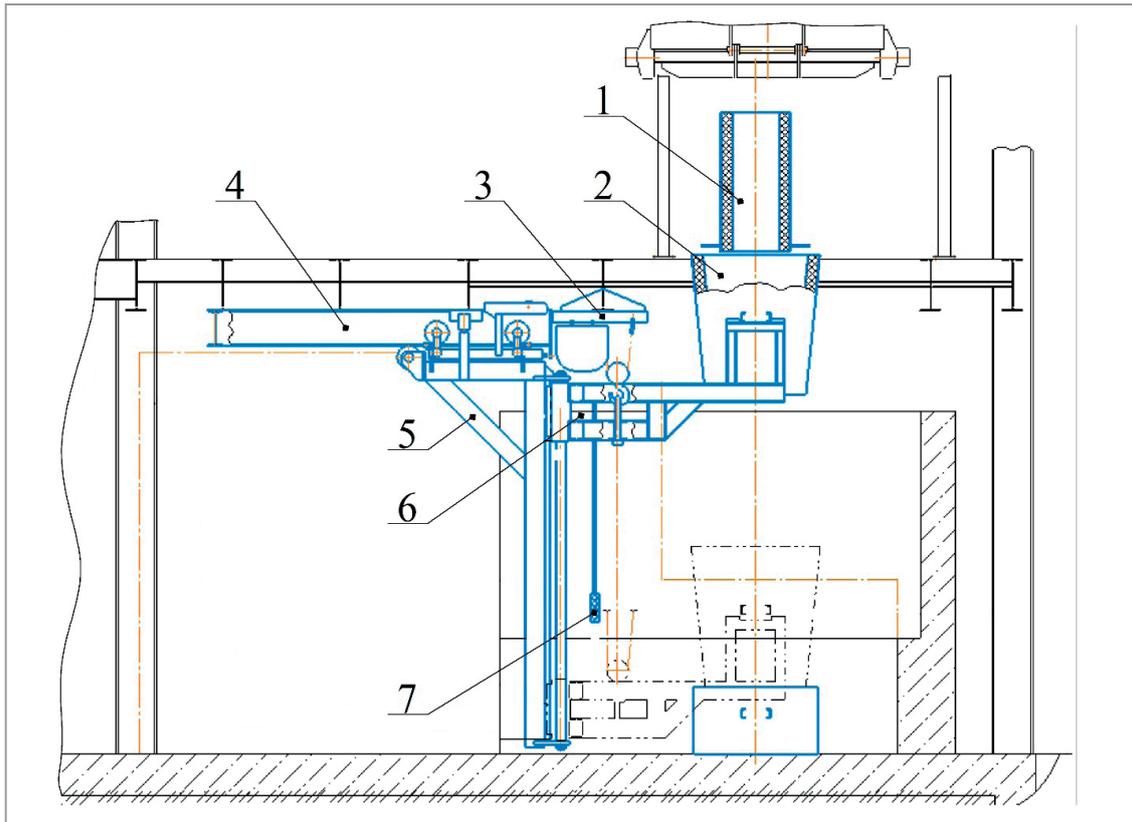


Рис. 3. Схема установки слива с помощью подъемной каретки:
 1 – отводная воронка; 2 – футерованная изложница; 3 – таль грузоподъемностью 3,2 т;
 4 – ездовая балка подъемника; 5 – рама подъемника; 6 – каретка подъемная; 7 – пульт управления

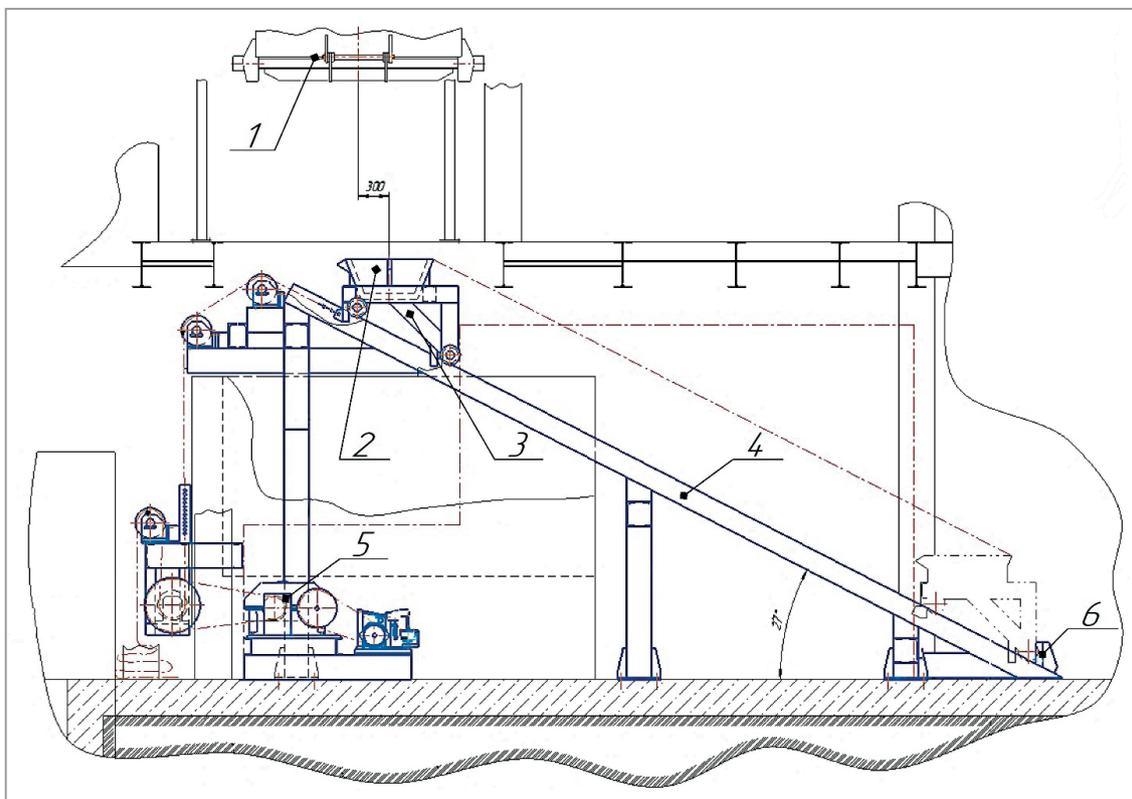


Рис. 4. Схема установки слива металла из вагранок ОАО «Гомельстройматериалы»:
 1 – днище минераловатной вагранки, 2 – изложница для слива металла, 3 – каретка для перемещения изложницы,
 4 – рельсовый путь движения каретки, 5 – привод тянущей цепи, 6 – упор

Однако после проведения расчетов эти схемы были отклонены по причине недостаточной жесткости и необходимости усиления строительных конструкций, а также трудностей с позиционированием технологической емкости (ковша или изложницы) под сливным отверстием.

Наконец, по согласованию со специалистами ОАО «Гомельстройматериалы», было принято решение о разработке системы с автономным наклонным подъемником, позволяющим не только осуществить приемку металла, но и при необходимости последующую разливку чугуна на конвейере (рис. 4).

В исходном положении изложница опущена и закреплена на каретке (рельсовой тележке). В рабочем положении изложница находится в крайнем верхнем положении, при этом ее центр совмещен с осью летки вагранки. В таком положении она не мешает процессу прожига выпускного отверстия, а после прожига выпускаемый расплав сливается в изложницу. Когда вместо металла через донное отверстие начинает поступать минеральный расплав, оно перекрывается керамической пробкой и каретка с изложницей возвращается в исходное положение. Подготовка изложницы заключается в нанесении защитного противопригарного покрытия и его подсушке.

Каретка дополнительно оснащена скребками перед передней парой колес и при ее ходе вверх происходит очистка рельсового пути от налипших брызг металла и шлака, что обеспечивает надежную эксплуатацию установки.

Пробная эксплуатация установки выявила необходимость оптимизации конструкции самой изложницы, которая должна выдерживать значительный гидростатический удар струи металла и температурное воздействие перегретого до 1400–1450 °С расплава.

Для совершенствования конструкции изложницы были исследованы вопросы получения слитков оптимальной геометрии и распределение температурных полей в изложницах различной формы с применением защитных покрытий различного состава и толщины. Исследования проводили с применением натуральных испытаний и компьютерного моделирования (рис. 5).

Некоторые из исследованных вариантов формы слитков показаны на рис. 6. Деление слитка на сегменты обусловлено соображениями удобства разделки металла перед завалкой в плавильные печи.

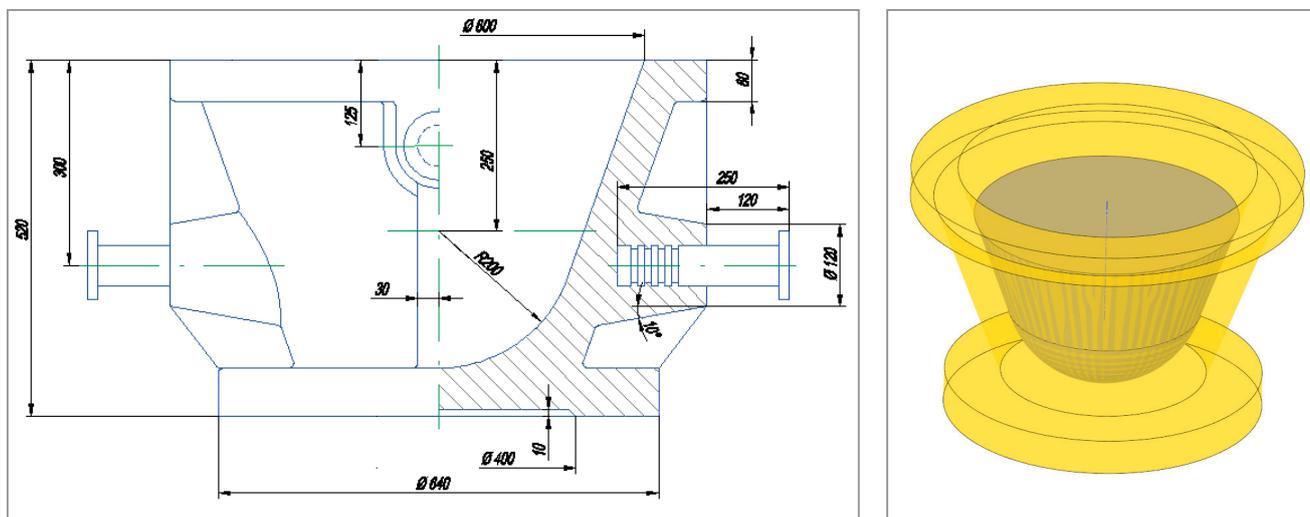


Рис. 5. Эскиз и 3D-модель изложницы

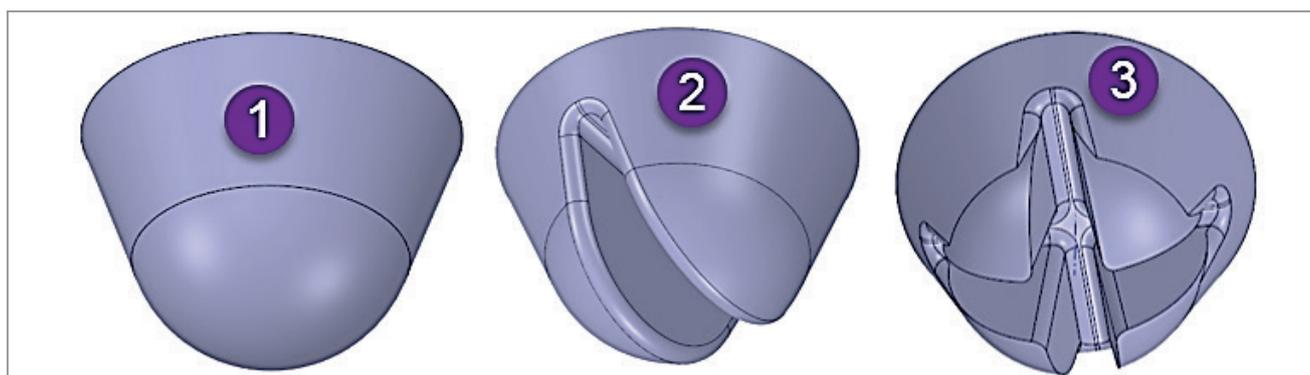


Рис. 6. Исследованные варианты формы слитков (масса слитка ~ 400 кг)

Анализ результатов моделирования позволил выявить зоны, в которых существует опасность местного перегрева тела изложниц (на 100–150 °С и более) и соответственно повышенного износа и разгара поверхности.

Для решения проблемы перегрева и повышения стойкости изложниц был спроектирован вариант с системой охлаждаемых воздушных каналов и ребер (рис. 8). Такая конструкция позволила интенсифицировать теплоотвод в местах локального перегрева и значительно снизить разгар и износ изложницы (рис. 8).

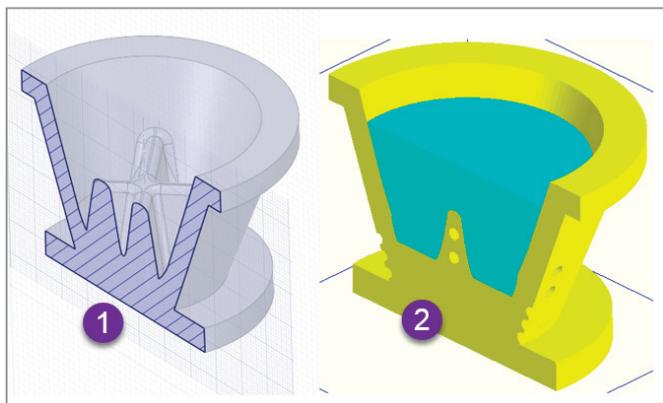


Рис. 7. Изложница 3-го типа до и после модернизации

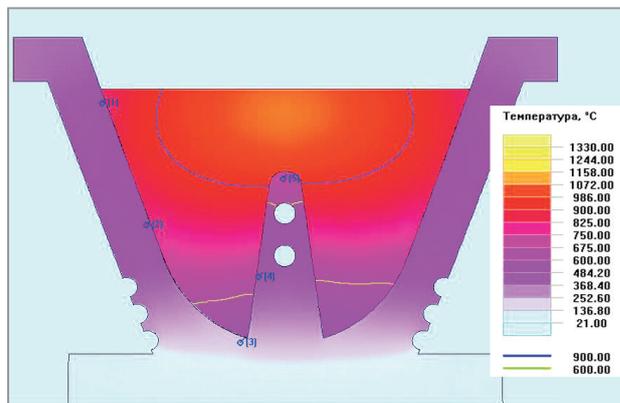


Рис. 8. Финальное распределение полей температур в модернизированной изложнице

В результате внедрения разработанных установок отделения и отдельного слива металла на ОАО «Гомельстройматериалы» удалось значительно повысить срок службы технологической оснастки, сократились простои оборудования, повысилось качество продукции, а потери минерального расплава снизились с 3–4 до 0,5–0,7%. Кроме того, это позволило ежегодно получать и реализовывать предприятиям втормета около 2000 т чугуна.

Существующие и новые минераловатные вагранки могут успешно оснащаться такого рода установками, без длительной остановки и усложнения основного производственного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селянин, И. Ф., Феоктистов А. В., Бедарев С. А. Теория и практика интенсификации технологического процесса в шахтных агрегатах малого диаметра. М.: Теплотехник, 2010. 379 с.
2. Гордон, Я. М. Тепловая работа шахтных печей с плотным слоем / Я. М. Гордон и др. М.: Metallurgiya, 1989. 120 с.
3. Майзель, И. Л. Технология теплоизоляционных материалов / И. Л. Майзель, В. Г. Сандлер. М.: Metallurgiya, 1988. 239 с.
4. Ровин, С. Л. Рециклинг металлоотходов в ротационных печах / С. Л. Ровин. Минск: БНТУ, 2015. 382 с.
5. Бобров, Ю. Л. Долговечность теплоизоляционных минераловатных материалов. М.: Стройиздат, 1987. 168 с.
6. Жуков, А. Д. Технология теплоизоляционных материалов. Часть 1. Теплоизоляционные материалы. Производство теплоизоляционных материалов. М.: МГСУ, 2011. 431 с.

REFERENCES

1. Seljanin I. F., Feoktistov A. V., Bedarev S. A. *Teorija i praktika intenzifikacii tehnologicheskogo processa v shahtnyh agregatah malogo diametra* [Theory and practice of technological process intensification in small-diameter mining units]. Moscow, Teplotehnik Publ., 2010. 379 p.
2. Gordon Ja. M. et al. *Teplovaja rabota shahtnyh pechej s plotnym sloem* [Thermal operation of mine furnaces with a dense layer]. Moscow, Metallurgija Publ., 1989, 120 p.
3. Majzel' I. L., Sandler V. G. *Tehnologija teploizoljacionnyh materialov* [Technology of thermal insulation materials]. Moscow, Metallurgija Publ., 1988, 239 p.
4. Rovin S. L. *Recikling metallootodov v rotacionnyh pechah* [Recycling of metal waste in rotary kilns]. Minsk, BNTU Publ., 2015, 382 p.
5. Bobrov Ju. L. *Dolgovechnost' teploizoljacionnyh mineralovatnyh materialov* [Durability of thermal insulation mineral wool materials]. Moscow, Strojizdat Pul., 1987, 168 p.
6. Zhukov A. D. *Tehnologija teploizoljacionnyh materialov. Chast' 1. Teploizoljacionnye materialy. Proizvodstvo teploizoljacionnyh materialov* [Technology of thermal insulation materials. Part 1. Thermal insulation materials. Production of thermal insulation materials]. Moscow, MGSU Publ., 2011, 431p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-49-52>
УДК 621.74

Поступила 12.01.2021
Received 12.01.2021

СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ХУДОЖЕСТВЕННЫХ ОТЛИВОК

С. С. ТКАЧЕНКО, В. О. ЕМЕЛЬЯНОВ, К. В. МАРТЫНОВ, Филиал РАХ «ТВОРЧЕСКАЯ МАСТЕРСКАЯ «ЛИТЕЙНЫЙ ДВОР», г. Санкт-Петербург, Россия, Расстанный проезд, 1. E-mail: spblena@mail.ru

Изложены современные методы производства художественных отливок мелкой пластики. Рассмотрен этап изготовления выплавляемой модели и разработки технологии отливки. Приведены теоретические основы получения выплавляемых моделей заданного качества. Представлен обзор технологий изготовления типовых отливок.

Ключевые слова. Художественное литье, литье по выплавляемым моделям (ЛВМ), модельный состав, керамическая форма, прочность.

Для цитирования. Ткаченко, С. С. Современная технология литья по выплавляемым моделям для производства художественных отливок / С. С. Ткаченко, В. О. Емельянов, К. В. Мартынов // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 49–52. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-49-52>.

MODERN TECHNOLOGY OF INVESTMENT CASTING FOR THE PRODUCTION OF ARTISTIC CASTINGS

S. S. TKACHENKO, V. O. EMELIANOV, K. V. MARTYNOV, Branch of the Russian Academy of Arts "CREATIVE WORKSHOP "FOUNDRY YARD", Saint Petersburg, Russia, 1, Rasstanny proezd. E-mail: spblena@mail.ru

The publication describes modern methods of production of fine plastic art castings. The stage of production of the smelted model and development of casting technology is considered. The theoretical basis for obtaining smelted models of a given quality is given. The review of technologies of production of standard castings is presented.

Keywords. Art casting, investment casting (IC), model composition, ceramic shape, strength.

For citation. Tkachenko S. S., Emelyanov V. O., Martynov K. V. Modern technology of investment casting for the production of artistic castings. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 1, pp. 49–52. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-49-52>.

Современный рынок художественного литья стремительно освобождается от дешевых подделок и переходит к тиражированию высокохудожественных изделий. Внедрение современных материалов и технологий позволяет говорить о серийном производстве данной номенклатуры заготовок. Жесткие требования коммерсантов по качеству, срокам и стоимости можно выполнить, используя унифицированные и экономичные приемы работы.

Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) позволяет воплощать в металле любые шедевры художника. Задача производства – сделать эксклюзивную отливку в нужном количестве.

Выбор модельного состава определяется доступностью на рынке и технологическими свойствами. Для художественных отливок – это состав Р-3. Состав смачивает материалы форм при температуре расплава от 75 °С (табл. 1).

Таблица 1. Результаты измерений Θ_0 на различных подложках для состава Р-3

Материал подложки	Краевой угол смачивания Θ_0 , град
Сырая резина	56
Вулканизированная резина	65
Белая резина	68
Виксинт У – 1–18	65
Алюминиевый сплав АЛ – 2	79
Свинец (Pb)	75
Латунь Л – 60	74

С повышением температуры модельного состава краевой угол смачивания уменьшается до растекания (табл. 2).

Таблица 2. Статический краевой угол смачивания для состава Р-3 в зависимости от температуры расплава (подложка – кварцевое стекло)

$T_{\text{сост.}} \text{ } ^\circ\text{C}$	100	90	85	80	75	65
$\Theta_0, \text{ град}$	Растекание	57	59	65	66	90

При этом возрастают силы адгезии и затрудняется съем модели. В ходе экспериментов по заполнению макрорельефа модельной оснастки установлено, что оптимальный интервал температур заливки для состава Р-3 от 75 до 85 °С. Предпочтение отдается нижнему пределу по усадке и легкости съема модели [1].

Температуру подложки желательно иметь не выше +25 °С по легкости съема и не ниже +10 °С по проливаемости макрорельефа. Данное замечание относится к пресс-формам на основе искусственных каучуков и силиконового герметика. Металлические пресс-формы предпочтительно заливать в интервале +20 – +10 °С, с повышением температуры возможно затрудненное отделение модели. Охлажденная ниже +10 °С оснастка дает на поверхности моделей брак в виде «заворотов».

Изготовление моделей стояков проводили в разъёмных алюминиевых формах методом свободной заливки (рис. 1). Охлаждение форм происходило в емкости с водой. Полуформы скрепляли резиновым жгутом. Это обеспечивает легкость сборки и отсутствие травмирующих элементов для оператора.

Стояк армирован латунной тонкостенной трубкой на всю длину. Выступающая из модельного состава часть трубки составляет 200–250 мм. Такая ручка позволяет уверенно манипулировать блоком при формировании керамической оболочки. При монтаже моделей стояк закрепляется в штативе и может быть ориентирован в трех плоскостях (рис. 2).

Монтаж осуществляется электропаяльником с плоским жалом площадью 2 см². При необходимости – соединить поверхности большей площади, площадка соединения проглаживается до проплавления. Это нужно для сокращения времени операции монтажа. Ножи с площадью нагреваемой части 4–8 см² применяются редко.

При разработке технологии большое внимание уделяется месту подвода питателей. Приоритет имеют обрабатываемые поверхности. При подводе металла в художественный рельеф выбирают монотонные участки. В этом случае на питатели в месте подвода делают сужение.

Положение отливки массивной частью – вверх по заливке. При наличии утолщений в заготовке обязательно применение отводных прибылей в виде массивных питателей (рис. 3). Подвод металла к отливке осуществляется через перетяжку сечением 8–16 мм². Остальные питатели размещены на обрабатываемых частях заготовки.



Рис. 1. Изготовление модели стояка



Рис. 2. Монтаж модели настенного бра на стояке (модель двухрожкового бра выполнена неразъемной). Стояк закреплен в штативе

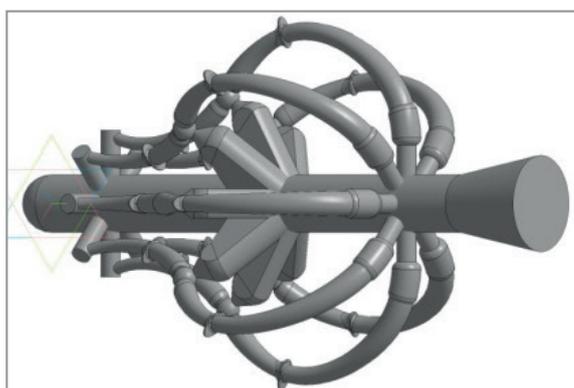


Рис. 3. Технология изготовления рожков для осветительного прибора

Пластинчатые заготовки рационально монтировать в виде пакетов с зазором между элементами 10 мм (рис. 4). Зазор необходим для обеспечения качественного отверждения связующего при формировании оболочки. Механическая прочность выплавляемой модели обеспечивается стяжками на все элементы пакета. Модель крепится к стяжке точечной пайкой. При этом расплавленный восковой состав спускают на модель под действием силы тяжести. Самой модели паяльник не касается. Стяжки соединяют со стояком питателями. В итоге получается конструкция в виде фермы, обладающей достаточной манипуляторной прочностью.

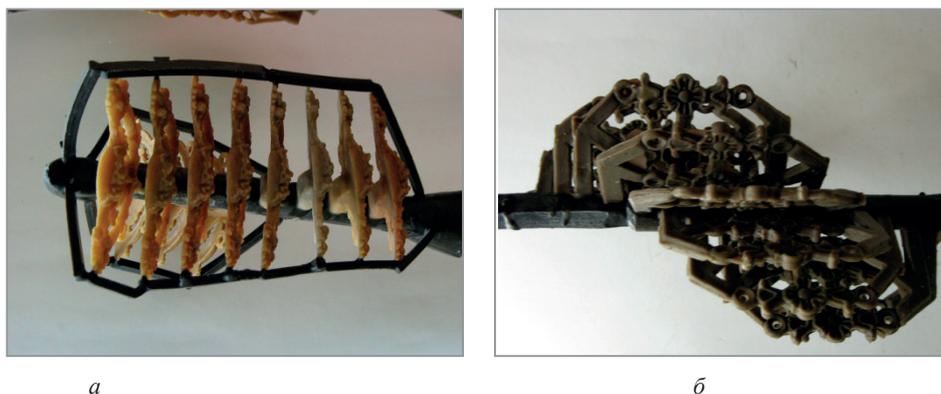


Рис. 4. Пакетный монтаж плоских отливок: *а* – перпендикулярно стояку; *б* – по винтовой линии

Зазор между пластинами нежелательно увеличивать более 15 мм. Керамическая форма должна заполнить промежуток целиком (рис. 5). Образуется монолит, который выдержит вытопку модельного состава в воде и формовку в опорном наполнителе. Выступающие консольные детали склонны к образованию трещин в области основания.

Следует стремиться максимально сократить расстояние между отливкой и стояком. В первую очередь за счет размещения стояка по оси симметрии отливки (рис. 6).

В то же время кольцевые заготовки рационально монтировать вертикально по заливке для плотной установки форм в контейнере (рис. 7).

Мелкие отливки можно размещать на коллекторах, которые в свою очередь крепятся к стояку (рис. 8). Монтаж односторонний – для обеспечения быстрого заполнения формы металлом [2]. В противном случае имеет место не пролив части отливок.



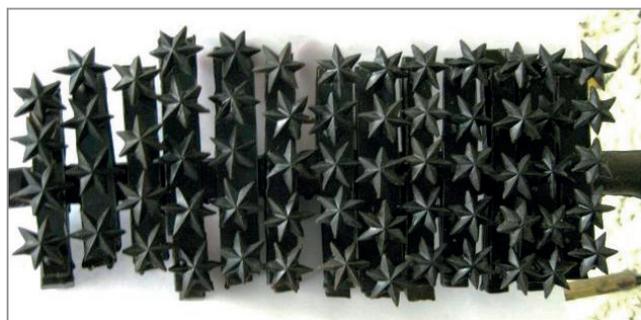
Рис. 5. Керамическая четырехслойная форма



Рис. 6. Расположение стояка по воображаемой оси вращения отливки



Рис. 7. Рациональный монтаж кольцевых заготовок



а



б

Рис. 8. Односторонний монтаж мелких художественных отливок: *а* – вид в фас; *б* – вид в профиль

Изготовление керамических форм начинают с оформления внутренних полостей стержнями. Для мелких отливок типа порфиток операция выполняется до монтажа моделей на стояк. Выплавляемые модели дополняют жеребейками в виде шпилек. Шпиловку ведут с шагом 30 мм. В качестве жеребеек удобно использовать латунную нагартованную проволоку толщиной 0,5 мм. Проволокой с бухты прокалывают модель и обрезают до нужной длины. Стержни объемом менее 100 см³ формируют из смеси высокопрочного гипса и маршаллита в соотношении 1:1. Смесь затворяют водой до вязкости 30 с по вискозиметру ВЗ-4. Время живучести гипсомаршаллитовой смеси 60–120 с. До полного затвердевания стержня проходит 20–30 мин в зависимости от объема полости (рис. 9).

При необходимости стержень дополнительно армируют стальной проволокой на всю длину. Арматуру следует вводить в стержень сразу после заливки гипсомаршаллитовой смеси. Модели со стержнями очищают от подтеков и передают на монтаж.

Стержни объемом более 100 см³ изготавливают полыми для снижения массы. Выплавляемую модель шлифуют, затем внутреннюю полость проливают суспензией на основе водного раствора кремнезоля с маршаллитом. Обсыпают покрытие формовочным песком с размером зерен 0,2–0,3 мм. Сушку покрытия осуществляют продувкой воздуха через трубку под давлением 0,5 кг/см². Формируют 3–4 слоя (рис. 10). В некоторых случаях удобно изготавливать стержень после монтажа модели на стояк.



Рис. 9. Гипсовые стержни в моделях порфиток

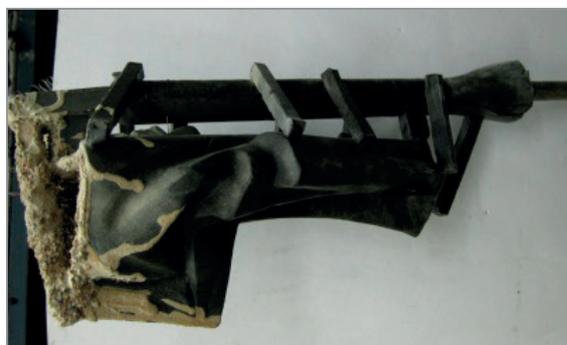


Рис. 10. Трубчатая заготовка со стержнем

Представленная технология показала гибкость и универсальность для широкого спектра художественных отливок. Высокая производительность достигается унифицированным способом монтажа моделей на стояк. Зная принцип расположения моделей по направлению к заливке, оператор самостоятельно проводит компоновку при монтаже. Для смешанной номенклатуры такой подход позволяет избежать появления стояков с недостаточно плотной компоновкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ткаченко С.С., Емельянов В.О., Мартынов К.В. Условия и особенности формирования рельефа художественных отливок // Литейное производство. 2017. № 12.
2. Шкленник Я.И. Литье по выплавляемым моделям. М.: Машиностроение, 1984.

REFERENCES

1. Tkachenko S.S., Emel'janov V.O., Martynov K.V. Usloviya i osobennosti formirovaniya rel'efa hudozhestvennyh otlivok [Conditions and features of the formation of the relief of artistic castings]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2017, no. 12.
2. Shklennik Ja.I. *Lit'e po vyplavljaemym modeljam* [Lost wax casting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-53-55>
УДК 621.74: 669.714

Поступила 21.12.2020
Received 21.12.2020

МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАКРОПРОЦЕССОВ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВОК НА ПРОЗРАЧНЫХ МОДЕЛЯХ И ЖИДКОСТЯХ

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

Разработана методика физического моделирования макропроцессов затвердевания отливок на прозрачных моделях и жидкостях. Модельными жидкостями может быть вода с различным содержанием солей. Для прозрачных моделей можно использовать стеклянные бутылки. Необходима теплоизоляция верхней части модели. Разработанная методика позволяет исследовать влияние растворенных газов на микроструктуру отливок. Показано, что газы, растворенные в жидкостях, оказывают непосредственное влияние на процесс затвердевания и его кинетику. Показано, что горячая вода, содержащая меньше растворенного воздуха, чем холодная, затвердевает в морозильной камере быстрее холодной воды.

Ключевые слова. Физическое моделирование, затвердевание отливок, модельная жидкость, прозрачная модель, растворенные газы.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Методика физического моделирования макропроцессов затвердевания отливок на прозрачных моделях и жидкостях / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 53–55. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-53-55>.

METHOD OF PHYSICAL SIMULATION OF MACRO PROCESSES OF SOLIDIFICATION OF CASTINGS ON TRANSPARENT MODELS AND LIQUIDS

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.

The technique of physical modeling of macro processes of solidification of castings on transparent models and liquids has been developed. The model liquids may be water with different salt contents. Glass bottles can be used for transparent models. Thermal insulation of the top of the model is required. The developed technique allows to investigate the effect of dissolved gases on the microstructure of castings. It has been shown that gases dissolved in liquids have a direct effect on the solidification process and its kinetics. It has been shown that hot water containing less dissolved air than cold water solidifies in the freezer faster than cold water.

Keywords. Physical modeling, solidification of castings, model liquid, transparent model, dissolved gases.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Method of physical simulation of macro processes of solidification of castings on transparent models and liquids. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no.1, pp. 53–55. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-53-55>

От макропроцессов затвердевания во многом зависят свойства и качество отливок. Но металлическая жидкость не обладает прозрачностью. Поэтому определение механизмов формирования макроструктуры отливок является довольно сложной задачей. Она существенно упрощается, если использовать физическое моделирование на прозрачных моделях и жидкостях.

В качестве модельных жидкостей может быть выбрана вода с различным содержанием солей. В воде, как и в металлических жидкостях, хорошо растворяются газы, которые выделяются в процессе затвердевания. Это дает возможность определить механизм газовыделения и его влияние на макроструктуру отливок.

В качестве прозрачных моделей можно использовать стеклянные бутылки. Они должны закрываться пробками, чтобы предотвратить газонасыщение модельных жидкостей в процессе их затвердевания.

Известно, что отливки в основном затвердевают снизу вверх и от наружной поверхности к центральной оси. Чтобы обеспечить подобный режим охлаждения модельной жидкости, необходима теплоизоляция верхней части модели (рис. 1). Для охлаждения модельной жидкости могут использоваться морозильные камеры с различной интенсивностью заморозки.

Основными параметрами макропроцессов затвердевания модельной жидкости являются: D – диаметр бутылки; h – высота уровня модельной жидкости в бутылке при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; Δh – увеличение уровня модельной жидкости после ее затвердевания; d – средний диаметр столба осевой газовой пористости; τ – время затвердевания модельной жидкости; t – температура воздуха в морозильной камере.

Рассмотрим пример применения методики физического моделирования макропроцессов затвердевания отливки на прозрачных модели и жидкости. В качестве прозрачной модели выбрана бутылка $D = 57\text{ мм}$. Модельными жидкостями служили дистиллированная и водопроводная вода. Высота уровня воды $h = 107\text{ мм}$. Морозильная камера имела $t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Установлено, что наименьшие значения $\Delta h = 4\text{ мм}$ и $d = 18\text{ мм}$ были у дистиллированной воды после ее кипячения в течение 20 мин и последующем охлаждении в закрытой бутылке до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2). Наибольшие значения $\Delta h = 17\text{ мм}$ и $d = 40\text{ мм}$ имела водопроводная вода, предварительно нагретая до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3).



Рис. 1. Общий вид модели с теплоизолированной верхней частью



Рис. 2. Затвердевшая дистиллированная вода, предварительно прокипяченная в течение 20 мин и охлажденная до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$



Рис. 3. Затвердевшая водопроводная вода, предварительно нагретая до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Поскольку объем центрального столба газосодержащей пористости затвердевшей воды при равном значении h пропорционален d^2 , то концентрация растворенного воздуха также будет пропорциональна d^2 . Тогда из полученных экспериментальных данных следует, что чем выше концентрация растворенного в воде воздуха, тем большее расширение испытывает вода при затвердевании. Это можно объяснить тем, что выделяющийся воздух оказывает давление на окружающую среду, заставляя ее расширяться. Это одна из основных причин расширения воды при ее замерзании. Если не теплоизолировать верхнюю часть бутылки, то вода на мениске относительно быстро затвердевает. Это препятствует расширению льда вверх. В этом случае он расширяется в основном от центра к периферии, что приводит к трещинам и разрушению бутылки. Если теплоизолировать ее верхнюю часть, то лед в основном беспрепятственно расширяется вверх. В этом случае трещины не образуются, а бутылка остается невредимой.

Установлено, что чем больше концентрация растворенного в воде воздуха, тем медленнее она затвердевает. Так, нагретая до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ дистиллированная вода замерзает на 30% быстрее, чем такая же вода при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Получается, что воздух, выделяющийся при затвердевании воды, замедляет этот процесс и оказывает непосредственное влияние на его кинетику. Феномен горячей воды, замерзающей быстрее холодной, называется «эффeктом Мпембы» [1, 2].

Известно, что модифицированные слитки затвердевают быстрее, чем немодифицированные [3]. В.Е. Неймарк объясняет это следующим образом: «Кроме того, происходящая под влиянием модификаторов дегазация расплава устраняет выделение на фронте кристаллизации газовых пузырьков,

тормозящих затвердевание слитка» [3]. Кроме того, установлено, что выделяющиеся при затвердевании расплавов пузырьки газа оказывают непосредственное влияние на микроструктуру отливок [4, 5]. Газы, выделяющиеся на дендритных кристаллах фаз, замедляют скорость их роста и разветвления. Это способствует получению отливок с немодифицированной микроструктурой.

Таким образом, предложенная методика физического моделирования макропроцессов затвердевания отливок на прозрачных моделях и жидкостях позволяет исследовать влияние растворенных газов на микроструктуру отливок. Растворенные в жидкостях газы оказывают непосредственное влияние на процесс затвердевания и его кинетику.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мремба Е. В., Osborne D. G. Cool? // Physics Education – Institute of Physics. 1969. Vol. 4, №. 3. Pp.172–175.
2. Kell G. S. The Freezing of Hot and Cold Water // American Journal of Physics – AIP Scatation. 1969. Vol. 37. №. 5. Pp. 564–565.
3. Неймарк В. Е. Модифицированный стальной слиток. М.: Metallurgia, 1977. 200 с.
4. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Модифицирование сплавов. Минск: Беларуская навука, 2009. 192 с.
5. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Влияние газов, выделяющихся при затвердевании отливок на микроструктуру сплавов // Литье и металлургия. 2020. № 2. С. 12–14.

REFERENCES

1. Mremba E. V., Osborne D. G. Cool? Physics Education – Institute of Physics. 1969, vol. 4, no. 3, pp. 172–175.
2. Kell G. S. The Freezing of Hot and Cold Water. American Journal of Physics – AIP Scatation. 1969, vol. 37. no. 5, pp. 564–565.
3. Neimark V. E. *Modificirovannyj stal'noj slitok* [Modified steel ingot]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 200 p.
4. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. *Modificirovanie splavov* [Alloy modification]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009. 192 p.
5. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. Vliyanie gazov, vydelyayushchihya pri zatverdevanii otlivok na mikrostrukturu splavov [Effect of gases released during solidification of castings on microstructure of alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 2, pp. 12–14.





<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-56-72>
УДК 006:001.12/18; 669.16

Поступила 11.01.2021
Received 11.01.2021

АУСФЕРРИТНЫЙ (БЕЙНИТНЫЙ) ЧУГУН: ГАРМОНИЗАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО СТАНДАРТА ISO 17804 ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ БЕЛАРУСИ

А. И. ПОКРОВСКИЙ, Б. Б. ХИНА, О. А. ТОЛКАЧЕВА, Государственное научное учреждение «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: arturu@tut.by

Описан опыт Физико-технического института (ФТИ) НАН Беларуси по гармонизации международного стандарта ISO 17804 (Отливки. Аусферритный чугун с шаровидным графитом. Классификация) и созданию белорусского аналога СТБ ISO.

Изложены аргументы выбора для гармонизации аусферритного чугуна (ADI) как наиболее перспективного по сравнению с серым и «классическим» высокопрочным. Описаны порядок включения работы по гармонизации в «План государственной стандартизации», специфика перевода текста, особенности взаимодействия с государственными органами, утверждающими стандарты (БелГИСС, Госстандарт), создания «сводки отзывов», работы с замечаниями предприятий-потребителей.

Показано, что ни один зарубежный стандарт не существует сам по себе в отрыве от других. Он тесно взаимосвязан еще как минимум с 10 – 20 другими стандартами. Гармонизация требует увязки материала с другими стандартами (иногда даже справочниками) путем публикации приложений и дополнений к основному тексту. Показано, что исключительно важен выбор статуса стандарта: идентичный (IDT) или модифицированный (MOD). Наиболее престижно создать модифицированный стандарт. Но проблема состоит в том, что требуется модифицировать одновременно и все ссылочные стандарты, а это очень трудоемкая задача. Доказано, что наиболее подходящим является «промежуточный» вариант: принятие аутентичного текста международного стандарта (в качественном переводе), но с национальными дополнениями, отражающими местную специфику в данной области.

В результате работы впервые в Беларуси разработан гармонизированный стандарт для чугунов, который регламентирует предел прочности в 800 МПа в сочетании с относительным удлинением 10%, и предел прочности 1400 МПа в сочетании с относительным удлинением 1%.

Выполнена примерная оценка потребности в ADI в Беларуси, составившая около 10 тыс. тонн в год.

Показано, что в условиях Беларуси, где около 60 предприятий располагают литейными цехами, а термические отделения имеются практически на каждом машиностроительном заводе, высокопрочные аусферритные чугуны (ADI) могут составить существенную конкуренцию стальному прокату для многих применений.

Ключевые слова. Высокопрочный аусферритный (бейнитный) чугун с шаровидным графитом, отливки, классификация, международный стандарт, гармонизация.

Для цитирования. Покровский, А. И. Аусферритный (бейнитный) чугун: гармонизация международного стандарта ISO 17804 применительно к условиям Беларуси / А. И. Покровский, Б. Б. Хина, О. А. Толкачева // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 56-72. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-56-72>.

AUSFERRITIC (BAINITIC) CAST IRON: HARMONIZATION OF INTERNATIONAL STANDARD ISO 17804 IN APPLICATION TO THE CONDITIONS OF BELARUS

A. I. POKROVSKII, B. B. KHINA, O. A. TOLKACHOVA, The Physical-Technical Institute National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevich str. E-mail: arturu@tut.by

The experience of the Physico-technical Institute (PhTI) of the National Academy of Sciences of Belarus in the harmonization of international standard ISO 17804 (Founding – Ausferritic spheroidal graphite cast irons – Classification) and development of the Belorussian analogue STB ISO is described. The reasons for the choice of austempered ductile iron (ADI) as an object for standard harmonization are presented: it is the most promising cast iron in comparison with gray and classical ductile iron. The work procedure on harmonization is described: how to include the task into the State Plan on standardization, specificity of translation of the text, peculiarities of with state organizations responsible for approbation of standards such as Belorussian Institute for Standardization and Certification (BelGISS) and State Committee on Standards (Gosstandart), writing a summary of external reviews, working with critical comments from potential users. It is outlined that any foreign standard does not exist independently but is closely connected with at least 10 to 20 other standards. Thus, harmonization necessitates coordination with

other standards and sometimes even with handbooks by adding annexes to the main text. The importance of a proper choice of the standard status is outlined: identical (ID) or modified (MOD). Developing an identical standard is prestigious but difficult because it requires harmonization of all the referenced standards, which is a very labor-consuming procedure. It is argued that the most suitable is 'intermediate' variant: adopting the authentic text of the international standard (in high-quality translation) but with annexes reflecting national specificity in this area. As a result, a harmonized standard is developed which, for the first time in Belarus, standardize the tensile strength of 800 MPa in combination with the elongation of 10% and the tensile strength of 1400 MPa in combination with the elongation of 1% for cast irons.

The annual demand for ADI in Belarus is estimated as about 10,000 ton. It is shown that in Belarus, where about 60 industrial enterprises have a foundry and almost every engineering plant has a heat-treatment shop, austempered ductile cast (ADI), which features a high strength, can successfully compete with rolled steel in certain applications.

Keywords. Ductile ausferritic (bainitic) cast iron with spheroidal graphite, castings, classification, international standard, harmonization.

For citation. Pokrovskii A. I., Khina B. B., Tolkacheva O. A. Ausferritic (bainitic) cast iron: Harmonization of international standard ISO 17804 in application to the conditions of Belarus. Foundry production and metallurgy. 2021, no. 1, pp. 57-72. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-57-72>.

Введение и актуальность проблемы

Существующие проблемы со стандартами на чугунное литье и стальной металлопрокат. Большинство стандартов в области металлургии, действующих в настоящее время в Беларуси, разработаны еще в советское время. Так как изменился технический уровень предприятий, появились новое оборудование и технологии, приборная база, новые методики исследований во многом потеряли актуальность. Во всем мире аксиомой развития стандартизации являются как разработка новых национальных стандартов, так и постоянная актуализация к специфике своей страны наиболее передовых зарубежных стандартов.

Определенная и системная работа в области актуализации стандартов проводится в России. На базе Центра стандартизации и сертификации металлопродукции ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина» (г. Москва) созданы и функционируют национальный Технический комитет по стандартизации ТК 375 «Металлопродукция из черных металлов и сплавов» и Межгосударственный комитет МТК 120 «Чугун, сталь, прокат». Важно отметить, что МТК 120 именно на межгосударственном уровне (среди стран, входящих в Содружество Независимых Государств) ведет разработку нормативных документов, регламентирующих требования к металлопродукции в области черной металлургии. Значительный акцент в этой работе делается на нужды потребителей – предприятий металлообработки. В частности, в данный момент завершается работа по актуализации межгосударственного стандарта «ГОСТ 5640 – Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры». ГОСТ 5640 особенно важен для Беларуси, так как его действие распространяется на плоский прокат (листы, рулоны, полосы, ленты), т. е. на ту продукцию, собственное производство которой в нашей стране отсутствует – вся она импортируется из России, Украины и дальнего зарубежья.

Утверждать, что в Беларуси не ведется работа по актуализации стандартов в области металлургии было бы неправильно. Беларусь является членом Евразийского Экономического Союза (ЕЭС) и в соответствии с Графиком разработки первоочередных техрегламентов ЕЭС в нашей республике планируется разработка девяти таких документов. Но, на наш взгляд, в Беларуси работа по актуализации стандартов должна быть существенно активизирована.

Авторы, учитывая свой успешный опыт по разработке в 2020 г. гармонизированного стандарта СТБ ISO 683 «Стали термообрабатываемые, легированные и автоматные» в трех частях [1–3], который введен в действие постановлением Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 6 февраля 2020 г. № 6, посчитали возможным продолжить эту работу не только для стального проката, но и для чугунов.

Усиление роли материалов с литой структурой. Лидерство в производстве и использовании того или иного машиностроительного материала определяется текущими потребностями техники. Если пронаблюдать динамику развития тех или иных материалов за относительно небольшой временной отрезок, хотя бы в сто лет, то можно заметить, что ситуация очень переменчива. Еще недавно безраздельно господствовали высокопрочные стали, но вот авиа- и космической технике потребовался пониженный стартовый вес и по показателю удельная прочность (отношение предела прочности к плотности) лидерство захватили титановые, магниевые, алюминиевые, бериллиевые сплавы. А с бурным развитием композиционных материалов, упрочненных углеродными волокнами, многие всерьез заговорили о том, что эпоха металлических материалов подходит к закату.

Если говорить о технологиях и сравнивать литейные и деформационные, то их пути развития зачастую тоже неожиданные и не совсем прогнозируемы. Еще недавно аксиомой являлся тезис, что за операцией литья всегда должна следовать прокатка, в том числе и для лучшей проработки грубой литой структуры. Считалось, и не без основания, что прокованная структура несравнимо более равномерная, прочная и пластичная, чем литая. И вот, наблюдается как бы неожиданный регресс – растет доля использования литых сталей для штампов, что обусловлено как их экономичностью, так необходимостью сохранения в структуре литых эвтектик и специальных карбидов, обеспечивающих повышенную стойкость штампа при эксплуатации.

Еще одна конкурентная «война» материалов и технологий происходит сейчас между прокатом легированных сталей и литыми высокопрочными чугунами с особой аустенито-бейнитной (в англоязычной литературе – «аусферритной») структурой. Причем и в этом случае также наблюдается своеобразный парадокс. Литье, обычно находящееся в самом начале технологической цепочки, не только успешно противостоит, а в ряде случаев значительно превосходит как по техническим параметрам, так и по экономичности прокат легированной стали, прошедшей множество энергоемких металлургических переделов.

На основании вышеизложенного в данной статье приведено обоснование выбора конкретного международного стандарта на чугуны и изложен опыт авторов в осуществлении его гармонизации применительно к условиям Республики Беларусь.

Выбор конкретного класса чугунов в качестве объекта для гармонизации стандартов

Нами выбран для гармонизации зарубежных стандартов применительно к условиям Беларуси классический и давно известный материал – литой чугун. Оценивая, какой именно класс данного материала выбрать для гармонизации, сравнивали три типа чугунов: серый (СЧ); высокопрочный (ВЧ); бейнитный (аусферритный).

При выборе материала ориентировались на следующие факторы:

1. Фактические объемы выпуска данного типа чугуна в Беларуси.
2. Рекомендации из Программы развития литейного производства в Беларуси до 2030 г. и утвержденные направления перевооружения литейного производства в Республике Беларусь.
3. Мировые тенденции в чугунолитейном производстве.

Проведенный нами анализ текущей ситуации в Беларуси по видам и количеству выпуска литья на основе открытых данных из Программы развития литейного производства Беларуси на период на 2017–2030 гг. представлен на рис. 1.



Рис. 1. Структура производимого в Беларуси литья по видам материалов (данные за 2018 г.) из Программы развития литейного производства Беларуси на период на 2017–2030 гг.

Из рисунка видно, что в Беларуси наибольшую долю выпуска литья занимает серый чугун (65%), причем самые низкокачественные его марки СЧ10, СЧ15, СЧ20, затем следует стальное литье (15%) и только третье место занимает высокопрочный чугун с шаровидным графитом (10%). Между тем, зарубежный опыт показывает, что магистральный путь совершенствования качества чугунных отливок заключается в формировании в структуре чугуна графитных включений шаровидной формы. Наглядная иллюстрация этого тезиса приведена с использованием примеров микроструктур на рис. 2. Это же положение зафиксировано в «Программе развития литейного производства Беларуси на период на 2017–2030 гг.».

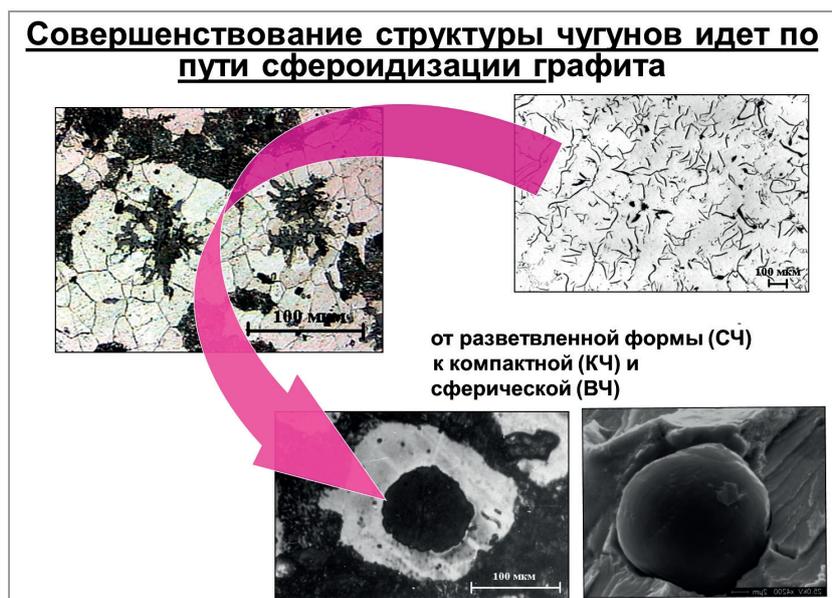


Рис. 2. Совершенствование формы графита в чугуне
(оптические фотографии микроструктур и РЭМ-изображения авторов)

Анализ действующего в Беларуси стандарта на серый чугун (ГОСТ 1412-85 «Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки») показывает, что он имеет весьма давний год выпуска (введен в действие 01.01.1987 г.), причем с грифом «без ограничения срока действия». Таким образом, ГОСТ на самые распространенные марки чугунов действует в Беларуси практически неизменным уже 34 года.

Кратко ситуацию по производству и стандартам на серый чугун в Беларуси можно резюмировать следующим образом. В Беларуси на сегодняшний день выпускаются значительные объемы (около 170 тыс. т) литья серого чугуна в соответствии с устаревшим и требующим переработки ГОСТ. Осовременивание этого ГОСТ, конечно, необходимо и, вероятно, кто-то вскоре и возьмется за эту работу. Но мы посчитали, что серый чугун – в некотором роде «вчерашний день» металлургии и сконцентрировались на высокопрочном чугуне. В связи с этим необходимо рассмотреть производство такого чугуна в Беларуси и действующие отечественные и зарубежные стандарты на ВЧ.

Ситуация с переходом на выпуск высокопрочного чугуна в Беларуси

Пока лишь некоторые предприятия Беларуси освоили выпуск и регулярно производят отливки из высокопрочного чугуна: ОАО «Гомельский завод литья и нормалей» (ГЗЛиН), ОАО «ЛМЗ УНИВЕРСАЛ» (г. Солигорск), Барановичский станкостроительный завод – филиал ЗАО «Атлант», ОАО «Могилевлифтмаш», Белоозерский энергомеханический завод. Нужно отметить, что ВЧ отливают и многие коммерческие фирмы, например, ООО «Хантэкслит» и др. Все производители в Беларуси в большинстве случаев выплавляют такие марки чугуна, как ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, т. е. «средние из линейки» по прочности.

Примером системной работы по переходу на изготовление высококачественных марок чугунов является Минский автомобильный завод (МАЗ). С 2006 г. на нем прекращен выпуск энергоемкого ковкого чугуна. Вместо него МАЗ перешел на выпуск высокопрочного чугуна, что позволило снизить энергозатраты на производство автомобилей. Замена вагранок на индукционные печи средней частоты улучшило экологию и экономические показатели. Реконструкция литейного производства позволила обеспечить выпуск более 20 тыс. т чугунных отливок.

Отдельного упоминания заслуживает филиал ОАО «Управляющая компания холдинга «Минский моторный завод» в г. Столбцы, который является образцом современного и массового производства отливок из высококачественного высокопрочного чугуна. На заводе в рамках Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь реализован инновационный проект и с января 2015 г. запущена первая очередь литейного участка для производства отливок гильзы блока цилиндров. Мощность участка 8000 т литья в год, что полностью обеспечивает потребности Минского моторного завода. Это построенное «с нуля» современное производство с автоматизированным передовым оборудованием: плавильные печи «OTTO JUNKER GmbH» (Германия), автоматизированные карусельные машины центробежного литья «KUTTNER» (Германия). В мае 2020 г. на заводе в Столбцах введен в действие

второй участок по производству мелких серий отливок по технологии холоднотвердеющих смесей (ХТС-процесс). В 2020 г. на нем было произведено пока всего лишь 130 т высокопрочного чугуна, но его проектная мощность составляет 10 000 т жидкого металла в год и выйти на этот показатель планируется к концу 2022 г.

В Беларуси действует стандарт на высокопрочный чугун (ГОСТ 7293-85 «Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки»). Отметим следующую его особенность (рис. 3): он введен в действие 01.01.1987 г. (кстати, в один день со стандартом на серый чугун) и ограничение срока действия тоже снято.

Следует особо отметить, что данный стандарт действует в практически неизменном виде более 30 лет. Для Европейских стран такой длительный срок действия стандарта – нонсенс. Для подтверждения этого факта сообщаем, что когда мы изучали зарубежные стандарты на металлопрокат, обнаружили, что их содержание меняется (причем часто кардинально) каждые несколько лет.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ		
ЧУГУН С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ ДЛЯ ОТЛИВОК		ГОСТ 7293—85
Марки		
ЧУГУН З ШАРАПАДОБНЫМ ГРАФИТАМ ДЛЯ АДЛІВАК		
Маркі		
Spheroidal graphite iron for castings. Grades		Взамен ГОСТ 7293—79 в части марок чугуна
МКС 77.080.10		
ОКП 41 1130		
Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 24 сентября 1985 г. № 3008 дата введения установлена		
01.01.87		
Постановлением Госстандарта Республики Беларусь от 17 декабря 1992 г. № 3 введен в действие в качестве государственного стандарта Республики Беларусь		
Настоящий стандарт распространяется на чугун для отливок, имеющий в структуре графит шаровидной или вермикулярной формы, и устанавливает марки чугуна, определяемые на основе механических свойств.		
1. МАРКИ		
1.1. Для изготовления отливок предусматриваются следующие марки чугуна ВЧ 35; ВЧ 40; ВЧ 45; ВЧ 50; ВЧ 60; ВЧ 70; ВЧ 80; ВЧ 100.		
1.2. Марка чугуна определяется его временным сопротивлением при растяжении и условным пределом текучести.		
Условное обозначение марки включает буквы ВЧ — высокопрочный чугун и цифровое обозначение минимального значения временного сопротивления при растяжении в МПа · 10 ⁻¹ .		
Пример условного обозначения: <i>ВЧ 50 ГОСТ 7293—85</i>		
2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА		
2.1. Механические свойства чугуна в литом состоянии или после термической обработки должны соответствовать требованиям, указанным в таблице.		
Марка чугуна	Временное сопротивление при растяжении σ_t , МПа (кгс/мм ²)	Условный предел текучести $\sigma_{0.2}$, МПа (кгс/мм ²)
ВЧ 35	350 (35)	220 (22)
ВЧ 40	400 (40)	250 (25)
ВЧ 45	450 (45)	310 (31)
ВЧ 50	500 (50)	320 (32)
ВЧ 60	600 (60)	370 (37)
ВЧ 70	700 (70)	420 (42)
ВЧ 80	800 (80)	480 (48)
ВЧ 100	1000 (100)	700 (70)
2.2. Относительное удлинение, твердость и ударная вязкость определяются при наличии требований в нормативно-технической документации и должны соответствовать нормам, приведенным в приложении 1. По согласованию между изготовителем и потребителем допускается устанавливать зна-		
Издание официальное		
★		

Рис. 3. Первая страница ГОСТ 7283-85, который введен в действие с 01.01.1987 года

Рассмотрим действующий зарубежный аналог стандарта на высокопрочный чугун. На рис. 4 приведен пример обложки и оглавления зарубежного стандарта EN 1563 «Литье. Литые чугуны с шаровидным графитом».

Данный европейский стандарт определяет классы и соответствующие требования к чугунам с шаровидным графитом. Стандарт EN 1563 «Литье. Литые чугуны с шаровидным графитом» устанавливает классификацию для двух групп чугунов с шаровидным графитом, основанную на механических свойствах, полученных в результате испытаний на обработанных испытательных образцах, специально изготовленных из отливок литого чугуна. К первой группе относятся ферритные и перлитные чугуны нескольких марок, ко второй – марки чугунов, структура которых усилена цементитом, существенно повышающим плотность чугуна. Отметим, что данный стандарт не универсален: он не описывает технические условия поставок чугунных отливок (этому посвящены стандарты EN 1559-1 и EN 1559-3). Нужно отметить также, что положения данного европейского стандарта не касаются регламентов на аусферритные чугуны с шаровидным графитом (этому посвящен стандарт EN 1564).



EN 1563:2018

Founding - Spheroidal graphite cast irons

EN 1563:2018 (E)

Contents

	Page
European foreword.....	4
Introduction.....	5
1 Scope.....	6
2 Normative references.....	6
3 Terms and definitions.....	6
4 Designation.....	8
5 Order Information.....	8
6 Manufacture.....	8
7 Requirements.....	9
7.1 General.....	9
7.2 Ferritic to pearlitic spheroidal graphite cast irons.....	9
7.3 Solid solution strengthened ferritic spheroidal graphite cast irons.....	12
8 Sampling.....	13
8.1 General.....	13
8.2 Cast samples.....	14
8.3 Samples cut from a casting.....	15
9 Test methods.....	20
9.1 Tensile test.....	20
9.2 Impact test.....	21
9.3 Hardness test.....	22
9.4 Graphite morphology examination.....	22
10 Retests.....	22
10.1 Need for retests.....	22
10.2 Test validity.....	23
10.3 Non-conforming test results.....	23
10.4 Heat treatment of samples and castings.....	23
11 Inspection documentation.....	23
Annex A (informative) Additional information on solid solution strengthened ferritic spheroidal graphite cast irons.....	24
Annex B (informative) Guidance values for mechanical properties determined on test pieces machined from samples cut from the castings.....	27
Annex C (informative) Guidance values for hardness.....	29
Annex D (informative) Nodularity.....	31
Annex E (informative) Additional information on mechanical and physical properties.....	32
Annex F (normative) Sectioning procedure for cast samples.....	36
Annex G (informative) Comparison of spheroidal graphite cast iron material designations according to EN 1560 [1] and ISO/TR 15931 [15].....	37
Annex H (informative) Fracture mechanical approach to spheroidal graphite cast irons.....	38
Annex I (informative) Significant technical changes between this European Standard and the 2011 edition.....	43
Annex J (informative) Significant technical changes between the 1997 edition and the 2011 edition.....	44
Annex ZA (informative) Relationship between this European Standard and the essential safety requirements of Annex I of the Directive 2014/68/EU aimed to be covered.....	46
Bibliography.....	47

EN 1563:2018

EUROPEAN STANDARD EN 1563

NORME EUROPÉENNE

EUROPÄISCHE NORM

August 2018

English Version

Founding - Spheroidal graphite cast irons

Fonderie - Fontes à graphite sphéroïdal Gießereiwesen - Gusseisen mit Kugelgraphit

This European Standard was approved by CEN on 9 April 2018.

CEN members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration. Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the CEN-CENELEC Management Centre or to any CEN member.

This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CEN member into its own language and notified to the CEN-CENELEC Management Centre has the same status as the official versions.

CEN members are the national standards bodies of Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, Former Yugoslav Republic of Macedonia, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Serbia, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey and United Kingdom.

EN 1563:2018 (E)

Contents

	Page
European foreword.....	4
Introduction.....	5
1 Scope.....	6
2 Normative references.....	6
3 Terms and definitions.....	6
4 Designation.....	8
5 Order Information.....	8
6 Manufacture.....	8
7 Requirements.....	9
7.1 General.....	9
7.2 Ferritic to pearlitic spheroidal graphite cast irons.....	9
7.3 Solid solution strengthened ferritic spheroidal graphite cast irons.....	12
8 Sampling.....	13
8.1 General.....	13
8.2 Cast samples.....	14
8.3 Samples cut from a casting.....	15
9 Test methods.....	20
9.1 Tensile test.....	20
9.2 Impact test.....	21
9.3 Hardness test.....	22
9.4 Graphite morphology examination.....	22
10 Retests.....	22
10.1 Need for retests.....	22
10.2 Test validity.....	23
10.3 Non-conforming test results.....	23
10.4 Heat treatment of samples and castings.....	23
11 Inspection documentation.....	23
Annex A (informative) Additional information on solid solution strengthened ferritic spheroidal graphite cast irons.....	24
Annex B (informative) Guidance values for mechanical properties determined on test pieces machined from samples cut from the castings.....	27
Annex C (informative) Guidance values for hardness.....	29
Annex D (informative) Nodularity.....	31
Annex E (informative) Additional information on mechanical and physical properties.....	32
Annex F (normative) Sectioning procedure for cast samples.....	36
Annex G (informative) Comparison of spheroidal graphite cast iron material designations according to EN 1560 [1] and ISO/TR 15931 [15].....	37
Annex H (informative) Fracture mechanical approach to spheroidal graphite cast irons.....	38
Annex I (informative) Significant technical changes between this European Standard and the 2011 edition.....	43
Annex J (informative) Significant technical changes between the 1997 edition and the 2011 edition.....	44
Annex ZA (informative) Relationship between this European Standard and the essential safety requirements of Annex I of the Directive 2014/68/EU aimed to be covered.....	46
Bibliography.....	47

Рис. 4. Пример фрагментов обложки, выходных данных и оглавления европейского стандарта EN 1563 на чугун с шаровидным графитом

Анализируя оглавление стандарта EN 1563, обращает на себя внимание тот факт, что объем текста значительно больший по сравнению с отечественным (в 15 раз). Для сравнения: ГОСТ 7293 имеет объем 3 с., EN 1563 – 47 с.

Сравнивая эти стандарты, мы не хотим лишний раз муссировать тему: «что лучше – отечественное или зарубежное?» Вопрос так не ставится. Речь идет о том, что для металлургов лучше тот стандарт, который является наиболее полным, тщательно проработанным и постоянно осовремениваемым. В этом контексте следует отметить, что в тексте стандарта EN 1563 подробно расписаны методики испытаний, типы образцов, а половину всего объема стандарта составляют 11 приложений на стр. 24–47.

Таким образом, стандарт EN 1563 является детально проработанным нормативным документом. Гармонизировать его, превратив в белорусский СТБ, безусловно, стоило бы. Ведь, например, белорусский

лидер по производству ВЧ филиал ОАО «Управляющая компания холдинга «Минский моторный завод» (г. Столбцы) предполагает начать экспортировать уже в 2021 г. часть продукции, а без нормативного соответствия отливок зарубежному стандарту это будет весьма затруднительно.

Интересно отметить, что когда мы проводили поиск в интернете в надежде на то, что гармонизированный русскоязычный вариант EN 1563 уже был кем-то ранее создан, то обнаружили его «двойник», но совсем по другой тематике – это СТБ 1563–2005 «Метод определения цвета прозрачных жидкостей». Все дело в отсутствии аббревиатуры «EN» посередине: гармонизированный стандарт был бы маркирован так: СТБ EN 1563 и далее – год принятия.

Мы считаем, что гармонизация EN 1563 – это дело сегодняшнего (а может быть, даже вчерашнего) дня, и оставим это тем белорусским предприятиям, которые планируют выходить с отливками из ВЧ на международный рынок.

Цель нашей работы рассчитана на перспективу: легализовать в Беларуси существование чугунов с прочностью выше 1000 МПа. Идея работы заключалась в том, чтобы сломать сложившийся стереотип, что чугуны это что-то такое хрупкое, некачественное, малоответственное, в общем несерьезное. Предполагалось существенно поднять планку требований к свойствам чугуна, сделать для литейщиков некий «задел на будущее», выполнить такую работу, которая будет востребована белорусской металлургией завтрашнего дня. Поэтому мы переходим к рассмотрению бейнитного (аусферритного) чугуна, который для литейщиков Беларуси пока является во многом своего рода «terra incognita».

Краткий обзор истории бейнитного чугуна

Между тем, в Европе, Америке, а теперь уже в Китае и Египте бейнитный чугун (за рубежом в основном употребляют термин «аусферритный чугун») известен уже более полувека. Началось все, вероятно, в 1973 г., когда Rieger впервые применил изотермическую закалку при обработке коленчатого вала компрессора из высокопрочного чугуна. Затем в мире стали стремительно развиваться десятки научных школ по бейнитному чугуну, опубликованы тысячи статей, защищены десятки диссертаций, разработаны как множество технических условий заводов-производителей, так и более десятка государственных стандартов. Сейчас на передовых западных фирмах освоено полномасштабное промышленное производство этого чугуна, доказана техническая и экономическая эффективность изотермической закалки для повышения эксплуатационных свойств.

На металлурга, начинающего по зарубежным источникам вникать в тему бейнитного чугуна, обрушивается лавина публикаций. Мы рекомендуем начать первоначальное ознакомление с базовой презентации объемом 36 слайдов: «ADI – Austempered Ductile Iron – Material standards», подготовленной лидером европейского рынка – фирмой Zanardi Fonderie S.p.A. (г. Минербе, Италия), имеющей 30-летнюю историю и годовой объем выпуска более 20 тыс. тонн чугуна. Ее можно найти по ссылке: <http://zanardifonderie.com/wp-content/uploads/2013/04/ADI-standards.pdf>. Для дальнейшего единообразного изложения материала необходимо определиться с терминологией и обозначением этого чугуна.

Об унификации терминологии в наименовании бейнитных (аусферритных) чугунов

В настоящее время одновременно употребляются различные аббревиатуры. В странах СНГ, и особенно в России, часто используют аббревиатуры АБЧ (аустенито-бейнитный чугун) и АБЧШГ (аустенитно-бейнитный чугун с шаровидным графитом). В немецкоязычной литературе бытует выражение Zwischenstufenvergütung von Gusseisen mit Kugelgraphit (улучшенный в промежуточной области превращений чугун с шаровидным графитом). В протоколе международной научно-технической web-конференции «Наука и технологии модифицирования чугуна – 2020», проходившей 17–18 ноября 2020 г. и организованной Набережночелнинским институтом Казанского федерального университета записано: «установить для стран СНГ единообразную терминологию в обозначении бейнитного чугуна, аналогичную международной, а именно: ADI (Austempered Ductile Iron)».

Интересно, что ни одна из именитых фирм (Ford или Chrysler), давно и широко использующих аусферритный чугун в производстве, не стала вносить свое фирменное наименование в его название. То же относится и к признанному лидеру Европейского рынка – фирме Zanardi Fonderie S.p.A. Все они используют аббревиатуру международного стандарта – ADI (Austempered Ductile Iron) – высокопрочный чугун с шаровидным графитом, термообработанный на бейнитную (аусферритную) структуру. Поэтому в дальнейшем мы будем именовать этот материал именно как Austempered Ductile Iron (ADI).

Что же касается научных исследований, а тем более производства чугунов класса ADI в Беларуси, то это направление, к сожалению, пока находится в стадии разрозненных научных исследований

и опытно-промышленных работ. Пожалуй, первопроходцем ADI в Беларуси является С. Н. Леках (БПИ). На разных этапах своей научной деятельности тематикой ADI занимались Н. И. Бестужев, А. Н. Крутилин, В. А. Стефанович (БНТУ), Л. А. Сосновский, В. В. Комиссаров, Н. В. Псырков (ОАО «Гомсельмаш») и некоторые др. В Физико-техническом институте НАН Беларуси инициатором развития тематики ADI была Л. Р. Дудецкая [4–11].

Если говорить о производстве ADI в Беларуси, то выплавляет его в промышленных масштабах пока только ОАО «ГЗЛиН», причем не регулярно, а периодически для деталей типа режущих ножей кормовых комбайнов ОАО «Гомсельмаш».

Конечно, это выглядит несколько странно, поскольку аустенитный чугун обладает рядом технических преимуществ, по которым он превосходит даже многие легированные стали:

- низкий удельный вес;
- повышенное шумопоглощение (всем известны жесткие нормы ЕЭК по шуму);
- лучшие триботехнические характеристики.

Развитие ADI было бы немыслимо без разработки теории распада аустенита в изотермических условиях, а также создания классического высокопрочного чугуна. Поэтому для понимания места, занимаемого ADI в чугунолитейной промышленности, приведем некоторые ключевые даты, вехи в исследованиях и внедрении ADI как в мире, так и в Беларуси:

1930 г. – Bain и Grossman – создание диаграммы изотермического превращения аустенита;

1940 г. – Flinn – первое применение аустемперинга (изотермической закалки) к серому чугуну;

1948 г. – К. Millis (США) – первый патент на высокопрочный чугун, первые исследования по высокопрочному чугуну в СССР (НИИ и предприятия г. Москвы, Киева);

1948 г. – Начало промышленного выпуска изделий из высокопрочного чугуна по всему миру;

1973 г. – Rieger – Первое применение аустемперинга к высокопрочному чугуну (коленчатый вал компрессора);

1986 г. – Первый временный стандарт Великобритании – BCIRA (British Cast Iron Research Association), предусматривающий три марки ADI;

1987 г. – Разработка фирмой VDG (Германия) стандарта W52 (предусматривающего четыре марки ADI);

1989 г. – Первый японский стандарт на ADI – JIS G 5503;

1990 г. – Первый стандарт США на ADI – A897-90 (ASTM);

1990 г. – Первые публикации по ADI в СССР (обзоры зарубежных исследований и отчеты о зарубежных командировках сотрудников ВАЗа, КамАЗа на предприятия мирового автопрома);

1990 г. – Первые научные работы ADI в Беларуси (школа С. Н. Лекаха, БПИ);

1997 г. – Первый европейский стандарт на ADI – EN 1564;

1997 г. – Первые опытно-промышленные работы по внедрению ADI в Беларуси на МАЗе (вероятно, школа Л. Р. Дудецкой, ФТИ НАН Беларуси);

2006 г. – Промышленные работы по внедрению ADI на ОАО «Гомсельмаш» (Л. А. Сосновский, В. В. Комиссаров, Н. В. Псырков и др.).

Поскольку темой данной статьи являются стандарты, приведем примерную хронику создания и развития стандартов на ADI в мире:

1986 г. – Первый временный стандарт Великобритании – BCIRA (British Cast Iron Research Association), предусматривающий три марки ADI;

1987 г. – Разработка фирмой VDG (Германия) стандарта W52 (предусматривающего четыре марки ADI);

1989 г. – Первый японский стандарт на ADI – JIS G 5503;

1990 г. – Первый стандарт США на ADI – A897-90 (ASTM), который далее преобразован в ASTM A897 / A897M-06;

1997 г. – Первый европейский стандарт – EN 1564 на ADI, далее преобразован в BS EN 1564:2011;

2004 г. – Создание ISO 1083:2004;

2005 г. – Создание ISO 17804:2005;

2011 г. – Создание EN 1563:2011;

2020 г. – Появление новой версии ISO 17804:2020.

Что касается стандартов именно на классификацию ADI, то первая из них приведена, вероятно, в стандарте ISO 1083:2004 (EN) «Spheroidal graphite cast irons – Classification».

Как видно из приведенного выше списка, за последние 40 лет в разных странах создано более десяти стандартов. Уметь четко сопоставлять данные из этих нормативных документов очень важно в эпоху

глобализации, поэтому таблице приведено соответствие марок ADI в четырех основных стандартах (американском, японском, европейском и международном).

Соответствие марок ADI в четырех основных стандартах: американском, японском, европейском и международном (ISO)

ASTM 897–90 (1997)	SAE J24770 (2001)	EN 1564 (1997)	ISO 17804 (Draft)
		EN-GJS-800–8	JS/800–10
850/550/10			
	AD 900		JS/900–8
		EN-GJS-1000–5	
1050/700/7	AD 1050		JS/1050–6
1200/850/4	AD 1200	EN-GJS-1200–2	JS/1200–3
1400/1100/1	AD 1400	EN-GJS-1400–1	JS/1400–1
			JS/HV400
1600/1300/	AD 1600		JS/HV500

Необходимо отметить, что промышленно-развитые европейские страны создали свои, несколько различающиеся, модификации стандарта на ADI. Покажем на примере трех стран (Франции, Германии и Австрии), какие разнообразные варианты стандарта EN 1564 существовали и как они трансформировались и переиздавались.

Франция. Стандарт Франции NF EN 1564-1997. Литье. Бейнитный чугун. Введен в действие 05.10 1997. 22 с. Французский язык. Позднее заменен на NF EN 1564/A1-2006. Действует по настоящее время.

Германия. Стандарт Германии DIN EN 1564-1997. Литье. Бейнитный чугун (Founding – Austempered ductile cast irons); German version EN 1564:1997. Количество страниц – 12. Статус: Заменен на:

- Стандарт Германии DIN EN 1564–2006. Литье. Бейнитный чугун Founding – Austempered ductile cast irons; German version EN 1564:1997 + A1:2006. Количество страниц – 24. Статус: Заменен на:

- Стандарт Германии DIN EN 1564-2012. Литье. Аустенитно-ферритный чугун с шаровидным графитом. Founding – Ausferritic spheroidal graphite cast irons; German version EN 1564:2011. Количество страниц – 39. Статус: Действует.

Австрия. Национальный стандарт Австрии OENORM EN 1564:2007 Founding – Austempered ductile cast irons (consolidated version) (Литье. Бейнитный чугун). Язык оригинала – немецкий. Количество страниц – 26. Предшествующие стандарты – EN 10002–1 (2001–07), EN 10003–1 (1994–10), EN 10045–1 (1989–12), EN 10204 (2004–10).

Выбор конкретного стандарта для гармонизации в белорусский СТБ

При всем рассмотренном выше многообразии стандартов на ADI их базовые версии представлены всего четырьмя вариантами: 1– ASTM 897 (США); 2– SAE J24770 (Япония); 3 – EN 1564 (Европа); 4 – ISO 17804 (международный).

В условиях Республики Беларусь стандарты США и Японии стоит исключить из рассмотрения по причине географической удаленности этих стран и в силу этого незначительной перспективности для экспорта и сотрудничества. Если согласиться с этим предположением, то выбор достаточно прост. Его предстоит сделать между двумя стандартами: EN 1564 и ISO 17804.

Нами проведен анализ указанных стандартов на предмет выбора наиболее пригодного для гармонизации в Беларуси. Такую оценку проводили по трем критериям:

1) год выпуска (наиболее «свежий»); 2) полнота и техническая содержательность текста; 3) серьезность и «имидж» разработчика.

Анализ EN 1564:2011 показал, что в его пользу свидетельствует наличие весьма проработанного Приложения F (по степени шаровидности графита). Стоит также отметить, что уже имеется официальный перевод EN 1564:2011 на русский язык, принадлежащий ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» (г. Москва, Россия), но в нем содержится много ошибок, искажающих смысл текста. Приведем лишь несколько примеров. В разделе 3.3 терминологический оборот “above the martensite start temperature” переведен почти дословно: «выше начальной температуры мартенсита», что не имеет физического смысла – речь идет о температуре начала мартенситного превращения. В разделе 3.8 термин “relevant wall thickness” переведен формально как «соответствующая толщина стенки», но в тексте нет указаний или пояснений, чему она соответствует. Правильный перевод – «характерная толщина стенки» – это теплофизический

термин, имеющий четкий физический смысл. Более подробно особенности перевода англоязычных стандартов, которые изобилуют специальными терминами, не известными профессиональным переводчикам (имеющим, как правило, гуманитарное образование), будут описаны ниже.

Таким образом, EN 1564:2011 (+ версия 2012 г.) действительно несколько лучше, чем ISO 17804:2005, но она оказалась вовсе не более новой. В июле 2020 г. вышла новая версия ISO 17804:2020, которая была дополнена новыми приложениями и пунктами.

Окончательным аргументом в пользу выбора нами ISO 17804:2020 было то, что он разработан организацией ISO (International Organization for Standardization). ISO считается более солидной организацией, чем European Committee for Standardization – CEN (Европейский Комитет по Стандартизации), который разрабатывает стандарты с маркировкой EN, или так называемые Евронормы.

О гармонизации стандартов: термины, определения и процедуры

Прежде чем представить собственно описание нашей работы по гармонизации, следует объяснить некоторые специфические термины, хорошо известные заводским службам стандартизации, но гораздо менее известные профессионалам-литейщикам и специалистам по чугуноу.

Гармонизация (адаптация) стандарта – это приведение его содержания в соответствие с другим стандартом для обеспечения взаимозаменяемости продукции, взаимного понимания результатов испытаний и информации. Приведем обоснование из материалов ЕЭК ООН: «Гармонизация стандартов необходима для расширения обмена товарами, промышленного сотрудничества, повышения качества, сертификации продукции, оптимизации материальных затрат». Заключительный Акт Совещания по безопасности и сотрудничеству в Европе (Хельсинки, 1975 г.) определяет, что гармонизация стандартов является одним из важных средств устранения технических препятствий в международной торговле.

На сегодняшний день гармонизация стандартов – объективный и неизбежный процесс. В Западной Европе гармонизовано с международными 80% национальных стандартов. В России гармонизировано до 20% стандартов ISO и около 60% стандартов МЭК (международного электротехнического комитета). В Казахстане гармонизировано 95% стандартов в области металлов и металлообработки. В Беларуси контроль за гармонизацией стандартов осуществляет Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации (БелГИСС).

О международной организации по стандартизации – International Organization for Standardization (ISO). Сфера деятельности ISO касается стандартизации во всех областях жизнедеятельности (кроме электротехники и электроники). На сегодняшний день в состав ISO входит 165 стран. Интересен подход к созданию аббревиатуры ISO. При создании было решено, чтобы аббревиатура звучала одинаково на всех языках. Для этого использовали греческое слово ίσος (исос) – «равный». Теперь на всех языках мира Международная организация по стандартизации имеет краткое название «ISO».

О процедуре распространения международных стандартов. Члены ISO получают право на использование и копирование стандартов. При этом порядок действий следующий:

1. Так как материал, предоставленный для включения в стандарт ISO, защищен авторским правом, разработчик стандарта вначале официально передает ISO право на его использование и копирование.
2. После этого ISO становится единственным обладателем авторского права на публикацию и использование материала.
3. Далее ISO передает право на использование материала членам ISO (тем самым 165 странам), затем дистрибьюторам и, наконец, конечным пользователям.

Однако это еще не все. Как правило, стандарты опубликованы на английском языке. Право перевода на национальный язык и процедура распространения тоже регламентированы и состоят из следующих этапов:

1. Центральный секретариат ISO обеспечивает членов ISO публикациями ISO и, что важно, устанавливает цены на стандарты ISO (при поиске в интернете мы видим уже цены дилеров).
2. Члены ISO (в том числе Беларусь) осуществляют перевод публикаций ISO и распространение, а также распространяют стандарты ISO, принятые в качестве национальных способом подтверждения или способом переизданий.

В Беларуси действуют Правила разработки государственных стандартов, утвержденные Постановлением Госстандарта № 59 от 12.07.2017 г. Они определяют последовательность стадий разработки государственного стандарта, перечень документов, разрабатываемых по итогам выполнения каждой стадии. Важная особенность состоит в том, что в принципе любая заинтересованная организация может представить свои предложения по разработке стандартов.

Порядок гармонизации стандартов в Республике Беларусь. Порядок гармонизации стандартов должен соответствовать ГОСТ 1.2–2015 «Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Правила разработки, принятия, обновления и отмены» и Постановлению Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 12 июля 2017 г. № 59 «Об утверждении Правил разработки государственных стандартов Республики Беларусь». Он включает шесть этапов:

1. Подается заявка в План государственной стандартизации Республики Беларусь, которая регистрируется на портале e-ТК для рассмотрения соответствующим национальным техническим комитетом (ТК) по стандартизации.

2. Разработка включается в План государственных стандартов (ПГС) Республики Беларусь.

3. Иницилирующая организация утверждает Техническое задание, после чего организация-разработчик приступает к разработке проекта стандарта.

4. Проект размещается на ресурсе www.stb.by и любая заинтересованная организация (предприятие) может направить свой комментарий организации-разработчику.

5. Полученные комментарии рассматриваются разработчиком стандарта и включаются в сводку отзывов. По результатам готовится окончательная редакция стандарта, которая также размещается на www.stb.by.

6. После проведения экспертиз стандарт предоставляется в Госстандарт для рассмотрения и утверждения.

Порядок получения материалов международных стандартов в Беларуси. Существуют проблемы поиска первоисточников стандартов на ADI, так как в открытом доступе публикуются только их краткие аннотации. Полный текст предлагается заказывать на платной основе. Очевидно, что в мире имеется также множество технических условий (ТУ) предприятий на ADI. Пока нам не удалось всех их найти в открытой печати.

1. В интернете большинство сайтов демонстрируют только обложку стандарта, текст предлагается за оплату.

2. Но, потратив определенное время, текст ряда стандартов все же можно найти в интернете бесплатно (на «пиратских» сайтах).

3. Однако использование стандарта, скачанного из интернета, является нелегальным.

4. Легально стандарты можно получить только в БелГИСС.

5. При этом БелГИСС реализует стандарты за оплату.

Очень важны следующие положения:

1. Если организация-исполнитель работы по гармонизации включена в План государственной стандартизации (ПГС), она получает статус «легального пользователя».

2. Такой организации материалы предоставляются бесплатно.

3. Поэтому так важно, как можно раньше включить выполняемую работу в План государственной стандартизации (ПГС).

Об исключительной важности статуса стандарта или что лучше выбрать: MOD или IDT.

Согласно ИСО/МЭК 21, гармонизированные стандарты классифицируются на:

1. Идентичные (IDT): гармонизованные стандарты, полностью идентичные по содержанию и форме. Это так называемый «метод обложки» – точный перевод международного стандарта + новая обложка.

2. Измененные или модифицированные (MOD) – это то же, но с дополнительными требованиями, отражающими специфику потребностей национальной экономики. Содержат технические отклонения, которые ясно идентифицированы и объяснены.

Разумеется, наиболее заманчиво и престижно создать модифицированный стандарт. Но проблема состоит в том, что в нем нужно модифицировать и все те стандарты, на которые есть ссылки в разделе «Литература». А в этих стандартах тоже имеются свои ссылки на стандарты и т. д. Поэтому создание модифицированного стандарта превращается в весьма сложную и трудоемкую задачу.

По нашему мнению, наиболее подходящий – промежуточный вариант: принятие аутентичного текста международного стандарта, но с национальными дополнениями, отражающими местную специфику: дополнение основных положений новыми; исключение дополнительных элементов (примечаний, сносок, библиографии, приложений); исключение рекомендуемых приложений; изменение структуры стандарта (полностью или частично).

При обозначении такого нормативного документа к шифру отечественного стандарта добавляется номер соответствующего международного: СТБ ISO + номер + текущий год, например, СТБ ISO 683-1:2020.

Особенности перевода зарубежных стандартов на русский язык

На первый и поверхностный взгляд, работа по переводу текста стандарта весьма простая, а с развитием компьютерных переводчиков – даже примитивная. В реальности это не просто не так, а совсем не так. Текст оригинала, как правило, английский или немецкий. Текст достаточно сложный и чрезвычайно насыщен специфическими техническими терминами и даже профессиональным слэнгом.

Официальный перевод может осуществлять так называемая Служба инопереводов Гильдии профессиональных переводчиков, причем у них перевод можно выполнить за оплату. Например, существует перевод стандартов DIN EN 10083 (в трех частях) и DIN EN 10084, выполненных по заказу БМЗ. Однако к качеству перевода имеются серьезные претензии. Нужно учитывать, что жанр стандарта весьма специфический и не должен допускать малейших двусмысленностей в трактовке. В реальности в переведенном Гильдией тексте стандарта имеются множество (счет идет на сотни) ошибок, вызывающих различное толкование.

Приведем несколько примеров ошибок и несуразностей в переводе упомянутого стандарта DIN EN 10083-1:

- «Стали должны быть успокоенными». Правильно: «спокойными» (т.е. полностью раскисленными).
- «Закаливаемость». Правильно: речь шла о прокаливаемости, а не о закаливании (это разные понятия) (разделы 7.1.2 и 10.3.2).
- «Если не возникает феномена предела текучести...» Правильно: речь идет о явлении «зуб текучести» (раздел 10.2.1).
- «+S (обработано на разрезаемость)». Правильно: «отжиг для снятия напряжений» (раздел 10.3.1).
- «Дезоксидация». Правильно: «раскисление» (раздел 6.2).
- «Начальная длина измерения». Правильно: речь идет о начальной длине измерительной базы образца (сноска к таблице 10).
- «С последующим расслаблением при 150 °С». Правильно: речь идет об операции термообработки – отпуске (сноска к таблице 11).
- «Диапазоны рассеянности твердости С по Роквеллу при проверке закаливаемости...» Правильно: «полосы прокаливаемости в единицах твердости С по Роквеллу...» (подписи к рис. 1, а–г).
- «Нормализация может быть заменена нормализующей формовкой». Правильно: «заменена нормализацией с температуры обработки давлением» (сноска к таблице 1).
- «Определения удельного веса алюминия». Правильно: «концентрации алюминия» (раздел В.3).
- «Жесткость С по Роквеллу». Правильно: твердость по Роквеллу, шкала С (табл. 5–7).
- «Требования к жесткости». Правильно: речь идет о твердости, а не о жесткости, это совершенно разные понятия (раздел 8.3.1).
- «Внутренние свойства». На самом деле речь идет о внутренней целостности, т.е. правильно: об отсутствии несплошностей в макроструктуре (раздел 7.5).
- «Высококачественные стали». Правильно: речь идет о качественных сталях, понятие «высококачественная сталь» в EN 10083 вообще отсутствует (таблицы 3, 8, 10, 13).

Причин ошибок перевода несколько. Во-первых, несмотря на прекрасное владение переводчиком английским, информация находится на уровне деловых переговоров или на уровне художественной литературы. Во-вторых, как видно из характера ошибок, переводчики не гнушаются использовать Google-Переводчик, часто не утруждая себя тщательным подбором вариантов. Но самое главное, что переводчики, имеющие обычно гуманитарное образование, не владеют специальной терминологией, а сталкиваясь с ней – не понимают ее смысл.

В общем виде проблема при переводе стандартов состоит в несоответствии русской и английской терминологии, а в некоторых случаях – даже понятийного аппарата. Как известно, в русском языке около 250 тыс. слов, в английском – в 2 раза больше, около 550 тыс. В словарях, в том числе специализированных, на один русский термин приводится несколько английских, и наоборот, но на самом деле предлагаемые варианты часто относятся к совершенно различным областям науки и имеют разный смысл. Иногда правильного термина вообще нет в словаре, а имеется он только в профессиональной литературе (англоязычных книгах и научно-технических журналах). В ряде случаев имеет место смещение терминов и даже понятий, распознать которое может только специалист.

Например, термин высокопрочный (дословно “high-strength”) чугуна (с шаровидным графитом) – это ductile (дословно “ковкий”), и такой неправильный перевод встречается сплошь и рядом. Но на самом деле ковкий чугун (с компактным, или хлопьевидным графитом) – это malleable iron.

Таким образом, переводчику нужно не просто знать английский и не просто знать металлосведение, но знать металлосведение на английском языке. При выборе кандидатуры в команду по гармонизации стандарта нужно учитывать, во-первых, что переводить должен специалист в области материаловосведения с большим стажем работы по специальности. Весьма желательна ученая степень не ниже кандидата наук, что служит подтверждением компетентности в данной области. Во-вторых, для него/нее обязательно свободное владение английским языком и опыт перевода и написания научно-технических статей для рецензируемых журналов (т.е. тех, в которых поданная статья критически оценивается сторонними рецензентами). Но самый предпочтительный вариант – опыт собственных публикаций в англоязычных журналах с высоким импакт-фактором, поскольку в них «жесткость» рецензирования, не только по научному содержанию, но прежде всего по правильности языка и терминологии – существенно выше, чем в низкорейтинговых журналах и тем более в сборниках трудов конференций. Таким требованиям удовлетворяет один из авторов данной статьи (Б. Б. Хина) [12].

Отметим, что отказ от платных услуг Гильдии профессиональных переводчиков был выполнен нами абсолютно легально. Мы использовали предусмотренную нормативным законодательством «возможность гармонизации стандарта разработчиком на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии». Это зафиксировано в предисловии к ранее гармонизированному нами стандарту СТБ ISO 683 (рис. 5).

СТБ ISO 683-1-2020	
УДК IDT	МКС 77.140.10; 77.140.20; 77.140.45
Ключевые слова: сталь нелегированная, химический состав, нормализация, закалка, отпуск, классификация, поставка, прокат, механические свойства, прокаливаемость ОКП РБ 24.10.6	
Предисловие	
Цели, основные принципы, положения по государственному регулированию и управлению в области технического нормирования и стандартизации установлены Законом Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации».	
1 ПОДГОТОВЛЕН Государственным научным учреждением «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» («ФТИ НАН Беларуси») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 3 ВНЕСЕН Министерством промышленности Республики Беларусь	
2 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ постановлением Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 6 февраля 2020 г. № 6	
3 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту ISO 683-1:2016 «Стали термообработываемые, легированные и автоматные. Часть 1. Нелегированные стали для закалки и отпуска» («Heat-treatable steels, alloy steels and free-cutting steels – Part 1. – Non-alloy steels for quenching and tempering», IDT). В настоящий стандарт внесены следующие редакционные изменения: – в 7.5.1 и 7.7.3 внесена дополнительная информация в виде сносок; – в таблицу 13 внесена дополнительная информация в виде сноски; – разъяснения о соответствии сталей по СТБ ISO 683-1 сталям по ГОСТ 1050-2013 «Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия» приведены в дополнительном приложении ДА. Международный стандарт разработан подкомитетом SC 4 «Термообработываемые и легированные стали» технического комитета ISO/TC 17 «Сталь» Международной организации по стандартизации (ISO). При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им государственные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДБ.	
4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ	
© Госстандарт, 2020	
Настоящий стандарт не может быть воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь	
Издан на русском языке	

Рис. 5. Предисловие к разработанному авторами стандарту СТБ ISO 683–1

На сегодняшний день в ФТИ НАН Беларуси коллективом авторов под руководством А. И. Покровского выполнены работы по гармонизации и создан проект (окончательная редакция) белорусского аналога СТБ международного стандарта ISO 17804 Founding – Ausferritic spheroidal graphite cast irons – Classification (Отливки. Аусферритный чугун с шаровидным графитом. Классификация). Титульный лист стандарта приведен на рис. 6, а на рис. 7 – фрагмент предисловия, в котором отражено, что стандарт создан ФТИ НАН Беларуси на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ	СТБ ISO/OP 17804
 ОТЛИВКИ. АУСФЕРРИТНЫЕ ЧУГУНЫ С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ. КЛАССИФИКАЦИЯ	
 АДЛІЎКІ. АУСФЕРЫТНЫЯ ЧЫГУНЫ З ШАРАПАДОБНЫМ ГРАФІТАМ. КЛАСІФІКАЦЫЯ	
 (ISO 17804:2020, IDT)	
 <i>Настоящий проект стандарта не подлежит применению до его утверждения</i>	
 	
Госстандарт Минск	

Рис. 6. Титульный лист стандарта СТБ ISO 17804

СТБ ISO/OP 17804:2020		
УДК	МКС 77.140.80	ИДТ
Ключевые слова: аусферритный чугун, графит, отливки, классификация		
Предисловие		
Цели, основные принципы, положения по государственному регулированию и управлению в области технического нормирования и стандартизации установлены Законом Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации».		
1 ПОДГОТОВЛЕН Государственным научным учреждением «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» («ФТИ НАН Беларуси») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 3.		
ВНЕСЕН «ФТИ НАН Беларуси»		
2 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ постановлением Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от _____ 20____ г. № _____		
3 Настоящий стандарт идентичен по отношению к международному стандарту ISO 17804:2005 «Отливки. Аусферритные чугуны с шаровидным графитом. Классификация» («Founding – Ausferritic spheroidal graphite cast irons – Classification», IDT).		
Международный стандарт разработан подкомитетом SC 2 «Чугуны с шаровидным графитом» технического комитета по стандартизации ISO/TC 25 «Литейные и переплавные чугуны» Международной организации по стандартизации (ISO).		
При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им государственные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА.		
4 Некоторая часть содержания международного стандарта может быть объектом патентных прав. ISO не несет ответственности за определение любых патентных прав		
5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ		
Настоящий стандарт не может быть воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь		
Издан на русском языке		

Рис. 7. Предисловие к разработанному авторами стандарту СТБ ISO 17804

На основе нашего опыта по гармонизации стандартов необходимо подчеркнуть важность работы с замечаниями заинтересованных сторон (промышленных предприятий) и ведение переписки с ними. Часто сторонний читатель может заметить мелкие ошибки и опечатки, пропущенные разработчиками, за что он, безусловно, заслуживает благодарности. Однако разработчики должны критически подходить к замечаниям, поскольку иногда предприятия в них выражают собственные интересы, не имеющие отношения к оригинальному тексту стандарта. В этом случае необходимо дать аргументированный ответ, почему замечание не может быть учтено. Следует иметь в виду, что для гармонизированных стандартов типа IDT и MOD разработчики не имеют права далеко отходить от оригинального текста и тем более изменять его смысл. В ряде случаев по требованию промышленных предприятий разработчики могут включить в конце стандарта отдельный раздел в виде дополнений, обозначаемых, как ДА1, ДА2 и т.д. Так, при гармонизации стандартов на углеродистые стали ISO 683 [1–3] нами были сделаны дополнения по сравнению составов и механических свойств сталей по ISO 683 со сталями близких марок по ГОСТ, действующим на территории Беларуси.

Сводка всех замечаний с ответами на них предоставляется в БелГИСС вместе с окончательным проектом гармонизированного стандарта. Однако на этом процесс не заканчивается. Далее следует провести работу с замечаниями, возникшими при последующей экспертизе, и окончательно оформить проект стандарта (форматирование текста, таблиц и пр.) в соответствии с требованиями БелГИСС.

Поскольку этот этап работы является длительным и трудоемким, то в составе разработчиков необходим сотрудник, обладающий знанием процедуры подготовки стандартов, коммуникабельностью

и дипломатичностью, умением быстро вникать в суть вопросов и разговаривать с представителями заводов и БелГИСС «на их языке».

На рис. 8 приведено содержание стандарта СТБ ISO 17804, а на рис. 9 – таблица механических характеристик ADI СТБ ISO 17804. Видно, что регламентированы предел прочности в 800 МПа в сочетании с относительным удлинением 10% и предел прочности 1400 МПа в сочетании с относительным удлинением 1%.

СТБ ISO/OP 17804:2020	
Содержание	
1 Область применения	1
2 Нормативные ссылки	1
3 Термины и определения	2
4 Обозначение	2
5 Данные для заказа	2
6 Производство	2
7 Требования	2
7.1 Общие требования	2
7.2 Образцы для испытаний, полученные механообработкой отдельно отлитых или прилитых образцов	3
7.3 Образцы для испытаний, полученные механообработкой образцов, вырезанных из отливки	4
7.4 Твердость	5
7.5 Структура графита	5
7.6 Структура матрицы	5
8 Отбор образцов	5
8.1 Общие требования	5
8.2 Отдельно отлитые образцы	5
8.3 Прилитые образцы	6
8.4 Образцы, вырезанные из отливки	7
9 Методы испытаний	7
9.1 Испытание на растяжение	7
9.2 Испытание на ударный изгиб по Шарпи с концентратором типа V	7
9.3 Испытания на твердость	7
10 Повторные испытания	8
10.1 Причины повторных испытаний	8
10.2 Достоверность испытаний	8
10.3 Результаты испытаний, не соответствующие требованиям	8
10.4 Термическая обработка образцов и отливок	8
11 Дополнительная информация	8
Приложение А (обязательное) Марки износостойкого аустерритного чугуна с шаровидным графитом	15
Приложение В (обязательное) Минимальные значения относительного удлинения для испытательных образцов с начальной длиной измерительной базы $L_0 = 4 \times d$	16
Приложение С (справочное) Ориентировочные значения твердости по Бринеллю	17
Приложение D (справочное) Порядок определения диапазона твердости	18
Приложение E (справочное) Ориентировочные значения для временного сопротивления при растяжении и относительного удлинения для испытательных образцов полученных механической обработкой образцов, вырезанных из отлитых образцов	19
Приложение F (справочное) Испытание на ударный изгиб на образцах без надреза	20
Приложение G (справочное) Дополнительная информация по механическим и физическим свойствам	21
Приложение H (справочное) Шаровидность, или степень сфероидизации графита	22
Приложение I (справочное) Обрабатываемость аустерритных чугунов с шаровидным графитом	24
Приложение J (справочное) Перекрестные ссылки на аналогичные марки аустерритного чугуна с шаровидным графитом	27
Библиография	28
Приложение DA (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов государственным стандартам	29

Рис. 8. Содержание стандарта СТБ ISO 17804

СТБ ISO/OP 17804:2020				
Таблица 1 – Механические свойства, измеряемые на образцах для испытаний, вырезанных из отдельно отлитых или прилитых образцов [1]				
Обозначение материала	Характерная толщина стенки отливки t, мм	Временное сопротивление (предел прочности) при растяжении R_m , Н/мм ²	0,2% условного предела текучести $R_{p0.2}$, Н/мм ²	Относительное удлинение при разрыве A, %
			не менее	
ISO 17804/JS/800-10, ISO 17804/JS/800-10RT	$t \leq 30$	800	500	10
	$30 < t \leq 60$	750		6
	$60 < t \leq 100$	720		5
ISO 17804/JS/900-8	$t \leq 30$	900	600	8
	$30 < t \leq 60$	850		5
	$60 < t \leq 100$	820		4
ISO 17804/JS/1050-6	$t \leq 30$	1050	700	6
	$30 < t \leq 60$	1000		4
	$60 < t \leq 100$	970		3
ISO 17804/JS/1200-3	$t \leq 30$	1200	850	3
	$30 < t \leq 60$	1170		2
	$60 < t \leq 100$	1140		1
ISO 17804/JS/1400-1	$t \leq 30$	1400	1100	1
	$30 < t \leq 60$	1170		При согласовании между изготовителем и заказчиком
	$60 < t \leq 100$	1140		

Рис. 9. Таблица механических характеристик ADI СТБ ISO 17804

Авторы полагают, что имеет смысл внедрять новые стандарты (СТБ ISO) на металлопродукцию в учебный процесс технических вузов Беларуси. Например, Metallургический институт Липецкого государственного технического университета благодаря непосредственному участию в работе технического комитета по стандартизации получает возможность наглядно продемонстрировать студентам, как и каким образом создаются новые стандарты, в какой степени они учитывают возможности и потребности отрасли, каковы механизмы их внедрения в практику, почему и насколько это выгодно промышленным предприятиям.

Выводы

1. Ни один зарубежный стандарт не существует сам по себе в отрыве от других. Он тесно взаимосвязан еще как минимум с 10 – 20 другими стандартами. Гармонизация требует увязки материала с другими стандартами (иногда даже справочниками и учебниками) путем публикации приложений и дополнений к основному тексту.

2. Исключительно важен статус стандарта: идентичный (IDT) или модифицированный (MOD).

3. Наиболее заманчиво и престижно создать модифицированный стандарт. Но проблема состоит в том, что в нем нужно модифицировать и все те стандарты, на которые есть ссылки в разделе «Литература». А в этих стандартах тоже имеются свои ссылки на стандарты и так далее. Поэтому создание модифицированного стандарта превращается в весьма сложную и трудоемкую задачу – ведь требуется модифицировать одновременно и все ссылочные стандарты.

4. По нашему мнению, наиболее подходящий – промежуточный вариант: принятие аутентичного текста международного стандарта, но с национальными дополнениями, отражающими местную специфику: дополнение основных положений новыми.

5. Крайне важно как можно раньше включить работу по созданию (гармонизации) стандарта в «План государственной стандартизации Республики Беларусь».

6. Важно правильно выбрать первоисточник. Нужно понимать, что все, что скачано из интернета – незаконно. Легален только официальный экземпляр из БелГИСС.

7. Необходимо постоянно отслеживать изменения в зарубежной нормативной базе. За рубежом изменения в стандартах происходят (и будут происходить) очень часто. Никто заранее предупредить об изменениях не будет. Может случиться ситуация (что у нас неоднократно и случалось), что на финише огромной работы выходит новая редакция зарубежного стандарта (причем существенно переработанная) и все придется начинать сначала.

8. Переводить на русский язык должен не просто переводчик, а переводчик и специалист в металлведении и/или металлургии (а еще лучше – в одном лице). Такие специалисты – «штучный товар», наличие их в команде обеспечивает более половины успеха.

9. На каждом этапе работ по стандартизации действовать на опережение. Всегда иметь временной лаг на форс-мажорные обстоятельства.

10. Немедленно по готовности первой редакции рассылать проект стандарта всем заинтересованным предприятиям.

11. Быть готовым к серьезным замечаниям, а иногда даже к категорическому неприятию новых стандартов, зарезервировать время на дипломатические переговоры с критиками, убеждения, разъяснения или аргументированное оспаривание замечаний, внесение корректировок в текст.

12. Авторами накоплен уникальный опыт гармонизации (адаптации) зарубежных стандартов к условиям Беларуси. Отработан механизм и специфика взаимодействия с БелГИСС и Госстандартом. Разработаны, гармонизированы, преобразованы в СТБ два международных стандарта. Все стандарты касаются металлопродукции, отзывы о них можно получить на БМЗ.

13. В ФТИ НАН Беларуси коллективом авторов под руководством А. И. Покровского выполнены работы по гармонизации и создан проект (первая редакция) белорусского аналога СТБ международного стандарта ISO 17804 Founding – Ausferritic spheroidal graphite cast irons – Classification (Отливки. Аусферритный чугун с шаровидным графитом. Классификация).

14. Таким образом, впервые в Беларуси для чугунов регламентированы предел прочности в 800 МПа в сочетании с относительным удлинением 10% и предел прочности 1400 МПа в сочетании с относительным удлинением 1%.

15. Наши предложения заключаются в проведении предварительных экспериментов по получению ADI чугунов на литейном участке ФТИ НАН Беларуси, а также совместное участие в государственных научно-технических проектах по освоению ADI в производстве.

16. Приобретя серьезный опыт по гармонизации двух зарубежных стандартов, мы предлагаем свои услуги предприятиям Беларуси в создании совершенно новых стандартов «с чистого листа» (как белорусских СТБ, так и межгосударственных уровня СНГ) на металлопродукцию и автомобильные компоненты с учетом пожеланий заказчика.

Выражаем благодарность Аделу Нофалу, профессору Центрального научно-исследовательского института металлургии (Каир, Египет) за ценные советы по составам и технологии производства ADI-чугунов и Ю.В. Кондратьеву, главному металлургу Мценского литейного завода за консультации по стандартам на ADI-чугуны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T20ПТИ-018).

ЛИТЕРАТУРА

1. СТБ ISO 683–1–2020. Стали термообработываемые, легированные и автоматные. Часть 1. Нелегированные стали для закалки и отпуска. Минск: Госстандарт, 2020. 52 с.
2. СТБ ISO 683–2–2020. Стали термообработываемые, легированные и автоматные. Часть 2. Легированные стали для закалки и отпуска. Минск: Госстандарт, 2020. 46 с.
3. СТБ ISO 683–3–2020. Стали термообработываемые, легированные и автоматные. Часть 3. Цементуемые стали. Минск: Госстандарт, 2020. 40 с.
4. Дудецкая, Л. Р. Особенности бейнитного превращения в ковком чугуне / Л. Р. Дудецкая, В. А. Ткачева, А. И. Покровский // *Материалы, технологии, инструменты*. 1998. Т. 3. № 2. С. 41.
5. Дудецкая, Л. Р. Бейнитный чугун: опыт получения и применения / Л. Р. Дудецкая, А. И. Покровский, И. С. Гаухштейн, М. И. Демин, П. С. Гурченко // *Автомобильная промышленность*. 2001. № 11. С. 33–35.

6. Дудецкая, Л. Р. Термообработка на бейнитную структуру деталей из чугуна / Л. Р. Дудецкая, А. И. Покровский, И. С. Гаухштейн, М. И. Демин, П. С. Гурченко // *Литье и металлургия*. 2002. № 1. С. 45–49.
7. Покровский, А. И. Использование высокопрочного бейнитного чугуна для изготовления зубчатых колес. / А. И. Покровский, Л. Р. Дудецкая // *Литье и металлургия*. 2015. № 2 (79). С. 126–134.
8. Покровский, А. И. Бейнитный чугун или стальной прокат: границы возможностей при изготовлении ответственных изделий / А. И. Покровский А. И., А. П. Ласковнев, Л. Р. Дудецкая // *Инженер-механик*. 2016. № 1 (70). С. 9–21.
9. Покровский, А. И. Перспективы использования аустенито-бейнитного чугуна (ADI) в Беларуси // *Инженер-механик*. 2016. № 4 (73). С. 16–29.
10. Pokrovskii, Artur. Development and Application of Austempered Ductile Iron (ADI) in Belarus. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing GmbH, 2018. 63 p.
11. Покровский, А. И. Влияние формы графитовых включений на акустические характеристики изделий из литого и деформированного чугуна / А. И. Покровский, А. С. Чаус, Э. Б. Куновский // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. № 7 (673). С. 3–10.
12. Khina, V. B. Effect of ultrasound on combustion synthesis of composite material “TiC–metal binder” / V. B. Khina, M. M. Kulak // *Journal of Alloys and Compounds*. 2013. Vol. 578. P. 595–601.

REFERENCES

1. STB ISO 683-1-2020. *Stali termoobrabatyvaemye, legirovannyye i avtomatnyye. Chast 1. Nelegirovannyye stali dlja zakalki i otpuska* [Belarus standard 683-1-2020. Heat-treatable steels, alloy steels and free-cutting steels. Part 1. Non-alloy steels for quenching and tempering]. Minsk, Gosstandart Publ., 2020, 52 p.
2. STB ISO 683-2-2020. *Stali termoobrabatyvaemye, legirovannyye i avtomatnyye. Chast 1. Nelegirovannyye stali dlja zakalki i otpuska* [Belarus standard 683-2-2020. Heat-treatable steels, alloy steels and free-cutting steels. Part 2. Alloy steels for quenching and tempering]. Minsk, Gosstandart Publ., 2020, 46 p.
3. STB ISO 683-3-2020. *Stali termoobrabatyvaemye, legirovannyye i avtomatnyye. Chast 1. Nelegirovannyye stali dlja zakalki i otpuska* [Belarus standard 683-3-2020. Heat-treatable steels, alloy steels and free-cutting steels. Part 3. Case-hardening steels.] Minsk, Gosstandart Publ., 2020, 40 p.
4. Dudetskaya L.R., Tkacheva V.A., Pokrovskii A.I. Osobennosti beinitnogo prevrascheniya v kovkom chugune [Specific features of bainitic transformation in gray cast iron]. *Materialy, tehnologii, instrumenty = Materials, technologies, tools*, 1998, vol. 3, no. 2, p. 41.
5. Dudetskaya L.R., Pokrovskii A.I., Gauhshtein I.S., Demin M.I., Gurchenko P.S. Beinitny chugun: opyt polucheniya i primeneniya [Bainitic cast iron: experience in production and application]. *Avtomobil'naya promyshlennost' = Automotive industry*, 2001, no. 11, pp. 33–35.
6. Dudetskaya L.R., Pokrovskii A.I., Gauhshtein I.S., Demin M.I., Gurchenko P.S. Termoobrabotka na beinitnyuyu strukturu detaley iz chuguna [Heat treatment of cast iron parts for bainitic structure]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2002, no. 1, pp. 45–49.
7. Pokrovskii A.I., Dudetskaya L.R. Ispol'zovanie vysokoprochnogo beinitnogo chuguna dlja izgotovleniya zubchatyh koles [The use of bainitic ductile iron the producing gear wheels]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2015, no. 2 (79), pp. 126–134.
8. Pokrovskii A.I., Laskovnev A.P., Dudetskaya L.R. Beinitnyi chugun ili stal'noy prokat: granitsy vozmozhnostey pri izgotovlenii otvetstvennyh izdeliy [Bainitic cast iron vs. rolled steel: limits of possibilities in the manufacture of critical products]. *Inzhener-mehaniik = Mechanical engineer*, 2016, no. 1 (70), pp. 9–21.
9. Pokrovskii A.I. Perspektivy ispol'zovaniya austenito-beinitnogo chuguna (ADI) v Belarusi [Application prospects of austenitic-bainitic cast iron (ADI) in Belarus]. *Inzhener-mehaniik = Mechanical engineer*, 2016, no. 4 (73), pp. 16–29.
10. Pokrovskii A. *Development and Application of Austempered Ductile Iron (ADI) in Belarus*. Saarbrücken, Lambert Academic Publishing GmbH, 2018, 63 p.
11. Pokrovskii A.I., Chaus A.S., Kunovskii E.B. Effect of the shape of graphite inclusions on acoustic characteristics of articles from cast and deformed iron. *Metal Science and Heat Treatment*, 2011, vol.53, no. 7–8, pp. 311–317.
12. Khina V.B., Kulak M.M. Effect of ultrasound on combustion synthesis of composite material “TiC–metal binder”. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 578, pp. 595–601.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-73-77>
УДК 669

Поступила 18.11.2020
Received 18.11.2020

ВЛИЯНИЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ НИОБИЕМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРМОУПРОЧНЕННОЙ АРМАТУРЫ

А. И. ПОСТИ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская область, Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: arsposti93@gmail.com

Одним из наиболее эффективных микролегирующих элементов при производстве арматуры класса 500 является ванадий. Однако технология производства – многостадийная и затратная, поэтому применение феррованадия делает производство ванадийсодержащей арматуры массового назначения нерентабельной. В связи с этим необходимо снижение себестоимости готовой продукции за счет замены феррованадия на феррониобий с сохранением всех механических, физических и эксплуатационных характеристик металла.

Цель работы – определить влияние количественного содержания ниобия в стали при производстве горячекатаной арматуры S-500WC в бухтах на стане 370/150 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» в соответствии с требованиями израильского стандарта SI 4466-3:2013 при различных температурно-скоростных параметрах проката. Нормируемыми показателями механических свойств арматурной стали S-500WC всех профилей (№ 8–16) в соответствии с требованиями стандарта SI 4466-3:2013 являются предел текучести – 500–650 МПа, пластичность – 1,15–1,35, относительное удлинение – не менее 11% и полное относительное удлинение при разрыве – не менее 7,5%.

Ключевые слова. Ниобий, механические свойства, термоупрочнение, арматура, класс прочности, микролегирование, температура самоотпуска.

Для цитирования. Пости, А.И. Влияние микролегирования стали ниобием на механические свойства термоупрочненной арматуры / А.И. Пости // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 73–77. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-73-77>.

EFFECT OF MICRO ALLOYING OF STEEL WITH NIOBIUM ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF HEAT-STRENGTHENED REBAR

A. I. POSTI, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMK”, Zhlobin city, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: arsposti93@gmail.com

One of the most effective micro-alloying elements in the production of class 500 fittings is vanadium. However, the production technology is multi-stage and expensive, so the use of ferrovanadium makes the production of vanadium-containing fittings for mass use unprofitable. In this regard, it is necessary to reduce the cost of finished products by replacing ferrovanadium with ferroniobium while preserving all the mechanical, physical and operational characteristics of the metal.

Objective: to determine the effect of the quantitative content of niobium in steel in the production of hot-rolled rebar S-500WC in coils at the mill 370/150 of OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMK” in accordance with the requirements of the Israeli standard SI 4466-3:2013 at various temperature and speed parameters of rolled products. The normalized mechanical properties of S-500WC reinforcing steel of all profiles (No. 8–16) in accordance with THE requirements of SI 4466-3:2013 are: yield strength – 500–650 MPa, ductility – 1.15–1.35, elongation of – at least 11% and total elongation at break of – at least 7.5%.

Keywords. Niobium, mechanical properties, thermal strengthening, reinforcement, strength class, micro-alloying, self-release temperature.

For citation. Posti A.I. Effect of micro alloying of steel with niobium on the mechanical properties of heat-strengthened rebar. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 1, pp. 73–77. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-73-77>.

Влияние микролегирования стали ниобием

Как правило, микролегирование ниобием ассоциируется с термомеханической (ТМ) прокаткой, при которой до или во время конечной прокатки происходит подавление рекристаллизации аустенита до такой степени, чтобы фактически рекристаллизация аустенита не произошла, т.е. прокатка при температуре, при которой не происходит рекристаллизация стали. При дальнейшей горячей прокатке аустенитные зерна будут эффективно «расплющиваться», т.е. удлиниться. Эту критическую температуру можно приблизительно определить, используя уравнение [1]:

$$(^{\circ}\text{C}) T = 887 + 464 C + (644 \text{ Nb} - 644 \sqrt{\text{Nb}}) + (732 \text{ V} - 230 \sqrt{\text{V}}) + 890 \text{ Ti} + 363 \text{ Al} - 357 \text{ Si}. \quad (1)$$

Известно, что замедление рекристаллизации аустенита связано с явлением примесного торможения атомами ниобия, главным образом за счет вызванного деформацией выделения «свежих» или «новых» фаз Nb (C, N). В результате при последующих восстановлениях аустенитные зерна становятся удлиненными и, таким образом, образуют большую эффективную площадь поверхности границ зерен. Вместе с образованием полос деформации внутри зерен способность к образованию ферритных зерен существенно увеличивается. Именно этот процесс образования расплющенного или удлиненного аустенита, который называют «улучшением» структуры и основной характеристикой классической термомеханической прокатки (ТМ), приводит к развитию более мелкого ферритного зерна и, следовательно, к более высокой прочности и улучшенной ударной вязкости (уравнение Холла-Петча).

В соответствии с общепринятой практикой для этого должно быть достаточное количество растворенного ниобия в начале процесса, так как, в конечном итоге, оно будет определяющим в эффективности ТМ прокатки за счет примесного торможения и выделения, вызванного деформацией. Следовательно, в целях максимально возможного увеличения эффективности ниобия требуется достаточно высокая температура предварительного нагрева заготовки для повторного введения ниобия в раствор в высокотемпературную аустенитную микроструктуру. Эта критическая температура в первую очередь зависит от содержания углерода, азота и ниобия в самой стали. Условия равновесия для растворения микролегирующего элемента можно рассчитать с помощью «произведения растворимости», эффективно обеспечивающего управление этой критической температурой, при которой достигается полная растворимость [2]:

$$\log [\text{Nb}] [\text{C} + 12/14 \text{ N}] = 2,26 - 6770 / T, \quad (2)$$

где T – температура, К; содержание Nb, C и N, %.

Из уравнения (2) следует, что путем снижения содержания углерода и азота можно использовать больше ниобия для процесса ТМ прокатки, а также для вторичного дисперсионного упрочнения. Кроме того, для заданного содержания углерода и азота применение более высокой температуры позволит использовать больше ниобия (в качестве растворенного вещества). Однако для коммерческой горячей прокатки арматуры существуют некоторые основные факторы, которые при первоначальном рассмотрении позволяют предположить, что роль ниобия в арматуре может быть ограничена температурами нагрева – 1150 °С; более высоким содержанием углерода – 0,20%; высокими обычными температурами чистовой прокатки – 975°С.

Влияние основных микролегирующих элементов на размер зерна аустенита во время повторного нагрева хорошо известно (рис. 1) [3]. Из рисунка видно, что для обычной стали СМн при увеличении температуры повторного нагрева размер зерна аустенита также увеличивается (нелинейно). Аналогичная

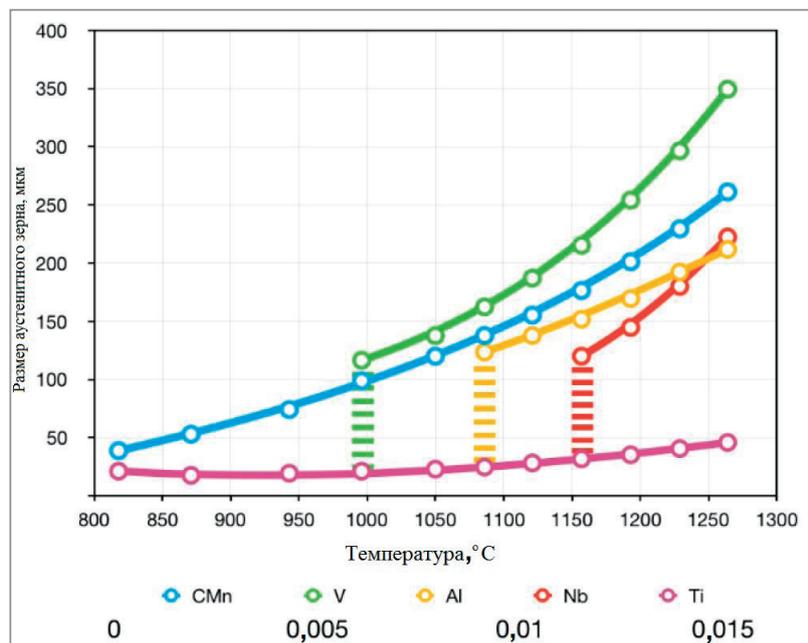


Рис. 1. Увеличение зерна аустенита в сталях СМн с различными микролегирующими добавками

тенденция наблюдается и для сталей, содержащих ванадий, алюминий и ниобий, но температура, при которой размер зерна начинает увеличиваться (заштрихованная область), должна достигать более 1180 °С. До достижения этой температуры увеличения размера зерна рост зерен аустенита подавляется благодаря эффекту связывания, обусловленному наличием микролегированных выделений фаз, которые присутствуют в первоначально охлажденной непрерывнолитой заготовке и/или образуются во время самой стадии повторного нагрева (для сравнения для сталей, содержащих только алюминий, фазой является нитрид алюминия AlN).

Как и следовало ожидать, из-за более низкого произведения растворимости ванадия он первым выделяется в раствор при температуре около 1000 °С (т.е. эффективно растворяется в матрице в виде атома), и при этом граница зерен аустенита больше не связывается и, следовательно, увеличивается. Выше этой температуры для стали, микролегированной ванадием, зерна аустенита стремительно растут, даже больше, чем в обычной стали СМп (рис. 1). Размер зерна стали, микролегированной ниобием, остается небольшим и стабильным до 1155°С, что свидетельствует о гораздо более высокой силе связывания, препятствующей укрупнению зерна по сравнению со сталью, микролегированной ванадием. Описанную характеристику ниобия также можно использовать при производстве арматуры.

Промышленные испытания и результаты

Технологию производства арматуры S-500WC в бухтах четырехстороннего периодического профиля осваивали на трех плавках с различным содержанием ниобия (табл. 1).

Таблица 1. Содержание ниобия и углеродного эквивалента в разливочной пробе

Номер плавки	Содержание ниобия, %	Углеродный эквивалент
1	0,0594	0,515
2	0,0282	0,448
3	0,0241	0,422

Температура поверхности непрерывнолитых заготовок сечением 140×140 мм после нагрева в проходной нагревательной печи стана 370/150 и последующем гидросбиве перед первой прокатной клетью составляла 1080±20 °С.

На рис. 2 показана зависимость механических свойств арматуры S-500WC плавки № 1, микролегированной ниобием, от температуры самоотпуска в зоне виткообразователя. Из рисунка видно, что при каждой последующей прокатке увеличивалась температура в зоне виткообразователя (температура самоотпуска). Можно отметить, что до температуры 730 °С на виткообразователе стабильно имеем предел текучести выше 500 МПа. При увеличении этой температуры значение предела текучести снижается и увеличивается пластичность металла.

Во всех случаях прокатки эстафетных заготовок плавки № 1 значения пластичности металла превышают требуемые (1,15–1,35) ввиду высокой прочности. Данная ситуация объясняется химическим составом стали, в частности углеродным эквивалентом, равным 0,515, и массовой долей ниобия 0,0594%.

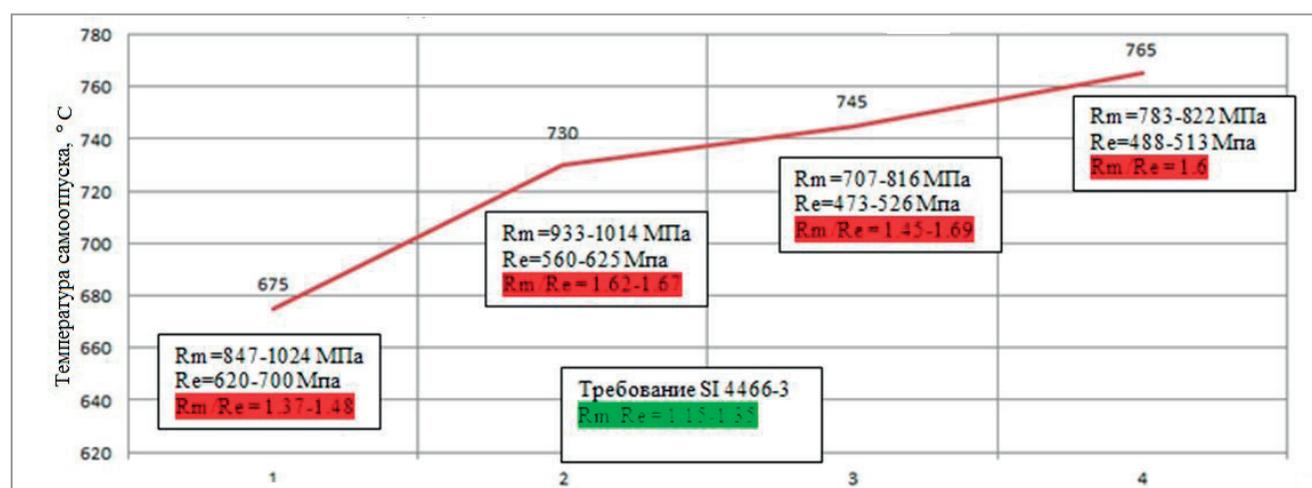


Рис. 2. Зависимость механических свойств арматуры S-500WC от температуры самоотпуска (в зоне виткообразователя): 1, 2 – профиль № 8; 3 – № 10; 4 – № 14

Во всех случаях производства профилей № 8–14 при механических испытаниях образцов зафиксированы несоответствия Agt при норме не менее 7,5%. Большинство значений ниже либо находятся на минимально допустимом уровне.

Так как не были получены требуемые механические свойства в соответствии с требованиями израильского стандарта SI 4466–3:2013 на плавке № 1, было принято решение провести эстафетную прокатку плавки № 2 (температурно-скоростные параметры производства приведены на рис. 3) со скорректированным химическим составом по количественному содержанию ниобия и углеродному эквиваленту (табл. 1).

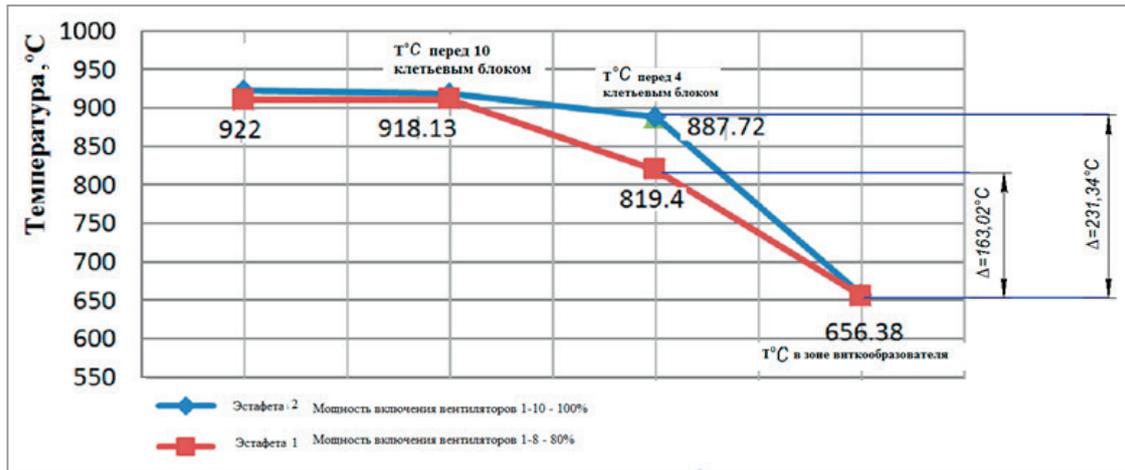


Рис. 3. Температурный режим производства арматурного проката № 8 марки стали S-500WC плавки № 2

По результатам эстафетной плавки № 1 были получены значения механических свойств, несоответствующие требованиям израильского стандарта SI 4466–3:2013, а именно: отношение прочности к текучести (при норме 1,15–1,35, факт – 1,36–1,43), остальные значения соответствовали стандарту. Данное несоответствие объясняется высокими значениями предела прочности – 711–736 МПа.

С целью увеличения предела текучести для соответствия стандарту по механическим свойствам (показатель пластичности) была проведена вторая эстафетная плавка, в которой был увеличен градиент между температурой перед ТМВ и температурой самоотпуска в зоне виткообразователя. Режимы двухстадийного охлаждения арматуры S-500WC эстафетной плавки № 2 приведены на рис. 3. Как видно из рисунка, температурный градиент увеличился на 68,32 °C. Положительных результатов также достигнуто не было.

Проанализировав полученные результаты механических испытаний после проката эстафетных плавки № 1, 2, которые не соответствуют требованиям израильского стандарта, было принято решение скорректировать химический состав стали в сторону уменьшения легирующих элементов, которые влияют на механические свойства стали (см. табл. 1, плавка № 3). Температурно-скоростные параметры производства плавки № 3 приведены в табл. 2.

Таблица 2. Режимы двухстадийного охлаждения арматуры № 12,14,16 марки стали S-500WC

Время нагрева, ч	Скорость прокатки, м/с	Температура после гидросбива, °C	Температура QTВ1, °C	Температура перед FFB, °C	Температура перед ТМВ, °C	Температура в зоне виткообразователя, °C	Мощность включения вентиляторов 1–14, %
2,5–3,5	26,2	1110–1115	970	880	790–810	630–645	100
	19,7		980	870			
	17,4		980	930			

Все результаты механических испытаний после процесса производства плавки № 3 (см. табл. 1) по температурно-скоростным параметрам табл. 2 соответствуют требованиям израильского стандарта SI 4466-3:2013.

Необходимо отметить, что для достижения требуемых температур в зоне виткообразователя при производстве арматуры S-500WC, микролегированной ниобием, температура деформации металла в ТМВ находится в зоне минимально допустимой, т.е. нагрузка и износ прокатного инструмента двухмодульного блока ТМВ гораздо значительнее в сравнении с производством арматуры S-500WC, микролегированной ванадием при данных температурно-скоростных параметрах (табл. 3).

Таблица 3. Сравнительный анализ двух технологических режимов производства арматуры S-500WC, микролегированной Nb и V

Номер профиля	Элемент микролегирования	Линейная скорость конца прокатки, м/с	Средняя производительность на профиле, т/ч	Температура самоотпуска, °С	Расход воды, м ³ /ч
8	Ванадий	59,2	80	680–700	160
	Ниобий	51,9	≈70	620–640	180
10	Ванадий	52	98	680–700	200
	Ниобий	45	≈85	620–640	210
12	Ванадий	37,4	100	680–700	180
	Ниобий	26,2	≈70	620–640	220
14	Ванадий	29	105	680–690	225
	Ниобий	19	≈70	620–640	230
16	Ванадий	22,3	104	670–690	235
	Ниобий	17,4	≈81	620–640	250

Выводы

Разработан химический состав стали, позволяющий получить механические свойства арматуры S-500WC в соответствии с требованиями израильского стандарта SI 4466-3:2013.

На основе данного химического состава разработаны температурно-скоростные параметры производства арматуры S-500WC № 8,12,14,16, микролегированной ниобием.

Выявлены основные факторы, влияющие на механические свойства арматуры S-500WC, микролегированной ниобием, такие, как температура конечной деформации, способ водяного распределения и охлаждения в водяных камерах, температура самоотпуска. Установлены существенные различия в технологическом процессе производства арматуры, микролегированной ниобием и ванадием.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Yue S., Jonas J.J.** The three critical temperatures of steel rolling and their experimental determination // *Materials Forum*, 1990. Vol. 14. P. 245–252.
2. **Irvine K.J., Pickering F.B., Gladman T. J.** *Iron Steel Inst.* 1967. Vol. 205. P. 161–182.
3. **Speich G.R. et al.** *Phase Transformations in Ferrous Alloys* // TMSAIME, Warrendale, PA, USA, 1984. P. 341–390.

REFERENCES

1. **Yue S., Jonas J.J.** The three critical temperatures of steel rolling and their experimental determination. *Materials Forum*, 1990, vol. 14, pp. 245–252.
2. **Irvine K.J., Pickering F.B., Gladman T. J.** *Iron Steel Inst.* 1967, vol. 205, pp. 161–182.
3. **Speich G.R. et al.** *Phase Transformations in Ferrous Alloys*. TMSAIME, Warrendale, PA, USA, 1984, pp. 341–390.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-78-85>
УДК 669

Поступила 18.11.2020
Received 18.11.2020

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИН НЕСООТВЕТСТВИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ДЕТАЛЯХ ИЗ БОРСОДЕРЖАЮЩЕЙ СТАЛИ

Т. И. СИДОРЕНКО, В. И. ВОЗНАЯ, А. В. РАДИОНОВ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: izm.czl@bzm.gomel.by

Большое распространение в качестве деталей машин, конструкций и механизмов получили крепежные изделия. В качестве материала в производстве используют среднеуглеродистые легированные стали и легированные борсодержащие стали. Борсодержащие стали имеют хорошее сочетание прочностных и пластических свойств, а также высокий уровень прокаливаемости. В данной статье описаны исследовательские работы, проведенные в лаборатории, и рассмотрены причины получения низких значений физико-механических параметров деталей, изготовленных на предприятиях-конкурентах. Определены качественные характеристики металла. Представлены результаты химических, физико-механических и металлографических испытаний, а также результаты химического состава неметаллических включений. Рассмотрены причины несоответствия механических свойств в борсодержащих сталях. Определена зависимость введения в сталь таких химических элементов, как азот, титан, алюминий. Описаны возможность оценки содержания «эффективного бора» на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», а также математическая модель, используемая на АО «Оскольский электрометаллургический комбинат», позволяющая провести теоретический расчет величины «эффективного» бора. Даны рекомендации по усовершенствованию технологического процесса выплавки борсодержащих сталей.

Ключевые слова. Алюминий, бор, металл, неметаллические включения, прочность, сталь, структура, твердость, титан, эффективный бор.

Для цитирования. Сидоренко, Т. И. Выявление причин несоответствия механических свойств в деталях из борсодержащей стали / Т. И. Сидоренко, В. И. Возная, А. В. Радионов // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 78–85. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-78-85>.

IDENTIFICATION OF REASONS FOR NON-COMPLIANCE OF MECHANICAL PROPERTIES IN BORON-CONTAINING STEEL PARTS

T. I. SIDORENKO, V. I. VOZNAYA, A. V. RADIONOV, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, Zhlobin City, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: izm.czl@bzm.gomel.by

Fasteners are widely used as machine parts, structures and mechanisms. Medium-carbon alloy steels and boron-containing alloy steels are used as materials in production. Boron-containing steels have a good combination of strength and plastic properties, as well as a high level of hardenability. This article describes the research work carried out in the laboratory, and considers the reasons for obtaining low values of physical and mechanical parameters of parts manufactured at competitive enterprises. The qualitative characteristics of the metal are determined. The results of chemical, physical-mechanical and metallographic tests, as well as the results of the chemical composition of non-metallic inclusions are presented. The reasons for the discrepancy of mechanical properties in boron-containing steels are considered. The dependence of the introduction of chemical elements into steel: nitrogen, titanium, aluminum is determined. The possibility of evaluating the content of “effective boron” at OJSC “BSW” – the Management Company of the Holding “BMC” is described. The mathematical model used at OJSC “Oskol electrometallurgical combine”, which allows to carry out a theoretical calculation of the value of “effective” boron, is described. Recommendations for improving the technological process of smelting boron-containing steels are given.

Keywords. Aluminum, boron, metal, non-metallic inclusions, strength, steel, structure, hardness, titanium, effective boron.

For citation. Sidorenko T. I., Voznaya V. I., Radionov A. V. Identification of reasons for non-compliance of mechanical properties in boron-containing steel parts. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 78–85. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-78-85>.

Метизные изделия получили большое распространение в качестве деталей машин, конструкций и механизмов. Современное производство метизных изделий осуществляется двумя способами: горячей либо холодной штамповкой и последующим точением. Свойства метизов и их эксплуатационные показатели формируются на всех стадиях металлургического передела [1].

В качестве основных материалов для производства метизных изделий используют среднеуглеродистые легированные стали (марки 40, 40X, 38ХГНМ) и легированные борсодержащие стали (12Г1Р, 20Г2Р, 30Г1Р, 20MnB4, 30MnB4, 32CrB4), занимающие значимое место в марочнике ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».

Борсодержащие стали имеют определенные преимущества в использовании. Несмотря на меньшее содержание углерода и легирующих элементов в своем химическом составе, что обуславливает снижение их себестоимости, они имеют хорошее сочетание прочностных свойств с более высокой технологической пластичностью, а также высокий уровень прокаливаемости.

Объектом исследования явились изделия в виде стержней с наружной резьбой (шпилек), изготовленных из катанки борсодержащих сталей марок 30MnB4 и 20Г2Р после испытания на прочность. В центральной заводской лаборатории БМЗ на образцах шпилек был проведен комплекс испытаний, включающий определение химического состава, числа твердости и микроструктурное исследование.

Шпильки из катанки стали марки 30MnB4

Предпосылкой исследования шпилек из катанки стали марки 30MnB4 явилось выявление производителем метизов несоответствий механических свойств готовых изделий (прочности) и твердости после закалки.

В процессе приложения растягивающей нагрузки при определении прочности шпильки на стержне образуется шейка. Для исследования взяты четыре образца шпилек после испытания на растяжение, в результате которых в двух случаях образование шейки произошло на резьбовой части стержня (образцы № 1, 2) и в двух случаях – на гладкой части стержня (образцы № 3, 4). Внешний вид шпилек после испытания на растяжение показан на рис. 1.

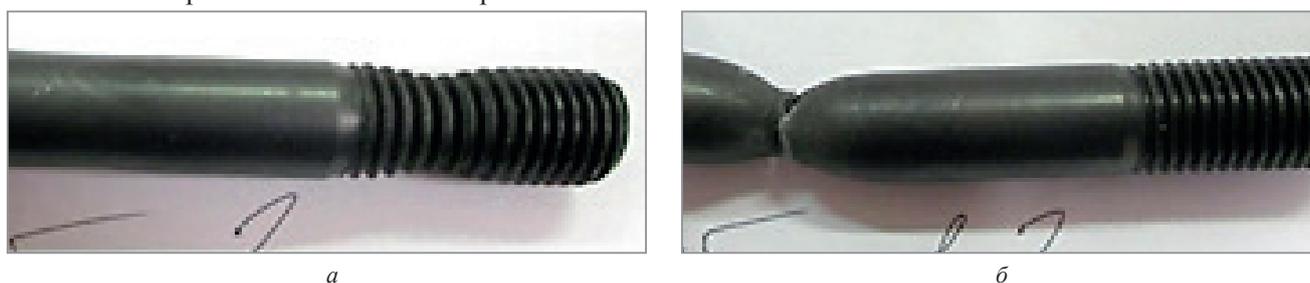


Рис. 1. Внешний вид шпилек после испытания на растяжение:

a – с сужением на резьбовой части стержня, образец № 1; *б* – с сужением на гладкой части стержня, образец № 3

При определении химического состава шпилек установлено, что массовая доля химических элементов в материале всех исследованных образцов соответствует стали марки 30MnB4. Для проверки влияния на механические свойства химической неоднородности в образце № 4 массовая доля химических элементов была определена на резьбой и гладкой частях стержня. При этом различий в химическом составе не выявлено. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты испытания химического состава материала шпилек

Номер образца	Массовая доля химических элементов, %									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Cu	Ti	B
1	0,295	0,194	0,858	0,008	0,007	0,044	0,022	0,107	0,035	0,0029
2	0,294	0,195	0,852	0,008	0,008	0,043	0,023	0,106	0,035	0,0031
3	0,291	0,194	0,859	0,008	0,007	0,043	0,022	0,108	0,035	0,0025
4 (резьбовая часть стержня)	0,294	0,193	0,852	0,008	0,008	0,046	0,023	0,104	0,035	0,0032
4 (гладкая часть стержня)	0,299	0,196	0,856	0,008	0,008	0,047	0,023	0,104	0,035	0,0032
Требования для стали марки 30MnB4	0,27–0,32	≤0,30	0,80–1,10	≤0,020	≤0,015	≤0,30	–	≤0,20	0,035–0,050	0,002–0,004

При определении числа твердости по Роквеллу и Виккерсу на шпильках получена следующая зависимость: на образцах № 3, 4 (изделия с низкой прочностью и сужением на гладкой части стержня) твердость гладкой части стержня ниже требований нормативной документации, резьбовой – соответствует требованиям; на образцах № 1, 2 (изделия с удовлетворительной прочностью и сужением на резьбовой части стержня) твердость в обоих случаях соответствует требованиям нормативной документации. Результаты испытаний приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2. Результаты по определению числа твердости по Роквеллу

Номер образца	Твердость HRC	
	гладкая часть стержня	резьбовая часть стержня
1	28,3	30,3
2	28,7	31,0
Требования	22–32	
3	27,6	33,6
4	28,3	34,2
Требования	32–39	

Таблица 3. Результаты по определению числа микротвердости по Виккерсу

Номер образца	Твердость HV ₁	
	гладкая часть стержня	резьбовая часть стержня
1	288	288
2	276	301
Требования	250–320	
3	274	326
4	292	377
Требования	320–380	

При исследовании микроструктуры образцов № 3, 4 (изделия с низкой прочностью и сужением на гладкой части стержня) отмечена ее неоднородность по длине стержня. Микроструктура резьбовой части стержня представляет собой мартенсит (99–100%) с незначительным количеством остаточного аустенита (менее 1%), микроструктура гладкой части стержня – смесь мартенсита (70%), пластинчатого перлита (20%) и игольчатого феррита (10%).

В микроструктуре образцов № 1, 2 (изделия с удовлетворительной прочностью и сужением на резьбовой части стержня) различий в содержании структурных составляющих в гладкой и резьбовой части стержней не выявлено. Микроструктура всего стержня представляет собой мартенсит (99–100%) с незначительным количеством остаточного аустенита (менее 1%).

Микроструктура шпилек после травления в 4%-ном растворе азотной кислоты в спирте показана на рис. 2, 3.

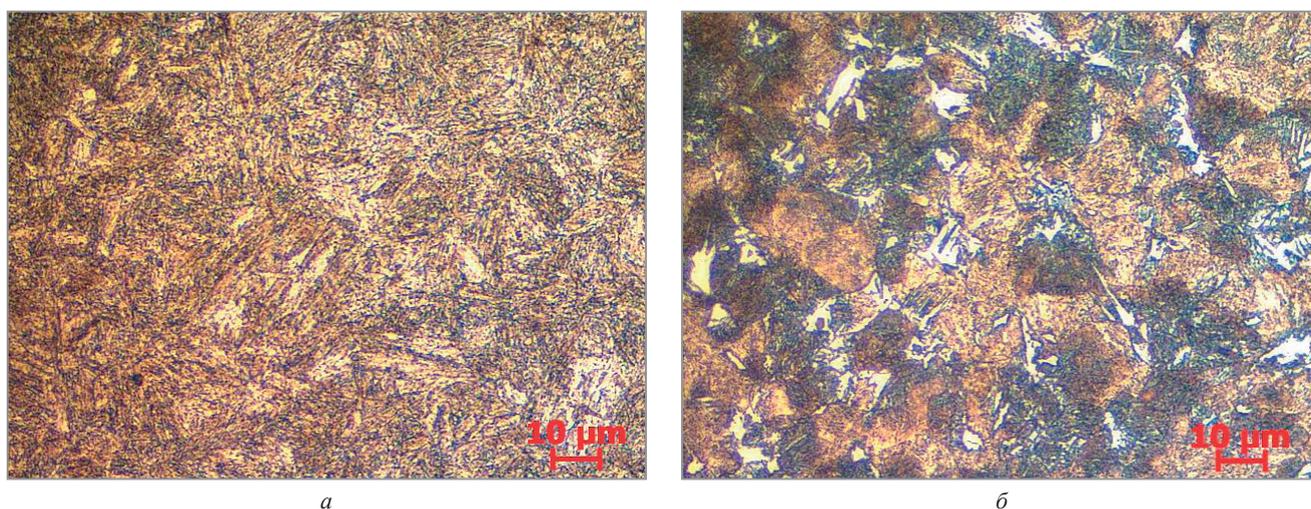


Рис. 2. Микроструктура шпильки № 3: а – резьбовая часть стержня. x100; б – гладкая часть стержня. x100

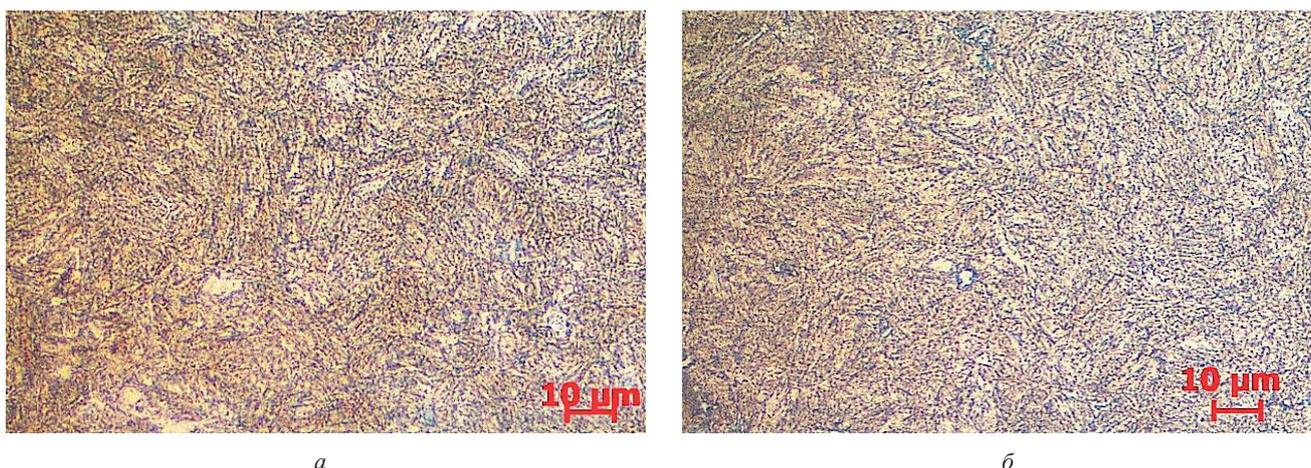


Рис. 3. Микроструктура шпильки № 1: *a* – резьбовая часть стержня. $\times 100$; *б* – гладкая часть стержня. $\times 100$

Шпильки из катанки стали марки 20Г2Р

Шпильки изготавливали из катанки стали марки 20Г2Р в соответствии с требованиями нормативной документации. При испытании производителем были выявлены несоответствия требованиям при определении твердости после закалки и механических свойств. Для испытаний были выбраны и замаркированы шпильки № 1, 2.

Химический состав

Для определения соответствия марки стали был определен химический состав шпилек (табл. 4).

Таблица 4. Результаты химического анализа шпилек

Образец	Массовая доля химических элементов, %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Al	Ti	B	N ₂
Шпилька № 1	0,208	0,212	0,967	0,0067	0,0077	0,159	0,096	0,025	0,034	0,0037	0,0081
Шпилька № 2	0,207	0,212	0,966	0,0067	0,0083	0,160	0,096	0,025	0,034	0,0037	0,0081
Требования	0,17– 0,24	0,17– 0,35	0,9–1,3	max 0,035	max 0,035	max 0,25	–	0,01– 0,05	max 0,06	0,003– 0,005	max 0,012

Как видно из таблицы, массовая доля химических элементов соответствует стали марки 20Г2Р.

Физико-механические параметры

Результаты по определению механических параметров, числа твердости после закалки приведены в табл. 5, 6.

Таблица 5. Результаты испытаний на растяжение

Образец	Прочность, Н/мм ²	Место образования сужения
Шпилька № 1	769	Гладкая часть стержня
Шпилька № 2	897	Резьбовая часть стержня
Требования	Не менее 800	–

Таблица 6. Результаты по определению числа твердости по Роквеллу

Образец	Состояние шпильки	Твердость HRC					
		гладкая часть стержня			резьбовая часть стержня		
Шпилька № 1	После испытания – шейка на гладкой части стержня	15,0	15,0	15,0	26,5	28,0	28,0
Шпилька № 2	После испытания – шейка на резьбовой части стержня	24,5	23,0	23,5	28,0	28,5	28,5
Требования		22–32					

Как видно из таблиц, прочность и твердость шпильки № 1 на гладкой части стержня не соответствуют требованиям.

Металлографические параметры

Исследование микроструктуры шпилек проводили на поперечных микрошлифах. Схема исследования показана на рис. 4. Микроструктуру всех образцов исследовали у поверхности и в центральной части после травления в 4%-ном растворе азотной кислоты в спирте (рис. 5, 6).

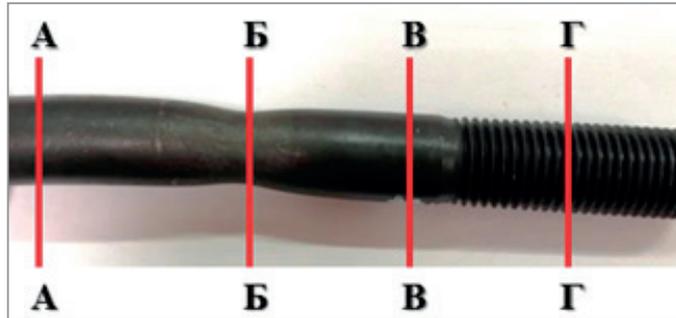


Рис. 4. Схема исследования микроструктуры шпильки

№ образца	Гладкая часть стержня	Гладкая часть стержня в зоне сужения	Гладкая часть стержня вблизи резьбы	Резьбовая часть стержня
1	2	3	4	5
1.2 Край Поперечное сечение, x200				
	M15% + Б + П + Ф	M15% + Б + П + Ф	M15% + Б + П + Ф	M-100%
1.2 Центр Поперечное сечение, x200				
	M10% + Б + П + Ф	M10% + Б + П + Ф	M10% + Б + П + Ф	M-100%

Рис. 5. Микроструктура шпильки № 1 с сужением на гладкой части стержня

№ образца	Гладкая часть стержня	Гладкая часть стержня в середине длины	Гладкая часть стержня вблизи резьбы	Резьбовая часть стержня в зоне сужения
1	2	3	4	5
1.6 Край Поперечное сечение, x200				
	M-98% + Ф	M-98% + Ф	M-98% + Ф	M-100%
1.6 Центр Поперечное сечение, x200				
	M-100%	M-100%	M-100%	M-100%

Рис. 6. Микроструктура шпильки № 2 с сужением на резьбовой части стержня

Из рис. 5 видно, что микроструктура гладкой части стержня представляет собой неоднородную смесь с различным соотношением фаз: мартенсита, бейнита, перлита и феррита. Содержание закаленной фазы (мартенсита) в микроструктуре гладкой части стержня с неудовлетворительными результатами физико-механических испытаний составляет от 10 до 15%.

Из рис. 6 видно, что в микроструктуре гладкой части стержня с удовлетворительными результатами физико-механических испытаний доля закаленной фазы (мартенсита) составляет 98%.

Микроструктура резьбовой части стержня в обоих случаях состоит из 100% мартенсита.

Для выявления причины неудовлетворительных физико-механических параметров шпильки № 1 исследован химический состав неметаллических включений (рис. 7).

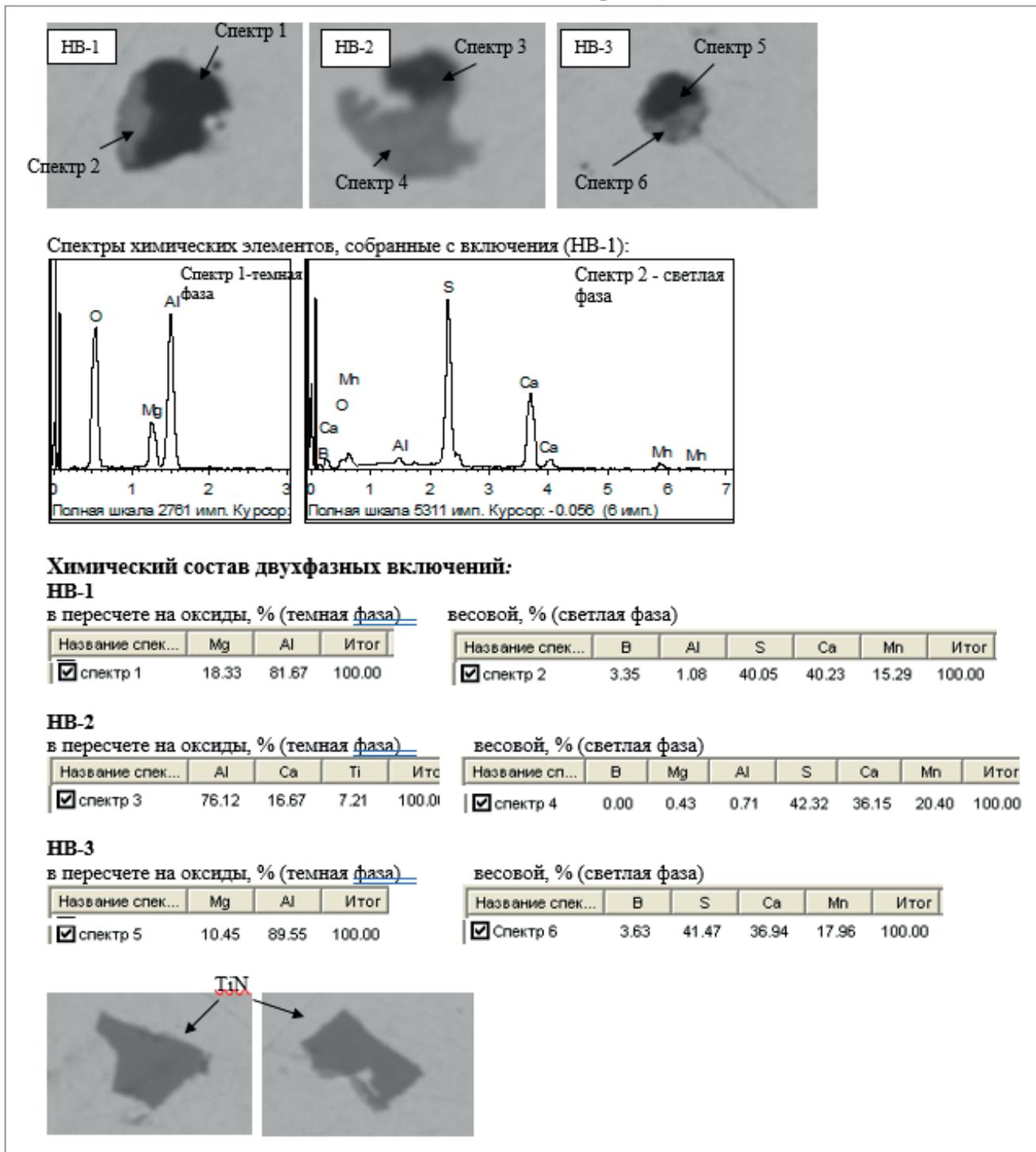


Рис. 7. Результаты исследований неметаллических включений

Результаты исследования химического состава неметаллических включений в образцах показывают, что обнаруженные включения имеют сложный химический состав и представляют собой двухфазные частицы. В составе обнаруженных включений находится бор. Отмечено, что в исследованном образце присутствуют нитриды титана. Из проведенных исследований следует, что часть введенного в сталь бора связана в соединения, входящие в состав неметаллических включений.

В свою очередь, на содержание мартенсита в микроструктуре металла оказывают значительное влияние скорость охлаждения и наличие свободного бора для данной марки стали. Так, в работах [1, 2] отмечено, что у дозвтектоидной стали 20Г2Р, кроме ряда преимуществ, существуют и технологические трудности. К ним относится необходимость предотвращения связывания бора в нитриды при выплавке стали, так как на прокаливаемость стали оказывает влияние не весь присутствующий в стали бор, а только «эффективный» (твердорастворимый, не связанный в нитриды). Нарушение этого условия приводит к нестабильности их свойств и низкому качеству проката из-за невозможности получения необходимой твердости после закаливания [2]. В работе [3] рассмотрено влияние не связанного в нитриды «эффективного» бора на прокаливаемость проката из стали марки 20Г2Р.

Считается, что основным элементом, оказывающим значительное влияние на величину «эффективного» бора, является азот. Образования нитридов бора в этом случае следует избегать, для этого в металл вводится титан, который обладает большим сродством к азоту, чем бор, и также образует нитриды в жидкой фазе. Обычно при выплавке стали с микродобавкой бора вводят титана в 4–5 раз больше (в виде ферротитана), чем содержание азота в стали, учитывая отношение атомного веса титана и азота, а также степень усвоения титана. Для связывания азота и обеспечения наличия в стали «эффективного» бора, кроме титана, вводят алюминий в количестве, обеспечивающем 100%-ную нейтрализацию азота [4–6].

В настоящее время на БМЗ есть возможность определять содержание «эффективного» бора в стали. В образцах с низкими результатами были получены данные, показывающие наличие бора в связанном состоянии. Следует отметить, что это единственное предприятие в Республике Беларусь, имеющее такую техническую возможность. В качестве технического решения выступает оптико-эмиссионный спектрометр ARL iSpark 8860 с функцией SparkDat (определение чистоты металла и контроль включений).

Возможность использовать дорогостоящее оборудование есть не у всех. Так, на АО «Оскольский электрометаллургический комбинат» разработана и опробована математическая модель, которая позволяет спрогнозировать долю «эффективного» бора исходя из содержания азота и нитридообразующих элементов в стали (титана и алюминия), определив, тем самым, количество бора, связанного в соединения [3], т. е. «эффективный» бор можно спрогнозировать на основе анализа термодинамического равновесия системы Fe – Al – Ti – B – N. На рис. 8, 9 показана зависимость содержания «эффективного» бора в стали от концентрации азота, титана, алюминия и бора.

Как следует из разработанной математической модели определения эффективного бора, для получения «эффективного» бора 0,001 % (минимальное значение для повышения механических свойств) требуется (рис. 8, 9) введение алюминия не менее 0,030 % и титана не менее 0,015 % при содержании азота 0,008 %; введение алюминия не менее 0,040 % и титана не менее 0,021 % при содержании азота 0,010 %.

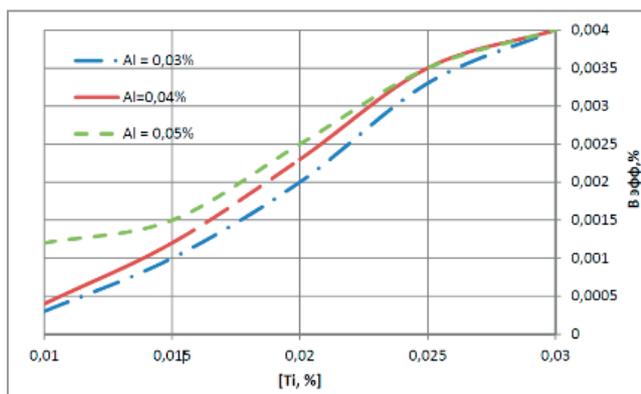


Рис. 8. Зависимость содержания «эффективного» бора в стали от концентрации азота, титана, алюминия и бора при $[N]_0 = 0,008\%$; $[B]_0 = 0,004\%$

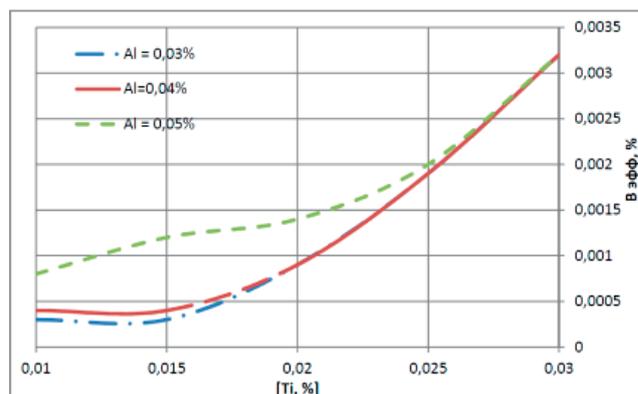


Рис. 9. Зависимость содержания «эффективного» бора в стали от концентрации азота, титана, алюминия и бора при $[N]_0 = 0,010\%$; $[B]_0 = 0,004\%$

По результатам исследования были сделаны выводы о получении несоответствий механических свойств в борсодержащих сталях:

- низкие значения механических свойств на шпильках находятся в зоне сужения на гладкой части стержня;
- результаты низких значений коррелируют со структурой, имеющей долю мартенсита менее 90 % в зоне сужения на гладкой части стержня;

- выявление бора в связанном состоянии в виде включений свидетельствует о его малоэффективности в стали.

С целью получения стабильных физико-механических параметров необходимо:

- обеспечивать содержание массовой доли следующих химических элементов в стали: алюминия – 0,035–0,045%, азота – не более 0,0080%;
- при выплавке борсодержащей стали обеспечить введение титана в 4–5 раз больше, чем содержание азота.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Филиппов А. А.** Повышение качества поверхности стального проката под калибровку перед высадкой крепежных изделий // Заготовительное производство. 2007. № 3. С. 51.
2. **Пачурин В. Г., Филиппова А. А. и др.** Формирование структурно-механических свойств проката стали 38ХА для получения высокопрочного крепежа // Тр. НГТУ им Р. Е. Алексеева. 2012. № 3.
3. **Потапов А. И.** Исследование процессов микролегирования стали бором с целью совершенствования технологии производства борсодержащей стали: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2013. 116 с.
4. **Лякишев Н. П.** Борсодержащие стали и сплавы. М.: Металлургия, 1986. 192 с.
5. **Парусов В. В. и др.** Новое применение бора в металлургии // Вест. МГТУ. 2005. № 1(9). С. 15–17.
6. **Парусов В. В. и др.** Прокат из борсодержащих сталей для высокопрочных крепежных изделий. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2010. 160 с.

REFERENCES

1. **Filippov A. A.** Povyshenie kachestva poverhnosti stal'nogo prokata pod kalibrovku pered vysadkoj krepezhnyh izdelij [Improving the surface quality of rolled steel for calibration before upsetting fasteners]. *Zagotovitel'noe proizvodstvo = Blank production*, 2007, no. 3, p. 51.
2. **Pachurin V. G., Filippova A. A. et al.** Formirovanie strukturno-mehaničeskikh svojstv prokata stali 38HA dlja poluchenija vysokoprochnogo krepeža [Formation of structural and mechanical properties of rolled steel 38XA for obtaining highstrength fasteners] *Trudy NGTU im R. E. Alekseeva=Proceedings of NGTU named after R. E. Alekseeva*, 2012, no. 3.
3. **Potapov A. I.** *Issledovanie processov mikrolegirovanija stali borom s cel'ju sovershenstvovanija tehnologii proizvodstva borsoderzhashhej stali* [Research of microalloying processes of steel with boron in order to improve the technology of production of boron steel]. *Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchjonoj stepeni kandidata tehničeskikh nauk* [Abstract of dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. Moscow, 2013, 116 p.
4. **Ljakishev N. P.** *Borsoderzhashhie stali i splavy* [Boron steels and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1986, 192 p.
5. **Parusov V. V. et al.** Novoe primenenie bora v metallurgii [Boron new applications in metallurgy]. *Vestnik MGTU=Proceedings of MGTU*, 2005, no. 1(9), pp. 15–17.
6. **Parusov V. V. et al.** *Prokat iz borsoderzhashhih stalej dlja vysokoprochnykh krepezhnyh izdelij* [Boron steel products for high-strength fasteners]. Dnepropetrovsk, ART-PRESS Publ., 2010, 160 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-86-90>
УДК 543.423.1

Поступила 27.01.2021
Received 27.01.2021

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВОЙ ДОЛИ ФОСФОРА В СТАЛЯХ МЕТОДОМ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ С ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ

В. А. МАКАРОВ, Т. К. САВОСТЕЕНКО, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская область, Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: hlmp.czl@gomel.by

Разработана методика выполнения измерения массовой доли фосфора в сталях методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП). Исследованы возможности атомно-эмиссионных спектрометров серии iCAP для определения фосфора в сталях, позволяющие существенно сократить продолжительность анализа и повысить его рентабельность по сравнению с химическими методами анализа. Предложен способ разложения стали для полного перевода фосфора в раствор. Изучена возможность программного обеспечения спектрометров «iTeva» при проведении анализа методом относительных концентраций. Калибровка спектрометра проводилась по водным растворам с известной концентрацией фосфора с помощью метода относительных концентраций. Для приготовления градуировочных растворов использовалась химически чистая соль. Подобрана аналитическая линия, свободная от спектральных наложений. Получена хорошая корреляция градуировочного графика. Правильность определения подтверждена путем анализа стандартных образцов и сопоставлением с результатами определения в соответствии с химическим методом. Разработанная методика применяется при определении массовой доли фосфора в сталях. Проведена валидация методики. Спектрометры серии iCAP могут быть использованы при определении массовой доли фосфора в сталях.

Ключевые слова. Атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой, метод относительных концентраций, сталь, фосфор.

Для цитирования. Макаров, В. А. Определение массовой доли фосфора в сталях методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой / В. А. Макаров, Т. К. Савостеенко // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 86–90. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-86-90>.

DETERMINATION OF PHOSPHORUS MASS FRACTION IN STEELS OF PLASMA ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY

V. A. MAKAROV, T. K. SAVOSTEENKO, OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», Zhlobin city, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: hlmp.czl@gomel.by

A method for measuring the mass fraction of phosphorus in steels by atomic emission spectrometry with the inductively coupled plasma (AES-ICP) has been developed. Possibilities of atomic emission spectrometers of iCAP series for determination of phosphorus in steels allowing to reduce considerably duration of the analysis and to increase its profitability in comparison with chemical methods of the analysis are investigated. A method of decomposition of steel for the complete transfer of phosphorus into solution is proposed. The possibility of software spectrometers “iTeva” in the analysis by the method of relative concentrations. Calibration of the spectrometer was carried out on aqueous solutions with a known concentration of phosphorus using the method of relative concentrations. For the preparation of calibration solutions, chemically pure salt was used. The analytical line free from spectral overlays is selected. A good correlation of the calibration graph is obtained. The correctness of the determination is confirmed by the analysis of standard samples and comparison with the results of the determination in accordance with the chemical method. The developed technique is used in determining the mass fraction of phosphorus in steels. Validation of the methodology was carried out. iCAP spectrometers can be used to determine the mass fraction of phosphorus in steels.

Keywords. Atomic emission spectrometry with the inductively coupled plasma, the method of relative concentrations, steel, phosphorus.

For citation. Makarov V. A., Savosteenko T. K. Determination of phosphorus mass fraction in steels of plasma atomic emission spectrometry. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 86–90. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-86-90>.

Отрицательное влияние фосфора на свойства стали проявляется уже при его содержании более 0,005–0,010%. Это связано в первую очередь с тем, что он имеет неограниченную растворимость в жидком железе, но плохо растворяется в твердом железе, особенно в аустените. При кристаллизации

и дальнейшем охлаждении стали избыточное количество фосфора выделяется из пересыщенного раствора в виде фосфидов, температура плавления которых ниже температуры кристаллизации металла. Фосфидные включения хорошо смачивают металл и располагаются преимущественно по границам зерен литой стали, что приводит к уменьшению пластичности металла, особенно ударной вязкости при низких температурах – хладноломкость стали [1].

В настоящее время действующими нормативными документами, регламентирующими методы анализа фосфора в стали, являются:

ГОСТ 28033-89 Сталь. Метод рентгенофлуоресцентного анализа.

ГОСТ 18895-97 Сталь. Метод фотоэлектрического спектрального анализа.

ГОСТ 22536.3-88 Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения фосфора.

Спектральные методы применяют атомно-эмиссионные спектрометры, которые используют в качестве источника возбуждения электрическую дугу или рентгеновское излучение. Эти методы позволяют получать точные результаты в течение 5 мин, однако они имеют некоторые особенности. Для калибровки спектрометров необходимо использовать не менее пяти государственных стандартных образцов (ГСО) с различным содержанием фосфора, которые должны перекрывать весь измерительный диапазон.

При использовании рентгенофлуоресцентных спектрометров ГСО после измерения не расходуются и могут использоваться в течение всего срока годности, который составляет более 10 лет. На работу с данным типом спектрометров как с источником ионизирующего излучения должно быть получено специальное разрешение, персонал должен проходить периодическое обучение по работе с источниками ионизирующего излучения и медкомиссию.

При использовании атомно-эмиссионных спектрометров с электрической дугой в качестве источника возбуждения никаких специальных разрешений не требуется, но измерение идет с частичным разрушением анализируемого образца, что приводит к постепенному износу стандартного образца, в результате чего при интенсивной работе стандартный образец расходуется в течение полугода.

Методы химического анализа используют классический метод аналитической химии (фотометрический метод). При использовании данного метода результат может быть получен не ранее чем через 1,5 ч, при этом используется большое количество реактивов, материалов и оборудования.

Из сказанного выше очевидна потребность в разработке современной универсальной методики, способной обеспечить проведение измерения массовой доли фосфора в сталях в пределах 30 мин с наименьшим количеством материальных затрат.

Наиболее перспективным в данном случае является метод АЭС-ИСП, который позволяет обеспечить отсутствие межэлементных влияний; низкие пределы обнаружения; линейность графиков в большом интервале концентраций; широкий перечень определяемых элементов; экспрессность анализа; возможность проводить градуировку спектрометра по водным растворам с известной концентрацией фосфора; минимальное количество затрачиваемых реактивов и материалов.

Разработку методики проводили на ИСП-спектрометрах iCAP 6300 Radial и iCAP 7400 Radial с программным обеспечением «iTeva». Данное программное обеспечение оснащено мощнейшим измерительным инструментом – методом относительных концентраций. В основе метода относительных концентраций лежит принцип, что в любом объеме анализируемого раствора стали соотношение элемента основы (железа) и фосфора абсолютно одинаково. В общем содержание фосфора в стали будет подчиняться уравнению [2]:

$$\frac{C_P}{C_{Fe}} = \frac{100\%}{C_{Fe}} - 1,$$

где C_P , C_{Fe} – соответственно массовая доля фосфора и железа.

Исходя из этого принципа, в процессе проведения измерения точных результатов можно добиться без взятия точной навески материала. Точность мерной посуды и доведения растворов до метки не принципиальны. Вместо мерных колб могут быть использованы градуированные стаканы или цилиндры.

Для приготовления градуировочных растворов использовали калий фосфорнокислый двузамещенный с квалификацией «хч». Для раствора железа использовали карбонильное железо с квалификацией «осч».

Линейность градуировочного графика была доказана путем построения градуировочной зависимости по пяти градуировочным растворам. Градуировочный график показал приемлемую корреляцию ($>0,999$), в конечном результате количество градуировочных образцов сократили до трех.

Массовую долю фосфора в градуировочных образцах рассчитывали по формулам, приведенным в табл. 1.

Таблица 1. Формулы для расчета массовых долей фосфора в градуировочных растворах

Номер раствора	1	2	3
Массовая доля фосфора, %	0,8 <i>m</i>	$\frac{(M + m)}{2}$	1,2 <i>M</i>

где *m*, *M* – соответственно минимум и максимум измерительного диапазона фосфора, %.

В каждый градуировочный образец вносили рассчитанное количество раствора карбонильного железа в качестве основы. В качестве нулевого градуировочного образца использовали раствор карбонильного железа.

Определение содержания фосфора в железных сплавах практически во всех случаях основано на предварительном окислении его в фосфорные кислоты независимо от форм, в которых фосфор содержится в сплаве. При растворении в кислотах, которые не являются окислителями (соляная, серная кислота), будет образовываться летучий фосфористый водород, в результате чего произойдет занижение результата. По этой причине для растворения использовали сильный окислитель – смесь азотной и соляной кислоты (царская водка) [3]. Необходимый предел количественного определения достигался при растворении в навеске 0,5 г стали в 100 см³ растворителя.

Измерения проводили при следующих параметрах спектрометра:

наблюдение плазмы Радиальное
 расход потока распыления, л/мин..... 0,55
 мощность плазмы, Вт 1150
 число параллельных измерений 2
 длины волн, нм:
 фосфор 178,284
 железо (элемент основы)..... 218,719

Проводили исследование межэлементного влияния на выбранную атомную линию фосфора путем измерения раствора ГСО с содержанием фосфора 0,01 %. При исследовании фрагмента полного спектра (рис. 1) был сделан вывод об отсутствии существенного межэлементного влияния. Предел количественного обнаружения при принятой схеме растворения составил 0,005 %.

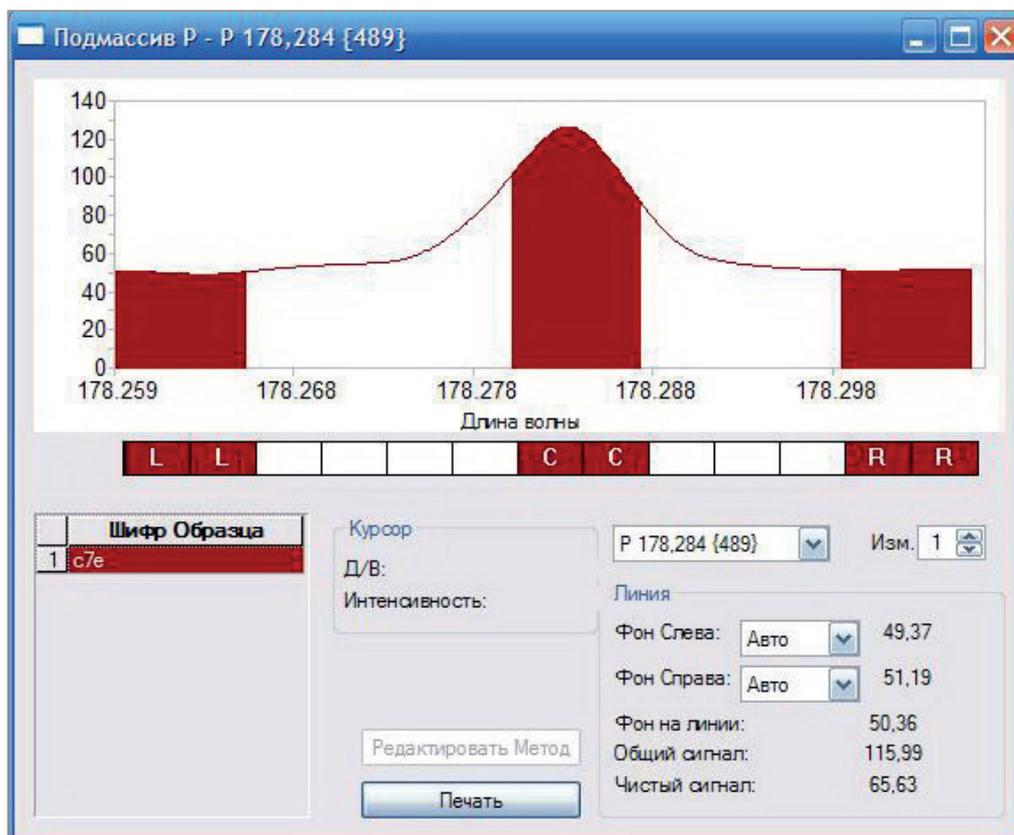


Рис. 1. Фрагмент полного спектра для линии Р 178,284

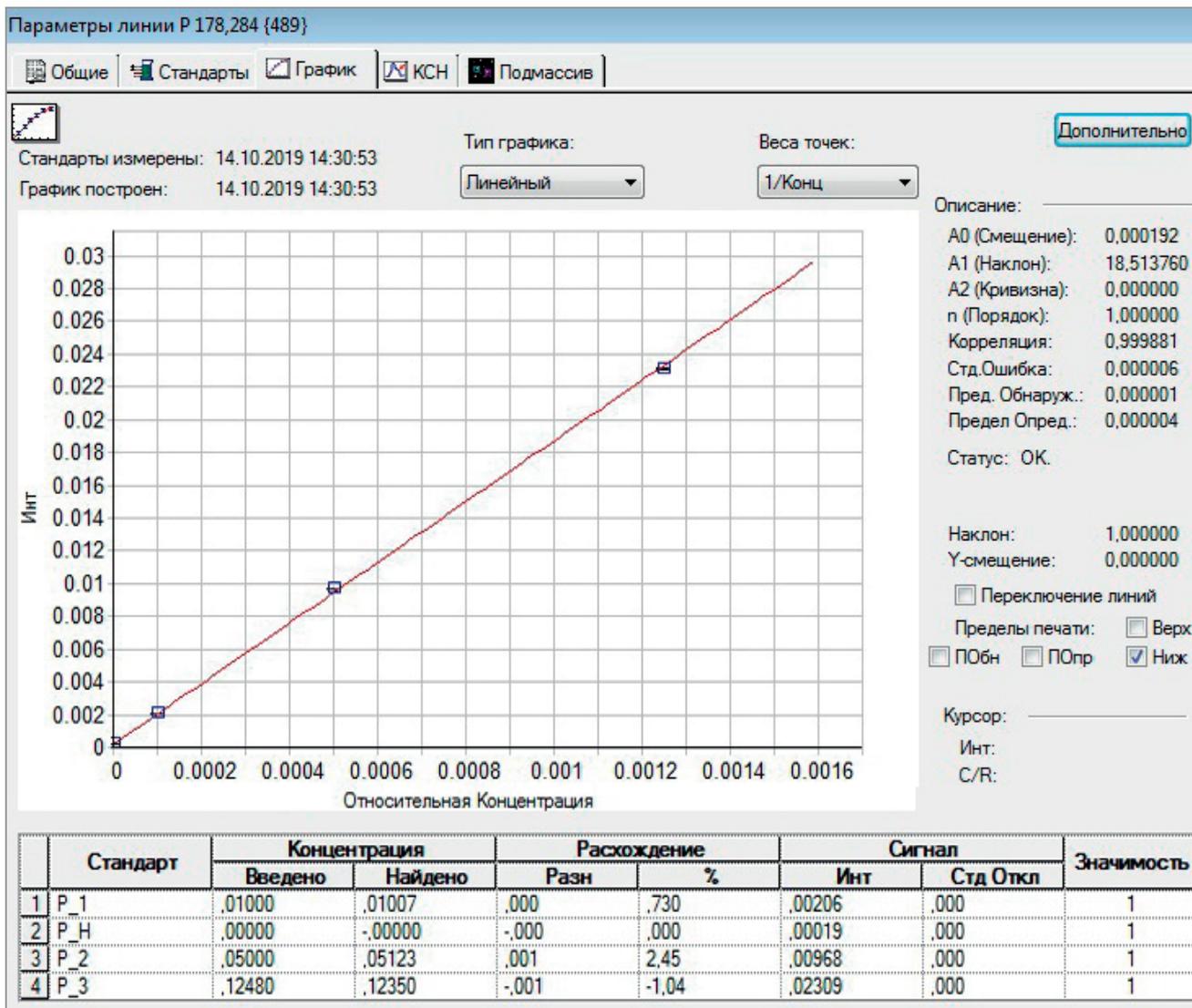


Рис. 2. Градуировочный график

Градуировочный график, приведенный на рис. 2, показал хорошую корреляцию, которая составила 0,99988, что является показателем правильности градуировки спектрометра.

Показатели точности и правильности метода были получены из эксперимента, организованного и подвергнутого анализу в соответствии СТБ ИСО 5725-1 – СТБ ИСО 5725-6*.

Проверку правильности разработанной методики проводили путем анализа ГСО. Полученные результаты сопоставляли с показателями правильности стандартизированных методик (табл. 2).

Таблица 2. Результаты анализа ГСО стали по стандартной и разработанной методике

Индекс ГСО стали	Стандартный фотометрический метод (ГОСТ 22536.3-88)	Метод АЭС-ИСП
С10-1а	0,01±0,0015	0,01±0,0013
УНЛ11г	0,022±0,004	0,022±0,002
УНЛ3в	0,108±0,009	0,108±0,005
УГ76	0,3±0,02	0,3±0,02
Ч3е	1,462±0,03	1,462±0,03

Показатели точности и расширенной неопределенности разработанной методики приведены в табл. 3.

* СТБ ИСО 5725-2-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений. РУП «Белорусский государственный институт метрологии (БелГИМ)».

Т а б л и ц а 3. Показатели точности и расширенной неопределенности

Диапазон измерений, %	Стандартное отклонение повторяемости S_r , %	Предел повторяемости r , %	Стандартное отклонение воспроизводимости S_R , %	Предел воспроизводимости R , %	Расширенная неопределенность результатов измерений $U(X)$, %, для уровня доверия 95 %
От 0,005 до 0,01 вкл.	0,00065	0,0018	0,00065	0,0018	0,0034
Св. 0,01 до 0,1 вкл.	0,0017	0,005	0,0017	0,005	0,006
Св. 0,1 до 0,5 вкл.	0,0037	0,01	0,0037	0,01	0,02
Св. 0,5 до 1,0 вкл.	0,013	0,04	0,013	0,04	0,1
Св. 1,0 до 3,0 вкл.	0,0098	0,03	0,0139	0,04	0,18

Выводы

Таким образом, разработка метода измерения фосфора в сталях методом АЭС-ИСП позволяет проводить испытания с минимальным количеством реактивов в течение короткого промежутка времени. Использование синтетических градуировочных образцов позволяет выполнять испытания без наличия большого количества стандартных образцов. Применение метода относительных концентраций позволяет проведение анализа оператором, не имеющим большой квалификации. Точность получаемых результатов сопоставима с точностью стандартизированных методик.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бигиев А. М., Бигиев В. А.** *Металлургия стали. Теория и технология плавки стали.* Магнитогорск, 2000. 201 с.
2. **Бухбиндер Г. Л., Коротков В. А., Арак М. Н., Шихарева Н. П.** Анализ катодной меди на спектрометрах серии iCAP 6000 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77. № 3. С. 11–13.
3. **Дымов А. М.** *Технический анализ. Контроль химического состава железных сплавов.* М., 1964. С. 86–87

REFERENCES

1. **Bigiev A. M., Bigiev V. A.** *Metallurgiya stali. Teoriya i tehnologiya plavki stali* [Steel metallurgy. The theory and technology of fusion steel]. Magnitogorsk, 2000, 201 p.
2. **Buhbinder G. L., Korotkov V. A., Arak M. N., Shihareva N. P.** The analysis of cathodic copper on series spectrometers iCAP 6000 [Analysis of Copper Cathodes with iCAP 6000 Series]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 2011, vol. 77, no. 3, pp. 11–13.
3. **Dymov A. M.** *Tekhnicheskij analiz. Kontrol himicheskogo sostava zheleznyh splavov* [The technical analysis. Control of a chemical compound of iron alloys]. Moscow, 1964, pp. 86–87.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-91-94>
УДК 669

Поступила 07.02.2021
Received 07.02.2021

ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ БЕСКОНТАКТНЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

*О. В. ДАЙНЕКО, Л. Ф. КАЛИНОВСКАЯ, Н. В. БЕССОНОВ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37.
E-mail: ov.dayneko@bmz.iron, тел. +375 2334 5-42-58*

ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» для измерения наружных диаметров продукции широко применяет бесконтактные системы измерения геометрических размеров. Системы измерения диаметра используются для получения достоверных, надежных и точных измерений. Методом, обеспечивающим непрерывный и бесконтактный контроль данных систем, является светотеневой способ измерения диаметра.

Для обеспечения достоверности результатов измерений системы измерения диаметра должны проходить метрологический контроль – калибровку. Калибровка проводится по разработанной методике, где указываются порядок проведения работ, требования к эталонам, обработка результатов измерений и оценки, оформление результатов калибровки. Для оценки расширенной неопределенности составляется математическая модель, учитывающая все поправки, влияющие на результат оценки, каждая из которых подвергается тщательному анализу.

Проведение калибровки систем измерения диаметра позволяет оценить их реальные отклонения в условиях эксплуатации, что дает возможность обеспечить точность и надежность измерения геометрических размеров металлопродукции на всех этапах ее производства.

Ключевые слова. Системы измерения диаметра, расширенная неопределенность, калибровка, математическая модель.

Для цитирования. Дайнеко, О. В. Особенности метрологического контроля бесконтактных систем измерения геометрических размеров металлопродукции / О. В. Дайнеко, Л. Ф. Калиновская, Н. В. Бессонов // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 91–94. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-91-94>.

PARTICULARITIES OF METROLOGICAL CONTROL OF NON-CONTACT SYSTEMS FOR MEASURING THE GEOMETRIC DIMENSIONS OF METAL PRODUCTS

*O. V. DAINENKO, L. F. KALINOVSKAYA, N. V. BESSONOV, OJSC “BSW-Management Company of the Holding “BMC”, Zhlobin City, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str.
E-mail: ov.dayneko@bmz.iron, tel. +375 2334 5-42-58*

OJSC “BSW-Management Company of the Holding “BMC”, non-contact systems for measuring the outer diameters of products are widely used for measuring geometric dimensions. Diameter measurement systems are used to obtain reliable, true and accurate measurements. The method that provides continuous and non – contact control of these systems is the light -and – dark method of measuring the diameter.

To ensure the reliability of the measurement results, the diameter measurement systems must undergo metrological control – calibration. Calibration is carried out according to the developed methodology, which specifies the order of work, requirements for standards, processing of measurement and evaluation results, and registration of calibration results. To assess the extended uncertainty, a mathematical model is created that takes into account all the corrections that affect the result of the assessment, each of which is subjected to a thorough analysis.

Calibration of diameter measurement systems allows to evaluate their real deviations in operating conditions, which allows to ensure the accuracy and reliability of measuring the geometric dimensions of metal products at all stages of its production.

Keywords. Diameter measurement systems, extended uncertainty, calibration, mathematical model

For citation. Daineko O. V., Kalinovskaya L. F., Bessonov N. V. Particularities of metrological control of non-contact systems for measuring the geometric dimensions of metal products. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 91–94. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-91-94>.

ОАО «БМЗ–управляющая компания холдинга «БМК» на протяжении многих лет является проверенным и признанным экспортером качественной продукции. Для выпуска конкурентоспособной

продукции необходимыми и обязательными к выполнению являются требования, предъявляемые потребителями.

К качеству поставляемой продукции предъявляются высокие требования, поэтому на каждой стадии производства продукции осуществляется контроль ее параметров. Одним из важных параметров является наружный диаметр такой продукции, как катанка, прутки, бесшовные трубы, металлокорд, проволока для рукавов высокого давления.

Контроль данного параметра проводится с помощью следующих средств измерений: микрометров, штангенциркулей и т.д., однако при непрерывном производственном процессе измерения их использование не всегда представляется возможным. Поэтому на БМЗ для измерения наружных диаметров продукции широко применяются бесконтактные системы измерения геометрических размеров.

Для измерения диаметра, например, катанки и прутка в диапазоне измерений от 2,0 до 90,0 мм используется система измерения диаметра Zumbach Electronic AG (Швейцария), для измерения бесшовных труб диаметром от 80 до 170 мм – система измерения типа LAP GmbH Laser Applicationen (Германия). Данные системы встроены в производственную линию, что позволяет проводить измерения автоматически во время перемещения продукции в процессе производства, в том числе без подключения дополнительных механизмов проводить настройку и калибровку системы на месте ее эксплуатации.

Методом, обеспечивающим непрерывный и бесконтактный контроль данных систем, является светотеневой способ измерения диаметра.

Рассмотрим подробнее реализацию данного метода на примере системы измерения диаметра Zumbach, которая является высокоточным бесконтактным измерителем диаметра лазером с очень высокой частотой сканирования.

Измерительная головка ODAC 100 работает по методу оптического лазерного сканирования. Генерируемый лазерным диодом луч отклоняется вращающимся зеркалом снизу вверх. Через плоское зеркало луч лазера попадает в линзу излучателя, которая поворачивает лучи лазера, ориентированные абсолютно параллельно, в поле измерения с находящимся в нем измеряемым объектом (рис. 1)*.

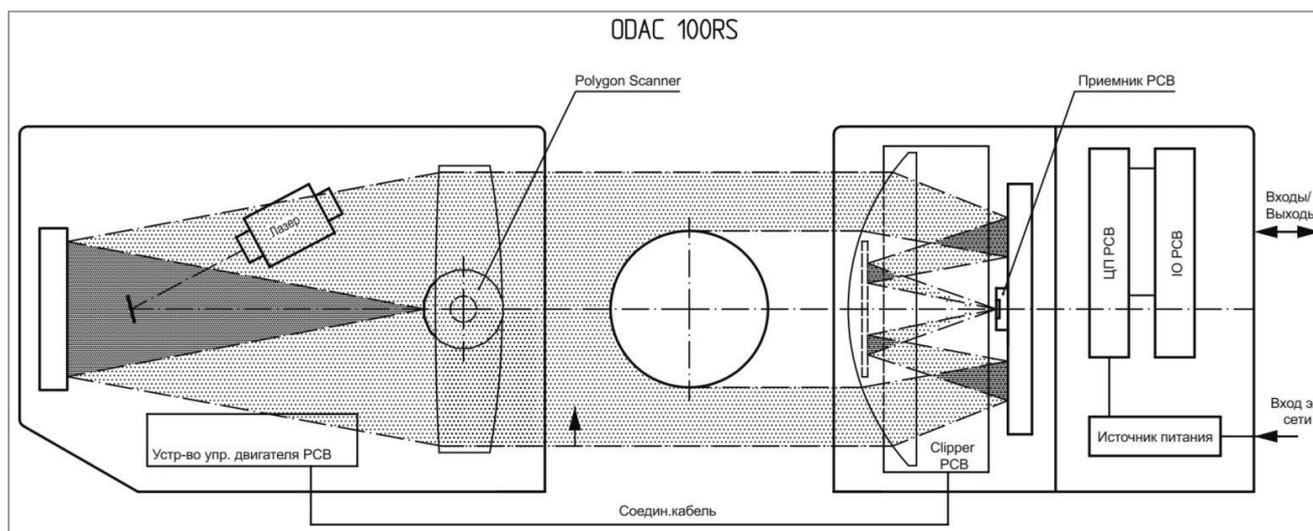


Рис. 1. Принципиальная схема работы измерительной головки ODAC 100

Линза приемника фокусирует пучок лучей, отклоняемых двумя другими плоскими зеркалами на фотодиоде платы приемника. Свет на фотодиод не попадает, если лазерный луч находится вне поля измерения либо если луч попадает на объект измерения. Возникающий светотеневой сигнал принимается фотодиодом и преобразуется в цифровой сигнал (аналоговый видеосигнал), который подается на электронный счетчик. Счетчик регистрирует продолжительность создаваемой измеряемым объектом глубокой тени. Это измеренное время преобразуется в микропроцессоре в физическую величину – размер.

Благодаря высокоточным оптическим компонентам, высокой частоте сканирования и скорости прохождения луча, а также специальному программному обеспечению измерительная система гарантирует

* Инструкция по эксплуатации ODAC.010.5068.RU.

очень высокую точность данных даже при неблагоприятных условиях измерения и нестабильном поведении объекта измерения*.

Для обеспечения достоверности результатов измерения системы необходимым является ее ежегодный метрологический контроль, который осуществляется специалистами отдела главного метролога БМЗ, аккредитованного на проведение калибровки систем измерения диаметра в диапазоне от 0 до 170 мм**.

Метрологический контроль (калибровку) системы измерения диаметра Zumbach проводят по методике калибровки МК. ГМ 1865 «Система измерения диаметра продукции прокатного производства Zumbach», разработанной в отделе главного метролога БМЗ***.

Характеристики системы измерения диаметра Zumbach представлены ниже.

Тип системы	Диапазон измерения диаметра, мм	Дискретность отсчета, мм	Допускаемая абсолютная погрешность измерения, мм
ODAC 100	2,0–90,0	0,001	±0,030

Методика калибровки устанавливает требования к методам и средствам калибровки системы, определяет организацию, порядок проведения и оформления результатов калибровки****.

Калибровку проводят непосредственно на месте эксплуатации системы. При проведении калибровки внешние условия должны соответствовать следующим требованиям: температура окружающего воздуха – 10–50 °С; относительная влажность воздуха – 58±20%.

Перед проведением калибровки подготавливают систему к работе согласно инструкции по эксплуатации, выбирают необходимые образцы диаметра (с учетом заявки заказчика). С помощью рычажных микрометров определяют действительные диаметры образцов. Для этого диаметр образца измеряется в трех сечениях по всей длине. После каждого измерения образец поворачивается примерно на 70°, т.е. проводится не менее пяти измерений в каждом сечении. За действительное значение диаметра принимают среднее значение из 15 измерений.

При проведении внешнего осмотра устанавливается соответствие комплектности системы требованиям эксплуатационной документации, отсутствие видимых механических повреждений на всех компонентах системы, препятствующих ее нормальному функционированию, отсутствие видимых повреждений электропроводки, наличие защитного заземления.

При опробовании проводят наблюдение за работой системы при измерении диаметра продукции прокатного производства, при этом проверяют работоспособность аппаратуры управления и измерения и правильность индикации в соответствии с эксплуатационной документацией.

Далее при помощи системы проводят по десять измерений диаметра каждого образца и вычисляют погрешность.

Основной задачей при калибровке системы является определение оценки отклонения показаний системы от действительного значения диаметра эталонного образца.

Для оценки погрешности и расчета расширенной неопределенности составляется математическая модель оценки отклонения показаний системы*****:

$$\Delta l_s = \bar{l}_s - l_d + \delta l_{pcs} + \delta l_m + \delta l_{pcm} + \delta l_{оп}$$

где Δl_s – отклонение показаний системы в калибруемой точке, мм;

\bar{l}_s – среднее арифметическое значение показаний системы в калибруемой точке, мм;

l_d – действительное значение диаметра образца, мм;

δl_{pcs} – поправка из-за конечной разрешающей способности отсчетного устройства системы, мм;

δl_m – поправка из-за погрешности микрометра, мм;

δl_{pcm} – поправка из-за конечной разрешающей способности микрометра, мм;

$\delta l_{оп}$ – поправка из-за погрешности оператора при снятии отсчета по шкале микрометра, мм.

* Инструкция по эксплуатации ODAC.010.5068.RU.

** Закон Республики Беларусь № 3848-ХІІ от 5 сентября 1995 «Об обеспечении единства измерений».

*** Методика калибровки МК. ГМ 1865 «Система измерения диаметра Zumbach».

**** ТКП 8.014–2012 «Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Калибровка средств измерений. Правила проведения работ».

***** ISO/IEC Руководство 98-3 Неопределенность измерений. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерений при проведении измерений (GUM: 1995).

Следующим этапом является анализ входных величин, составляющих математическую модель, влияющих на результат оценки.

Стандартную неопределенность, связанную с поправкой на разрешающую способность отсчетного устройства системы, рассчитывают по формуле:

$$u(\delta l_{pcs}) = \frac{d_s}{2\sqrt{3}},$$

где d_s – дискретность отсчета системы.

Стандартную неопределенность, связанную с поправкой из-за погрешности оператора при снятии отсчета по шкале микрометра, рассчитывают по формуле:

$$u(\delta l_M) = \frac{U_M}{k}.$$

Стандартная неопределенность (U_M), связанная с поправкой из-за погрешности эталона, указана в свидетельстве о калибровке на эталонный микрометр.

Завершающим этапом калибровки системы является вычисление расширенной неопределенности, которую получают путем умножения стандартной неопределенности на коэффициент охвата k , соответствующего уровню доверия, приблизительно равному 95%:

$$U = ku_c(\Delta l),$$

где $u_c(\Delta l)$ – суммарная стандартная неопределенность.

Расширенная неопределенность – величина, задающая интервал вокруг результата измерения, в пределах которого, как ожидается, находится большая часть распределения значений, они с достаточным основанием могут быть приписаны самой величине*.

Бесконтактные системы измерения геометрических размеров металлопродукции, применяемые на БМЗ, основаны на светотеневом способе измерения. Конструкции систем предоставляют пользователю большие возможности при размещении приборов, а измерительная часть идеально подходит для непрерывного измерения металлопродукции. Проведение калибровки систем измерения диаметра позволяет оценить их реальные отклонения в условиях эксплуатации, что позволяет обеспечить точность и надежность измерения геометрических размеров металлопродукции на всех этапах ее производства.

* ISO/IEC Руководство 98-3 Неопределенность измерений. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерений при проведении измерений (GUM: 1995).



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-95-99>
УДК 669.1

Поступила 07.02.2021
Received 07.02.2021

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА (СПЕЧЕННЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ НОЖЕЙ) ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛЬНОЙ ФИБРЫ

Ф. М. НОВИКОВ, Ю. И. КОЗЫРЕВА, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: fm.novikov@bma.iron, тел. + 375-2334-55869

Одним из способов повышения прочности и надежности строительных конструкций считается использование сталефибробетонов. Сталефибробетон обладает значительными преимуществами по сравнению с обычным бетоном. Большая степень сопротивления трещинообразованию способствует увеличению таких физико-механических показателей, как прочность при сжатии, растяжении и изгибе, водонепроницаемость, морозостойчивость, сопротивлению к проникновению воды и химических веществ. В сталефибробетоне в качестве армирующего материала используется стальная фибра, равномерно распределенная по объему бетона.

В процессе производства стальной фибры производится ее рубка твердосплавными ножами. В статье рассмотрены вопросы повышения износостойкости твердосплавных ножей, используемых для рубки стальной фибры, предложены пути повышения стойкости режущего инструмента. Проанализировано влияние качества вольфрамкобальтового твердого сплава на износостойкость ножей, разработано устройство крепления ножей.

Ключевые слова. Сталефибробетон, фибра, режущий инструмент, твердый сплав, стойкость режущего инструмента.
Для цитирования. Новиков, Ф. М. Пути повышения стойкости режущего инструмента (спеченных твердосплавных ножей) при производстве стальной фибры / Ф. М. Новиков, Ю. И. Козырева // Литие и металлургия. 2021. № 1. С. 95-99. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-95-99>.

THE WAYS TO INCREASE THE DURABILITY OF CUTTING TOOLS (SINTERED CARBIDE KNIVES) IN THE PRODUCTION OF STEEL FIBER

F. M. NOVIKOV, YU. I. KOZYREVA, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMK”, Zhlobin city, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: fm.novikov@bma.iron, tel. + 375-2334-55869

One of the ways to increase the strength and reliability of building structures is the use of steel – fibre reinforced concrete. Steel – fibre reinforced concrete has significant advantages over conventional concrete. A high degree of resistance to cracking contributes to an increase in such physical and mechanical parameters as compressive, tensile and bending strength, water resistance, frost resistance, resistance to water and chemical penetration. In steel – fibre reinforced concrete, steel – fibre is used as a reinforcing material, evenly distributed over the volume of concrete.

In the process of steel – fibre production, the fiber is cut with carbide knives. The article deals with the issues of increasing the wear resistance of carbide knives used for cutting steel – fibre, and suggests ways to increase the durability of cutting tools. The influence of the quality of tungsten-cobalt hard alloy on the wear resistance of knives is analyzed, and a knife attachment device is developed.

Keywords. Steel-fibre reinforced concrete, fibre, cutting tool, hard alloy, cutting tool durability.

For citation. Novikov F.M., Kozyreva Yu.I. The ways to increase the durability of cutting tools (sintered carbide knives) in the production of steel fiber. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 1, pp. 95-99. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-95-99>.

Введение

Основной задачей развития строительной индустрии в современном мире является повышение прочности и надежности строительных конструкций с одновременным снижением затрат на строительство. Одним из перспективных направлений считается использование сталефибробетонов – композиционного материала из бетона, в котором в качестве армирующих материалов используются короткие стальные волокна, равномерно распределенные по всему объему. Фибробетон обладает значительными преимуществами по сравнению с обычным бетоном. Большая степень сопротивления трещинообразованию

способствует увеличению таких физико-механических показателей, как прочность при сжатии, растяжении и изгибе, водонепроницаемость, морозоустойчивость, сопротивлению к проникновению воды и химических веществ. Строительные конструкции из бетона с армированием из стальной фибры особенно эффективны для использования в регионах с высокой сейсмической активностью.

С развитием производства фибры появилось множество ее видов. В частности, существуют четыре способа производства стальной фибры (рис. 1).

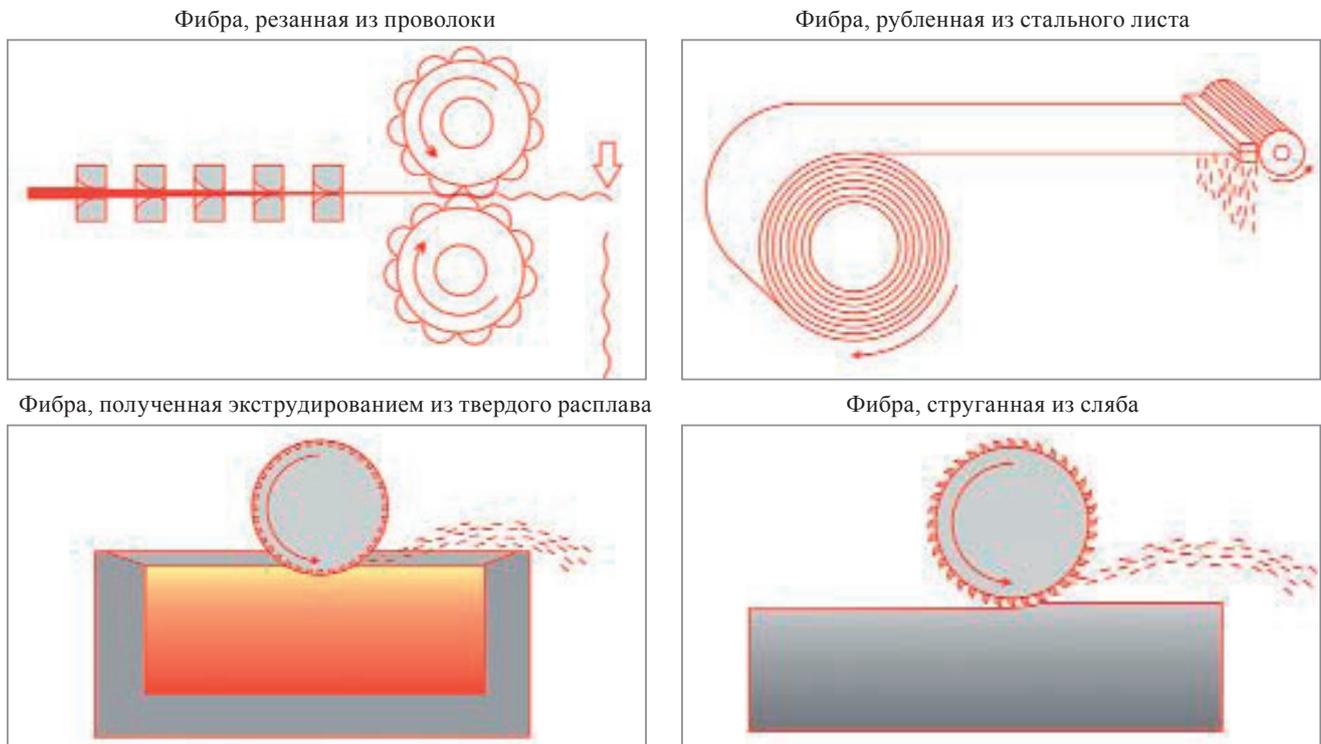


Рис. 1. Способы производства стальной фибры

Наиболее востребованной является фибра, изготовленная из стальной проволоки [1]. В условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» производится фибра анкерного, волнового и прямого профиля из проволоки диаметром 0,20–1,10 мм (рис. 2).

При производстве стальной фибры качество производимой фибры зависит от используемого режущего инструмента (твердосплавных ножей, сплавы на основе WC-Co) для рубки фибры и конструкции для рубки.

В процессе производства отмечен преждевременный выход ножей из строя из-за сколов и разрушений на рабочей части (рис. 3).



Рис. 2. Фибра стальная анкерного профиля



Рис. 3. Разрушение ножа в посадочном гнезде

В результате анализа износостойкости разрушенных ножей и ножей других производителей установлено, что качество твердосплавных ножей и износостойкость напрямую зависят от качества твердого сплава, из которого они изготовлены. Механические свойства твердого сплава, из которого изготовлен режущий инструмент, резко снижаются с увеличением пористости, в частности, снижаются прочность при поперечном изгибе, ударная вязкость, предел усталости. Аналогично влияет и увеличение содержания графит-фазы в сплаве и появление η -фазы WCo [2]. Графитовые включения являются концентраторами напряжений в сплавах и источниками зарождения трещин.

С целью повышения износостойкости ножей и предотвращения влияния качества твердого сплава, используемого для производства режущего инструмента, определили требования к твердому сплаву для производства ножей. Требования спецификации, разработанной на предприятии: объемное содержание пор по шкале А, В не более 02, отсутствие объемного содержания свободного углерода, шкала C00, отсутствие единичных пор свыше 25 мкм (оценка производится по ISO 4505), отсутствие η -фазы (оценка производится по ГОСТ 9391), отсутствие трещин.

Для увеличения стойкости ножей из твердого сплава предложено изменить конструкции крепления ножей.

Главной целью изменения конструкции крепления ножа является уменьшение влияния ударной вязкости инструмента, которая является лимитирующим свойством при производстве продукции с повышенной прочностью и преждевременным выходом из строя ножей.

На рис. 4 показаны конструкции крепления ножей.

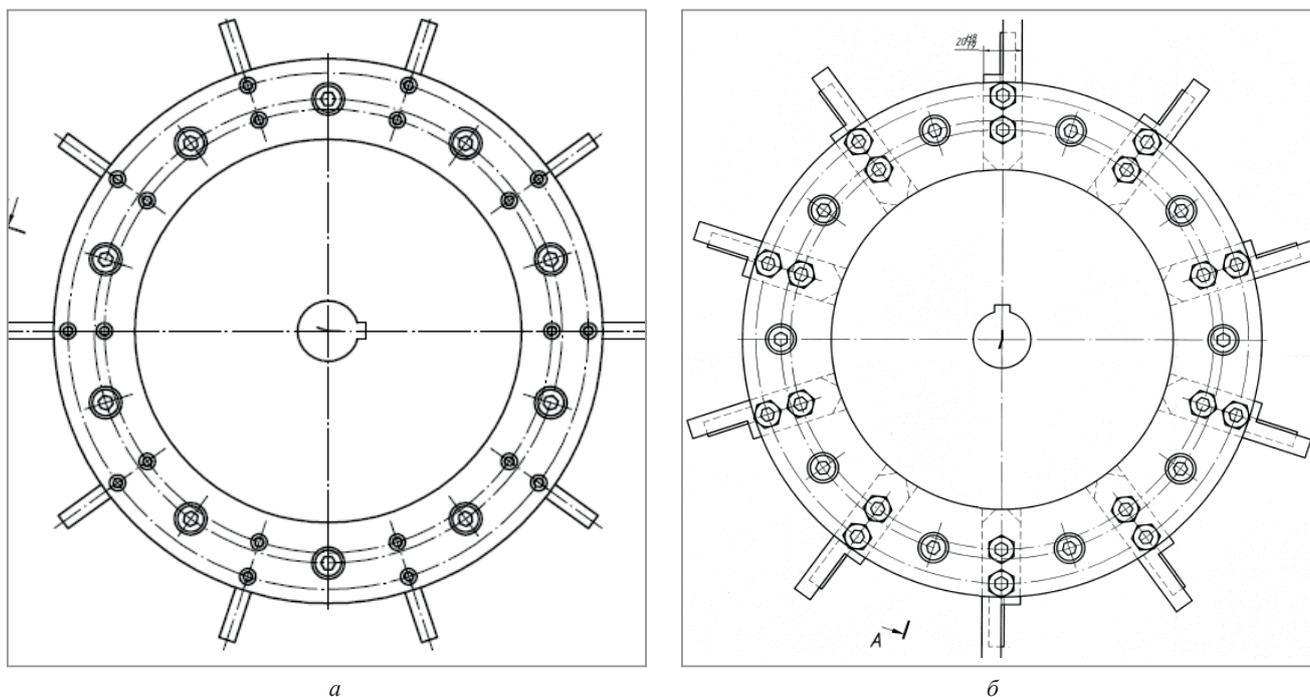


Рис. 4. Конструкции крепления ножей: а – крепление ножей по конструкции завода-изготовителя; б – крепление ножей (с адаптером) по предложенной конструкции

Для фиксации ножа по предложенной конструкции был доработан имеющийся барабан путем фрезерования посадочного отверстия под адаптер ножа (рис. 5).

Испытания проводили при производстве анкерной фибры из низко- и высокоуглеродистой проволоки диаметром 1,0 мм. Средняя стойкость режущей грани ножей составила 132 моточаса (5,8 т), что выше средней стойкости серийно используемого инструмента в 2,4 раза.

Для оценки изменения напряженного состояния произвели расчет опасного сечения в месте



Рис. 5. Адаптер ножа

крепления ножа. Схема распределения напряжений показана на рис. 6. Это консольно-закрепленная балка с действующей изгибающей нагрузкой в месте крепления ножа к барабану.

Усилия на нож не изменяются при изменении конструкции, наиболее опасное сечение сохраняется в месте крепления ножа.

Расчет максимального напряжения от изгиба: сумма моментов относительно оси x : $\sum X=0$; сумма моментов относительно оси y : $\sum Y=A-P=0$; сумма моментов: $M=PL$.

Рассмотрим опасное сечение I : момент инерции ножа: $I_{x1} = \frac{a_0^4}{12} = 341,333 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; момент инерции ножа с учетом ослабления сечения: $I_{x1} = \frac{a_1^4}{12} - \frac{a_0^4}{12} = 12992 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Максимальные напряжения оси изгиба в точке, наиболее удаленной от нейтрального сечения, приведены на рис. 6.

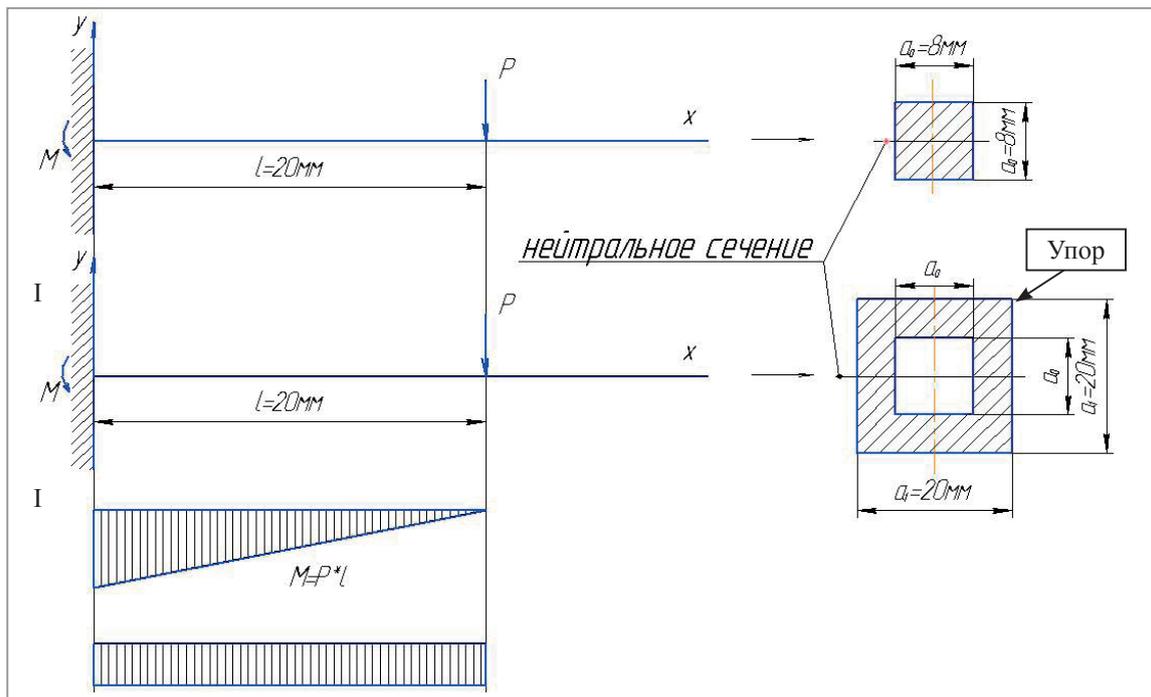


Рис. 6. Эпюры распределения нагрузки на нож

Как видно из рисунка, напряжение изгиба в месте крепления ножа до модернизации более чем в 30 раз больше, чем после модернизации.

В процессе проведения испытаний была отмечена неудовлетворительная фиксация ножа в адаптере и отсутствие возможности регулировки ножа при выставлении зазора между ножом и режущей кромкой. В связи с этим изготовлен барабан в условиях предприятия для исключения использования адаптеров под ножи, но уменьшающий напряжение в месте его крепления и в точке рубки фибры. Барабан показан на рис. 7.

В настоящее время данная конструкция проходит испытания в условиях сталепроволочного цеха при производстве анкерной фибры из двух ниток высокоуглеродистой проволоки диаметром 0,50–0,70 мм. Отметим, что средняя стойкость режущей грани ножей составила 237 моточасов (6,7 т), что выше средней стойкости серийно используемого инструмента в 2,8 раза.

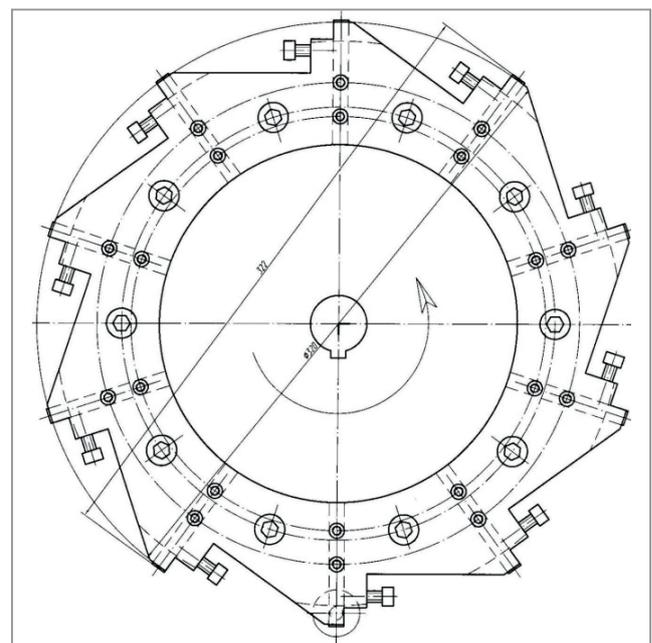


Рис. 7. Опытный барабан (с косынками)

Выводы

С целью увеличения сроков службы режущего инструмента при производстве фибры стальной разработаны и внедрены в производство конструкция крепления ножей и опытный барабан. Изменение конструкции крепления ножа приводит к уменьшению влияния ударной вязкости инструмента и препятствует преждевременному выходу из строя ножей. Барабан изготовлен для исключения использования адаптеров под ножи и уменьшения напряжений в месте их крепления и в точке рубки фибры. Разработанные конструкции позволяют использовать ножи меньшей длины, увеличить срок службы инструмента, что приведет к снижению себестоимости выпускаемой продукции.

Для предупреждения преждевременного износа режущего инструмента необходимо контролировать качество вольфрамокобальтового твердого сплава, из которого изготовлены ножи: отсутствие η-фазы, отсутствие свободного углерода, объемное содержание пор по шкале А, В не более 02, отсутствие трещин.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Миляева, Т.** Фибра: от идеи до наших дней // Метизы. 2007. № 3(16).
2. **Панов, В. С., Чувилин, А. М.** Технология и свойства спеченных сплавов и изделий из них. М.: МИСиС, 2001. 428 с.

REFERENCES

1. **Miljaeva T.** Fibra: ot idei do nashih dnei [Fiber: from the idea to the present day], *Metizy = Hardware*, 2007, no. 3(16).
2. **Panov V.S., Chuvilin A.M.** *Tehnologija i svojstva spechennyh splavov i izdelij iz nih* [Technology and properties of sintered alloys and their products]. Moscow, MISiS Publ., 2001, 428 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-100-105>
УДК 669.1

Поступила 03.02.2021
Received 03.02.2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЫРОДУТНОГО СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ СОВРЕМЕННОЙ БЕЛАРУСИ В ДОИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ПЕРИОД

Д. В. АНДРЕЕВ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: smithmaster.by@gmail.com

В статье описаны эксперименты по реконструкции технологии сыродутного процесса получения железоуглеродистых сплавов в печах на основании археологических источников. Приведено описание конструкции печей, технологии металлургического процесса и подготовки сырьевых материалов. Описан процесс рафинирования крицы методом кузнечной обработки. Сделаны научно обоснованные предположения о возможных технологических приемах получения сталей в доиндустриальный период на территории современной Беларуси.

Ключевые слова. Сыродутный процесс, болотные руды, крица, окалина, кузнечная сварка, рафинирование.

Для цитирования. Андреев, Д. В. Исследование эффективности сыродутного способа получения углеродистых сталей на территории современной Беларуси в доиндустриальный период / Д. В. Андреев // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 100-105. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-100-105>.

RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF THE ONE-STEP PROCESS FOR PRODUCING CARBON STEELS ON THE TERRITORY OF MODERN BELARUS IN THE PRE-INDUSTRIAL PERIOD

D. V. ANDREEV, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: smithmaster.by@gmail.com

The article describes experiments on the reconstruction of the technology of the one-step process of obtaining iron-carbon alloys in furnaces based on archaeological sources. It contains the description of furnace design, metallurgical process technology and raw materials preparation. The process of refining the iron bloom by forging is described. Scientifically grounded assumptions are made about possible technological methods of obtaining steels in the pre-industrial period on the territory of modern Belarus.

Keywords. Smelting experiment, bloomery, bog iron ore, iron bloom, blacksmith scale, forge welding, blacksmith scale, refining.

For citation. Andreev D. V. Research of the efficiency of the one-step process for producing carbon steels on the territory of modern Belarus in the pre-industrial period. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 100-105. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-100-105>.

Уровень развития металлургии был и остается ярким примером социально-экономического развития общества. Понимание этого уровня в различные исторические периоды позволяет более ясно представлять социально-экономическую ситуацию. Вызывает интерес изучение эффективности производства железа в доиндустриальный период на территории современной Беларуси. Черная металлургия возникла и получила распространение в бассейне реки Днепр уже в первой половине первого тысячелетия нашей эры [1, 2]. Сыродутный способ получения железа был основным вплоть до появления первых крупных металлургических заводов в XVIII в. Первая на территории современной Беларуси доменная печь была построена в 1780 г. на Вишневском заводе, основанном графом Иохимом Хрептовичем [3, 4]. Сырьем для древних металлургов служили болотные руды на основе бурого железняка, содержащего железо в форме гидратных оксидов $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$. Влияние занятости населения в процессах добычи руды нашло свое отражение в топонимике населенных пунктов – на сегодняшний день около 180 населенных пунктов Республики Беларусь в своем названии содержит производные от корня «руд»: Рудня, Руденск, Рудище, Рудники и др. [5].

Древние металлургические печи, к сожалению, дошли до нас в сильно фрагментированном или разрушенном состоянии. Сохранились, в основном, только основания печей, элементы футеровки, обломки керамических фурм. Таким образом, судить о параметрах конструкции печей можно исходя из графической реконструкции, созданной исследователями данных печей. Неудивительно, что одни и те же печи

по-разному интерпретированы археологами. Наряду с этим в отечественной исторической литературе достаточно скромно описана древняя металлургия и железообрабатывающее ремесло. Технология самого металлургического процесса получения железа упрощена до процесса загрузки руды и топлива в печь [2], что не дает объективного представления о процессе восстановления оксидов железа, содержащихся в руде. Также получили распространение гипотезы о возможности производства железа в примитивных инженерных сооружениях типа ямах-плавильнях с использованием естественной тяги [5] и куполообразных печах, высота которых не превышает диаметр их основания [1, 2]. Внести ясность в данный вопрос представляется возможным путем критической оценки и восстановления археологических данных об инженерных сооружениях, идентифицируемых как печи для производства железа, применяя современные знания о металлургическом процессе прямого восстановления оксидов железа. Для решения этой задачи был проведен ряд металлургических экспериментов по восстановлению руды до металлического железа в моделях сыродутных печей с использованием материалов и технологий, потенциально доступных древним металлургам. Каждый эксперимент включал следующие этапы: изготовление печи, обогащение руды, собственно плавку, анализ полученного материала. Сырьем для эксперимента служил бурый железняк, собранный на берегу реки Бобр в районе города Крупки Минской области (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав используемой руды на основе бурого железняка

Номер пробы	Химический элемент, %												
	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Zr
1	1,42	14,82	0,76	0,11	1,60	1,03	0,24	0,02	0,06	21,66	0,02	0,02	0,09
2	1,45	14,38	0,76	0,12	1,65	1,03	0,26	0,01	0,06	22,09	0,03	0,02	0,08

Первоначально был проведен эксперимент согласно технологии, описанной Б. А. Колчиным [6]. Руду тщательно промывали, измельчали до фракции 50–100 мм, прожигали в открытом пламене костра. С целью понижения температуры шлакообразования и последующего улучшения процесса отделения шлака от металлического железа в состав шихты был добавлен мел $\text{Ca}(\text{CO})_3$. Количество $\text{Ca}(\text{CO})_3$ составляло 24% от общей массы руды. Расчет проводили исходя из современных представлений о составе шлаке при доменном процессе для обеспечения минимальной температуры шлакообразования. Отожженную руду измельчали до фракции 0,1–1,0 мм и загружали в предварительно прогретую дровами глинобитную печь шахтного типа. Высота печи – 100 см, внутренний диаметр основания – 50 см. В качестве топлива использовали древесный уголь. Загрузку порций руды и топлива проводили каждые 5–7 мин по мере прогорания угля. Плавку продолжали 6–7 ч, за это время было израсходовано 20 кг шихты и 60 кг угля. В результате эксперимента удалось получить лишь незначительное количество металла (~10 г). Вероятными причинами столь малого металлургического выхода стали недостаточная жидкотекучесть шлака, низкая газопроницаемость ствола шахты печи, заполненной шихтой и топливом, а также малый диаметр фурмы для подачи воздуха в сочетании с большим внутренним диаметром основания печи. При проведении второго эксперимента были учтены ранее выявленные недостатки, а также осуществлено агломерирование руды. В качестве связующего вещества, исходя из возможностей древних металлургов, использовали пищевую муку растительного происхождения. Измельченные шихтовые материалы смешивали с мукой и водой, образуя тестообразную массу, которая после высыхания дробилась на куски фракцией 10–15 мм. В состав шихты было добавлено 20% окалины, образовавшейся в результате ручной кузнечной обработки. Также были внесены изменения в конструкцию самой печи: уменьшен внутренний диаметр ствола шахты, основание печи выполнено в форме чаши, увеличен внутренний диаметр фурмы для подачи воздуха. Порядок проведения эксперимента и количество используемого сырья остались прежними. В результате второго эксперимента удалось повысить эффективность процесса. Было получено около 600 г металла.

Таким образом, принятые меры по оптимизации технологии сыродутного процесса позволили увеличить металлургический выход, однако металл, полученный в результате второго эксперимента, представлял собой множество слитков неправильной формы. Это не соответствовало известным данным. Согласно археологическим данным [6,7], продуктом сыродутного процесса древних металлургов являлась крица массой 1,2–5,9 кг. Анализ известных археологических данных и современных металлургических знаний позволил сделать предположение о целесообразности использования в качестве сырья для получения первичной крицы окалины. Использование окалины вместо болотной руды в качестве сырья имеет ряд преимуществ:

- Возможность исследовать процесс восстановления чистого оксида железа без учета особенностей местных болотных руд.
- Снижение расхода топлива, так как нет необходимости в значительном количестве отшлаковывать пустую породу, содержащуюся в руде.
- Меньшее содержание вредных примесей, в первую очередь фосфора, по сравнению с болотной рудой.
- Доступность окалины по сравнению с болотной рудой в средневековом производстве.

Для дальнейших экспериментов была использована кузнечная окалина (табл. 2, рис. 1). В отличие от болотной руды она имеет более высокое содержание железа, находящегося преимущественно в оксидах. Металлические элементы, за исключением алюминия, самостоятельных оксидов не образуют и находятся в составе оксидов железа. На дифрактограмме присутствуют также следы феррита.

Таблица 2. Химический состав окалины (среднее значение трех измерений), %

Химический элемент, %						
Al	P	Cr	Mn	Ni	Cu	W
0,915	0,235	0,210	0,560	0,144	0,164	0,175

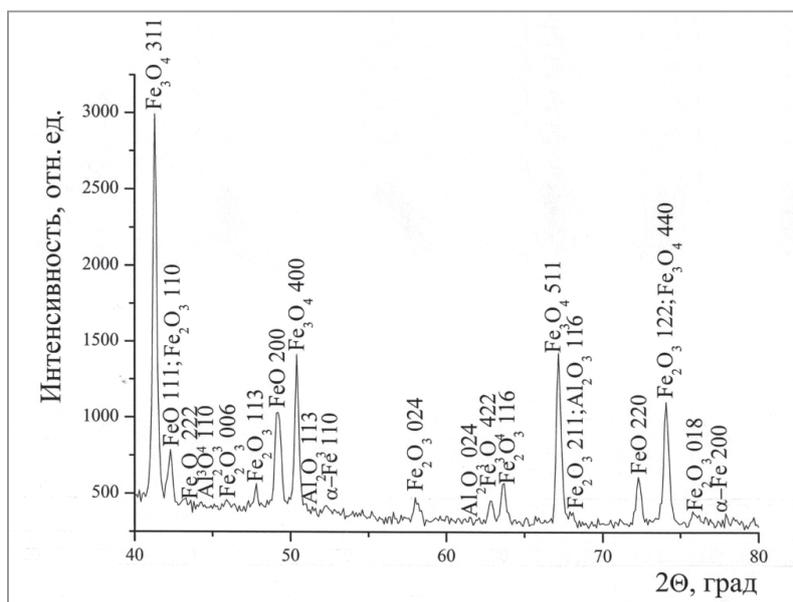


Рис. 1. Фазовый состав используемой в эксперименте окалины

Следующий эксперимент был проведен с учетом анализа результатов первых двух экспериментов. Для проведения эксперимента была изготовлена усовершенствованная глинобитная печь шахтного типа (рис. 2). Высота печи составила 58 см, внутренний диаметр основания – 30 см. В передней части печи на высоте 10 см от основания печи была монтирована керамическая фурма для подачи воздуха. Дутье обеспечивал центробежный вентилятор низкого давления и малой производительности, приводимый в движение электродвигателем с регулируемыми оборотами. Такой вентилятор позволяет моделировать воздушный поток, создаваемый примитивными воздухонагнетательными устройствами – мехами. Перед началом эксперимента печь прогревали дровами, после чего весь внутренний объем печи заполняли древесным углем. Сверху на уголь помещали порцию окалины массой 300–400 г. По мере прогорания топлива добавляли новую порцию угля и окалины. Всего было израсходовано 10 кг окалины и 20 кг древесного угля. Общее время продолжительности эксперимента – 4 ч. По окончании плавки переднюю часть печи

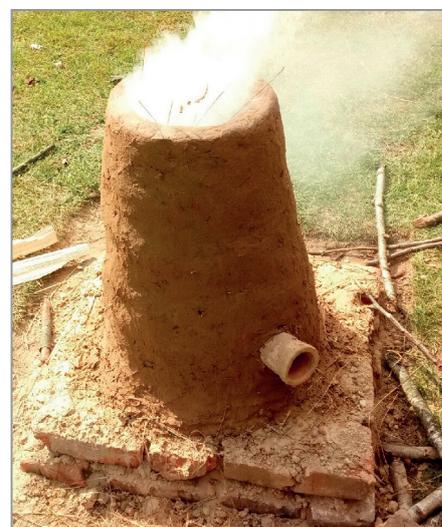


Рис. 2. Глинобитная печь шахтного типа, изготовленная на основе археологических источников

разламывали, горновую крицу извлекали клещами и повергали предварительной кузнечной обработке. Задача предварительной кузнечной обработки состояла в том, чтобы по возможности уплотнить горячую крицу и удалить наиболее крупные куски налипшего шлака. Общая масса полученной горновой крицы составила 4 кг. Полученная горновая крица представляла собой ком губчатого железа, сильно загрязненный неметаллическими включениями (рис. 3).



Рис. 3. Горновая крица, полученная в эксперименте. Внешний вид и разрез

Как известно из археологических данных, стальной полуфабрикат, полученный в сыродутной металлургической печи (горновая крица), не являлся готовым сырьем для производства металлических изделий. Сырьем для кузнечного производства служила заготовка из рафинированного металла – товарная крица [8]. Горновая крица имеет большое количество пор, неметаллических включений, существенную неравномерность распределения углерода и примесей по сечению слитка. Это обусловлено тем, что максимальная температура при сыродутном процессе не превышает 1420 °С [9]. В рамках проводимых исследований были выполнены работы по кузнечной обработке горновой крицы. Следует отметить, что данный аспект доиндустриального производства железа мало освещен в литературе. Было высказано и экспериментально проверено предположение о возможности рафинирования горновой крицы методом многократной кузнечной сварки. Передел горновой крицы в товарную осуществляли многократной кузнечной сваркой с предварительным разделением первоначальной заготовки на несколько фрагментов. Этот процесс сопровождался значительным угаром металла. Этапы кузнечной обработки, реализованные в эксперименте, приведены на рис. 4.

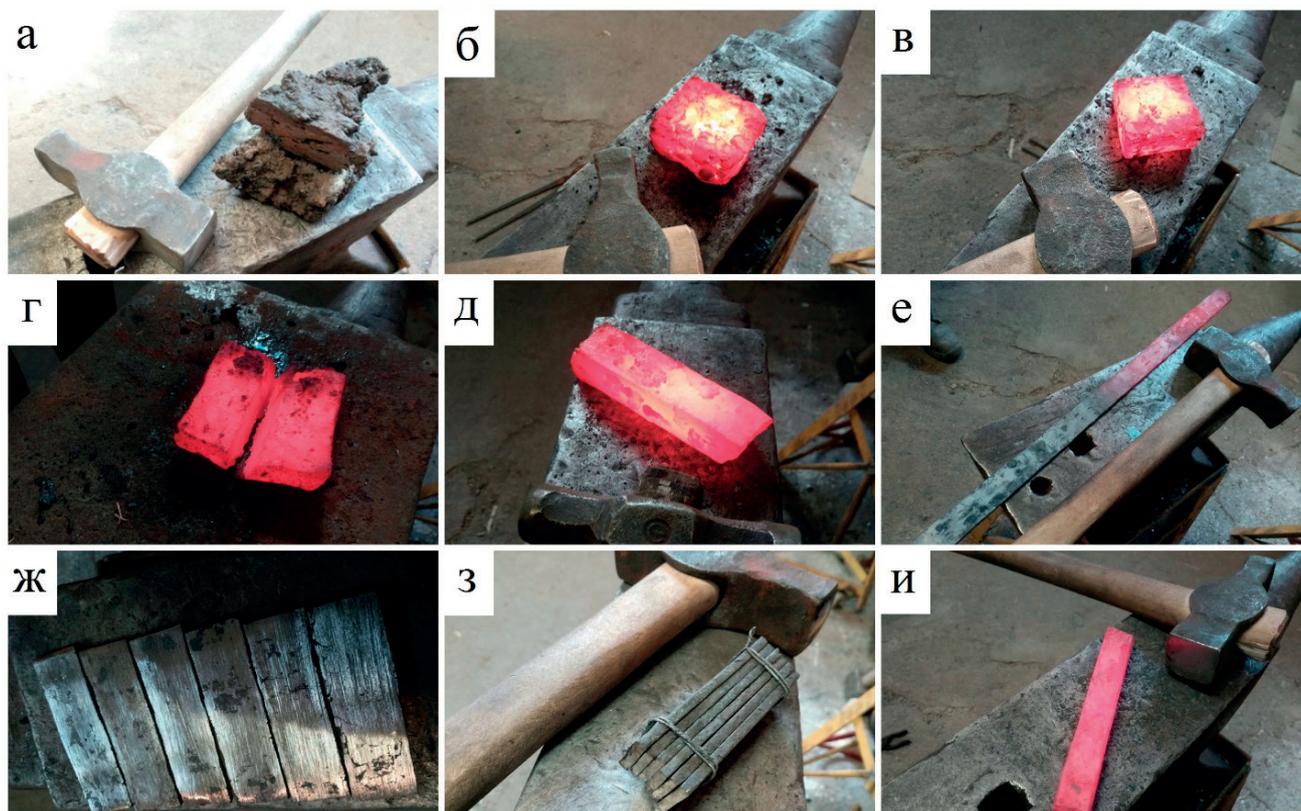


Рис 4. Технологические этапы кузнечной обработки крицы:

- а – горновая крица; б, в – формирование поковки правильной формы; г, ж – разделение поковки на части;
 д – поковка после соединения частей кузнечной сваркой; е – поковка, вытянутая в полосу;
 з – 6 частей поковки, подготовленные к соединению кузнечной сваркой; и – заготовка из рафинированного металла

Исходная масса обрабатываемого фрагмента горновой крицы составляла 0,7 кг, после кузнечной обработки – 0,35 кг. Значительные потери массы обусловлены удалением шлака и других неметаллических включений, а также угаром металла при нагреве дляковки и кузнечной сварки. В процессе кузнечной обработки у заготовки формируется характерная волокнистая макроструктура (рис. 5). Чем больше количество частей, на которые разделена исходная поковка, тем выше вероятность вскрыть все пустоты, заполненные неметаллическими включениями, что позволяет механически удалить данные включения в процессе горячей деформации металла и впоследствии заварить очищенные пустоты. В процессе многократной кузнечной сварки и высокотемпературных рекристаллизационных процессов активизируются диффузионные процессы, происходит частичная или полная гомогенизация по углероду, примесям, что позволяет получить более однородный химический состав по сечению поковки. С увеличением количества циклов кузнечной сварки и соответственно разделений на части поковки происходит более полное рафинирование металла. Вместе тем, подобная технология рафинирования связана с потерями металла из-за угара при большом количестве нагревов. Таким образом, экспериментально было подтверждено, что от характера кузнечной обработки горновой крицы напрямую зависят свойства металла, полученного сыродутным способом по доиндустриальной технологии.

В результате выполненных работ была получена кузнечная крица высокоуглеродистой стали (табл. 3). Кузнечное рафинирование позволило несколько уменьшить количество оксидов алюминия и предположительно сульфидов марганца. Остальные легирующие элементы остались на уровне примесей. Содержание фосфора хорошо коррелирует с данными табл. 2. Это подтверждает известные данные об ограниченных возможностях кузнечного рафинирования. Сравнительный анализ полученных результатов и данных М.Ф. Гурина [7] позволяет полагать, что полученная сталь близка по составу к высокоуглеродистым вставкам трехполосных ножей Полоцкой земли (рис. 6).

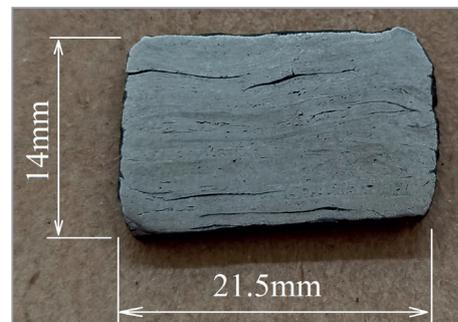


Рис. 5. Макроструктура рафинированного металла после травления

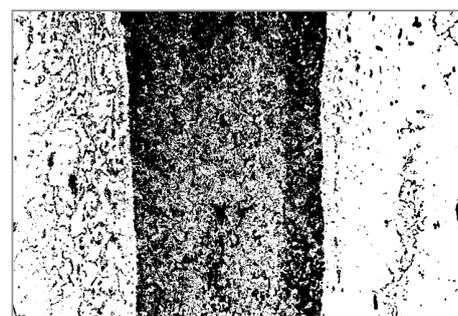


Рис. 6. Микроструктура трехполосного ножа Полоцкой земли [7]. x 80

Таблица 3. Химический состав металла, полученного экспериментальным путем (среднее значение четырех измерений), %

Химический элемент, %							
C	Al	P	Cr	Mn	Ni	Cu	W
0,927	0,577	0,253	0,092	0,120	0,139	0,367	0,508

Выводы

Проведена металлургическая реконструкция доиндустриального сыродутного способа получения углеродистых сталей на базе известных археологических данных. Экспериментально доказана несостоятельность упрощенных представлений о металлургической культуре производства железа в этот период на территории современной Беларуси. Примитивное описание доиндустриального металлургического процесса в отечественной исторической литературе, формализованное до процесса загрузки руды и топлива в печь, не соответствует действительности. Понижение температуры жидкотекучести шлака и обеспечение высокой газопроницаемости шихты представляются наиболее проблемными вопросами в гипотетическом «примитивном» сыродутном процессе.

Есть основания полагать, что анализируемые процессы получения стального полуфабриката в доиндустриальный период имели более сложный многостадийный характер, чем принято считать. Экспериментально подтверждена возможность частичного обогащения руды в этот период доступными приемами. Подтверждена эффективность агломерирования.

Экспериментально подтверждена гипотеза о возможном применении древними металлургами технологии переработки отходов кузнечного производства. Установлено, что окалина эффективно восстанавливается до металлического железа в реконструированной доиндустриальной сыродутной печи

шахтного типа. Для восстановления окалина требуется меньше топливно-энергетических затрат по сравнению с рудой. Добавление окислы в состав шихты существенно повышает эффективность и металлургический выход.

Была выполнена пионерная реконструкция кузнечного рафинирования полученной горновой крицы. В процессе кузнечного рафинирования масса горновой крицы снижается до 50%. В результате выполненных работ была получена кузнечная крица высокоуглеродистой стали. Кузнечное рафинирование позволило несколько уменьшить количество оксидов алюминия, сульфидов марганца. Полученная сталь близка по составу к высокоуглеродистым вставкам орудий доиндустриального периода на территории современной Беларуси.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лявданский, А. Н.** Да гісторыі жалезнага промыслу на Палес'сі. Рудні і месцазнаходжаньні руды. Менск, 1933.
2. **Гурин, М. Ф.** Древнее железо Белорусского Поднепровья (I тысячелетие н.э.) / М. Ф. Гурин. Минск: Наука и техника, 1982. 126 с.
3. **Киштымов, А. Л.** Урал и судьбы черной металлургии Беларуси в XIX в. // Развитие металлургического производства на Урале: сб. докл. и сообщений историко-экономической секции Международного конгресса, посвященного 300-летию металлургии Урала и России. Екатеринбург: Академкнига, 2001. С. 70–76.
4. **Сидорович, В. Е.** Naliboki Forest: Historical outline and ethnographical sketch. CHATYRY CHVERCI, 2016. 367 p. (in English).
5. **Саганович, Г. Н.** Кузнечное ремесло Белоруссии XIV–XVIII вв.: дис. ... канд. ист. наук. Киев, 1989.
6. **Колчин, Б. А.** Черная металлургия и металлообработка в древней Руси (домонгольский период). М.: Изд-во АН СССР, 1953. 259 с.
7. **Гурин, М. Ф.** Кузнечное ремесло Полоцкой земли. IX–XIII вв. / М. Ф. Гурин. Минск: Наука и техника, 1987. 151 с.
8. **Наумов, А. Н.** Черная металлургия и железообработка на сельских памятниках Куликова поля в конце XII – середине XIV вв.: дис. ... канд. ист. наук. М., 2004. 295 с.
9. **Adam Thiele.** Smelting experiments in the early medieval fajszi-type bloomery and the metallurgy of iron bloom // Mechanical Engineering. January 2010.

REFERENCES

1. **Ljavidanskiy A. N.** *Da gistoryi zhaleznaга promyslu na Pales'si. Rudni i mescaznahodzhan'ni rudy* [The history of the iron industry in Polesie. Mines and ore locations]. Mensk, 1933.
2. **Gurin M. F.** *Drevnee zhelezo Belorusskogo Podneprov'ja (I tysjacheletie n. je.)* [Ancient iron of the Belarusian Dnieper region (1st millennium AD)]. Minsk, Nauka i Tehnika Publ., 1982. 126 p.
3. **Kishtymov A. L.** *Ural i sud'by chernoj metallurgii Belarusi v XIX v.* [The Urals and the fate of the ferrous metallurgy of Belarus in the 19th century]. Razvitie metallurgicheskogo proizvodstva na Urale. Sb. dokladov i soobshhenij istoriko-jekonomicheskoy sekcii Mezhdunarodnogo kongressa, posvjashhennogo 300-letiju metallurgii Urala i Rossii. Ekaterinburg, Akademkniga Publ., 2001, pp. 70–76.
4. **Sidorovich V. E.** Naliboki Forest: Historical outline and ethnographical sketch – CHATYRY CHVERCI, 2016. 367 p. (in English).
5. **Saganovich G. N.** *Kuznechnoe remeslo Belorussii XIV–XVIII vv. Diss. kand. ist. nauk* [Blacksmith's craft of Belarus XIV–XVIII centuries. Kand. ist. sci. diss]. Kiev, 1989.
6. **Kolchin B. A.** *Chernaja metallurgija i metalloobrabotka v drevnej Rusi (Domongol'skij period)* [Ferrous metallurgy and metalworking in ancient Russia (Pre-Mongol period)]. Moscow, Izd-vo AN SSSR Publ., 1953. 259 p.
7. **Gurin M. F.** *Kuznechnoe remeslo Polockoj zemli. IX–XIII vv.* [Blacksmith craft of the Polotsk land. IX–XIII centuries]. Minsk, Nauka i Tehnika Publ., 1987. 151 p.
8. **Naumov A. N.** *Chernaja metallurgija i zhelezoobrabotka na sel'skih pamjatnikah Kulikova polja v konce XII – seredine XIV vv. Diss. kand. ist. nauk* [Ferrous metallurgy and iron processing on the rural monuments of the Kulikovo field at the end of the XII – the middle of the XIV centuries. Kand. ist. sci. diss.]. Moscow, 2004. 295 p.
9. **Adam Thiele.** Smelting experiments in the early medieval fajszi-type bloomery and the metallurgy of iron bloom. Article in Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering. January 2010.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-106-113>
УДК 669

Поступила 19.02.2021
Received 19.02.2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПЫЛИ ГАЗООЧИСТКИ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

С. Л. РИМОШЕВСКИЙ, Д. А. ПРОКОПЧУК, Д. М. ГОЛУБ, ОАО «БЕЛНИИЛИТ» г. Минск, Беларусь,
ул. Машиностроителей, 28. E-mail: belniilit@belniilit.by

В статье рассматриваются вопросы переработки пыли электросталеплавильного производства методом термодинамического извлечения железа, цинка и свинца с целью снижения воздействия на окружающую среду и увеличения ресурсной базы отрасли. Представлены различные методы извлечения цинка из пылегазоочистки, термодинамический расчет разложения и восстановления феррита цинка.

Ключевые слова. Пылегазоочистка, электросталеплавильное производство, термодинамическое извлечение, оксид цинка, энергия Гиббса, свинец, железо.

Для цитирования. Римошевский, С.Л. Исследование процессов переработки пыли газоочистки сталеплавильных производств / С.Л. Римошевский, Д.А. Прокопчук, Д.М. Голуб // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 106–113. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-106-113>.

INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF DUST PROCESSING GAS CLEANING OF STEELMAKING INDUSTRIES

S. L. RIMOSHEVSKY, D. A. PROKOPCHUK, D. M. GOLUB, OJSC “BELNIILIT” Minsk, Belarus, 28,
Mashinostroiteley str. E-mail: belniilit@belniilit.by

The article deals with the issues of processing of dust from electric steelmaking production by the method of thermodynamic extraction of iron, zinc and lead in order to reduce the environmental impact and increase the resource base of the industry. The paper presents various methods of zinc extraction from dust and gas purification, thermodynamic calculation of the decomposition and reclaiming of zinc ferrite.

Keywords. Dust and gas cleaning, electric steelmaking, thermodynamic extraction, zinc oxide, Gibbs energy, lead, iron.

For citation. Rimoshevsky S. L., Prokopchuk D. A., Golub D. M. Investigation of the processes of dust processing gas cleaning of steelmaking industries. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 106–113. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-106-113>.

Отходы металлургического производства являются наиболее интенсивными источниками загрязнения экологии. На полигоны твердых отходов складывается большое количество техногенных вторичных ресурсов в виде шлака и пыли газоочисток.

В условиях ОАО «БМЗ» системами пылегазоочистки ежегодно улавливается около 35 тыс. т пыли электросталеплавильного производства при коэффициенте очистки газа 99%. Состав улавливаемой пыли за последние 20–30 лет изменился кардинально, поскольку изменилась структура шихты. Если в период пуска и освоения БМЗ основной состав пыли составляли оксиды железа с небольшим содержанием цветных примесей, то сейчас доля свинца, олова, цинка в пыли выросла в десятки раз. Например, 20 лет назад в составе пыли цинка содержалось около 0,3%, сейчас – от 15 до 30%. Это объясняется тем, что на смену крупногабаритному углеродистому лому в плавильную печь теперь попадает значительная доля лома с покрытиями. В этих условиях необходимо найти пути снижения пылеобразования и использования пыли в качестве вторичного сырья с целью извлечения ценных компонентов, в первую очередь Fe, Zn, Pb.

Появление и развитие новых технологий позволило сделать извлечение ценных элементов из шлака, пыли и шламов рентабельным, что повысило интерес к использованию вторичных ресурсов, в том числе для производства новой продукции. Особое внимание уделяется разработке способов извлечения ценных компонентов из металлургической пыли, например, цинка и свинца.

Изучение вопросов образования пыли в дуговой печи, свойств этой пыли и возможностей ее утилизации представляет несомненный интерес с точки зрения снижения воздействия на окружающую среду и увеличения ресурсной базы отрасли. С этой целью были проведены исследования, задачами которых являлись изучение состава, структуры и свойств электросталеплавильной пыли; термодинамическое моделирование процессов извлечения железа, цинка и свинца из пыли; поиск путей переработки пыли и эффективного использования в народном хозяйстве.

При разработке технологии и организации производства по извлечению полезных элементов из образующейся пыли необходимо выполнить теоретическое исследование для понимания процесса образования пыли и прогнозирования ее состава в зависимости от загружаемой в электродуговую печь шихты. При интенсивной работе дуги в период расплавления лома и доводки расплава до заданного химического состава происходят интенсивные экзотермические процессы окисления расплава.

Механизм испарения компонентов расплава включает следующие стадии: внутреннюю диффузию и испарения.

При электроплавке диффузионные процессы, как правило, не являются лимитирующими, поскольку за счет интенсификации процесса плавки происходят интенсивное перемешивание ванны и отвод образующихся газов и пыли. Интенсивность испарения компонентов расплава в ДСП зависит от температуры поверхности расплава и давления насыщенного пара испаряющегося вещества. Скорость испарения вещества можно определить из уравнения Ленгмюра, которое используется для расчета интенсивности испарения в вакууме, кг/с:

$$\omega = \alpha \cdot p^0 \sqrt{\frac{A}{2\pi RT}}, \quad (1)$$

где α – коэффициент Ленгмюра;

p^0 – давление насыщенного пара элемента, Па;

A – атомная масса элемента, кг;

R – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/(Кмоль);

T – температура, К.

Скорость испарения определяется по массе m , которую теряет вещество, нагретое до температуры T за время τ с поверхности S при испарении в вакууме.

Коэффициент испарения α учитывает возможные препятствия для испарения с поверхности. Его можно определить экспериментально по уравнению Ленгмюра, если все остальные величины известны. Для чистых веществ это не представляет сложности, но для многокомпонентных расплавов необходимо знать коэффициенты активности веществ. При условиях, отличных от вакуума, необходимо использовать коэффициент α .

Электрические параметры плавки в ДСП оказывают большое влияние на интенсивность пылеобразования.

В зоне воздействия дуг, кроме температурного фактора, имеют значения формирования анодного пятна, электро- и газодинамических сил, плотности тока.

Цинк в пыли электросталеплавильного производства в основном (70–85 %) представлен ZnO, остальные 15–30 % приходятся на $ZnFe_2O_4$; $3(Cu, Zn)SO_4 \cdot 4H_2O$; $Zn_3(AsO_4)_2 \cdot 4H_2O$; $ZnS_2O_4 \cdot Na_2S_2O_4 \cdot n \cdot H_2O$; $3(Zn, Mg)O \cdot 4(Si, Al)O_2 \cdot H_2O$; $Cd_3Zn(SO_3)_4$ и $Zn_{12}(SO_4)Cl_3(OH)_{15} \cdot 5H_2O$.

Авторы работы [1] отмечают присутствие фаз в пыли ЭСПЦ ЧерМК, приведенных в табл. 1.

Таблица 1. Фазовый состав пыли ЭСПЦ ЧерМК

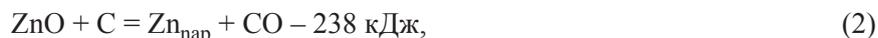
Наименование фаз	Содержание, %
Магнетит (Fe_3O_4)	50,0
Цинкит (ZnO)	18,7
Лаурионит ($PiCl(OH)$)	1,7
Оксид кремния (SiO_2)	13,2
Энстатит ($(Mg, Fe)Si_2O_6$)	16,0

По дисперсности пыль классифицируется на следующие группы: видимая пыль (размер более 10 мкм); микроскопическая пыль (размер от 0,25 до 10 мкм); ультрамикроскопическая пыль (размер менее 0,25 мкм).

Выделение цинка осуществляется пирометаллургическим или гидрометаллургическим способом. Пирометаллургическим способом получают около 15 % цинка. Дистилляция (испарение металла при

температурах выше точки их кипения) цинка включает следующие физико-химические процессы: восстановление оксида цинка до металла углеродом и CO при 1000–1100 °С; испарение (возгонка, дистилляция) металлического цинка; конденсацию паров металлического цинка.

Процесс восстановления цинка проходит в результате протекания реакций:



Восстановительная атмосфера поддерживается восстановлением диоксида углерода.

Оксид цинка частично восстанавливается за счет твердого углерода, но главным восстановителем является оксид углерода, в то время как углерод взаимодействует с CO₂, что ускоряет восстановление оксида цинка. Получение жидкого цинка дистилляцией возможно только в условиях сильно восстановительной атмосферы и полной герметизации применяемой аппаратуры.

Оксид цинка может восстанавливаться железом:



Реакция протекает в 2 раза быстрее по отношению к оксиду углерода. При производстве цинка железо считается вредной примесью, так как оно образует чугун, легкоплавкие шлаки и при наличии серы – штейны:



Цинк в момент восстановления находится в парообразном состоянии. При дистилляционном процессе пары цинка всегда разбавлены другими газами, главным образом, оксидом углерода. Каждый газ в отдельности в зависимости от его объема будет иметь свое парциальное давление, поэтому, чем больше будут разбавлены цинковые пары другими газами, тем меньше будет парциальное давление цинка и тем ниже точка росы.

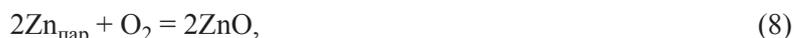
Например, при производстве цинка парциальное давление паров в ретортных газах составляет около 50 кПа (300–370 мм рт. ст.), а точка росы соответствует температуре 830–870 °С.

Таким образом, для восстановления цинка из его оксида нужны следующие условия: высокая температура; атмосфера, состоящая почти полностью из CO (появление в атмосфере небольших количеств CO₂ смещает реакцию восстановления оксида цинка влево); восстановительная атмосфера и полная герметизация печи для обеспечения конденсации паров цинка (так как в присутствии CO₂ образовавшийся цинк вновь окисляется (сгорает)).

Восстановление оксида железа способствует полноте возгонки цинка:



В газоотводе пары металлов вновь окисляются кислородом воздуха или углекислым газом:



Повышение температуры от 900 до 1100 °С интенсифицирует отгонку цинка в 2 раза, а повышение концентрации CO от 75 до 85% – в 4–5 раз.

Анализ селективного извлечения цинка и свинца

Определить температуру перехода чистых компонентов железа, цинка в пар можно по температурной зависимости их давления насыщенного пара. В работе [2] приведено уравнение для цинка в температурном интервале 936–980 °С:

$$\ln p_{\text{Zn}} = 12,046 - \frac{6655}{T} - 1,147 \lg T. \quad (10)$$

Т а б л и ц а 2. Давление пара жидкого цинка

<i>T</i> , °С	490,8	544,6	588,9	641,2	720,5	836,0
<i>p</i> , кПа	0,14	0,49	1,21	3,07	10,86	47,49

При более низких температурах можно использовать значения, приведенные в табл. 2, а при более высоких температурах – в табл. 3, предварительно переводя из мм рт. ст. в кПа.

Таблица 3. Давление насыщенного пара жидкого свинца

$T, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$						
1159,9	1,2	1196,5	1,7	1214,9	2,1	1222,5	2,3
1167	1,3	1202,6	1,7	1216,1	2,1	1224,9	2,5
1175	1,4	1203,7	1,9	1203,7	2,2	1231,2	6,0
1180,8	1,5	1207,2	1,9	1217,4	2,2	1324	2,3
1189,2	1,6	1212,8	2,1	1218,8	2,2		
1193,7	1,7	1213,8	2,1	1219	2,3		

Температура, при которой давление насыщенного пара элемента достигает 101,325 кПа, является температурой кипения вещества. При этой температуре вещество полностью превращается в пар. Цинк переходит в пар при температуре около 906 °С.

Так как в металлургической пыли цинк находится в виде оксидов, то представляет интерес давление насыщенного пара их оксидов.

Извлечение цинка из чистого ZnO проходит при высоких температурах (около 2200 К) по результатам термодинамических расчетов. При добавлении восстановителя температуру извлечения цинка из ZnO можно уменьшить. Это свойство используется в цветной металлургии для извлечения цинка.

Термодинамический расчет разложения и восстановления феррита цинка

Основная сложность утилизации пыли электросталеплавильного производства заключается в содержании в ее составе термически устойчивого соединения – феррита цинка (ZnFe_2O_4). Его доля в цинксодержащих компонентах пыли может достигать 30%.

Анализ процессов разложения и фазовых переходов для феррита цинка по литературным источникам показал различающиеся данные.

Переход из твердого состояния в жидкое без разложения происходит при температуре 1590 ± 10 °С.

В работе [3] приведена реакция разложения феррита цинка:



для которой в температурном диапазоне 25–700 °С изменение энтальпии равно 2300 кал/моль, а изменение энтропии – 0,9 кал/моль.

Сделано допущение, что в температурном диапазоне до 3000 °С энтальпия и энтропия реакции остаются неизменными. Константу равновесия реакции можно определить из выражения:

$$\Delta G = 9623,2 - 3,77 \cdot T, \text{ Дж/моль} \quad (12)$$

$$\ln K = -\Delta G/RT = -(9623,2 - 3,77T) / (R \cdot T). \quad (13)$$

Константа равновесия во всем температурном интервале до 2555 К имеет отрицательный знак. Это свидетельствует о том, что реакция существенно сдвинута влево, т. е. разложение феррита цинка невозможно. Моделирование процесса нагрева феррита цинка (рис. 1) показало, что уже примерно при температуре 1250 °С он полностью разлагается.

Установлено, что при температурах 298–2000 К данная фаза находится в стабильном состоянии.

Анализ показал, что в температурном диапазоне 3050–3100 К феррит цинка разлагается по реакции:



причем ZnO находится в жидком состоянии. При этом сразу происходит его разложение по реакции:



В работе [4] авторы приводят графические данные по расчету энергии Гиббса реакций разложения и восстановления феррита цинка наиболее распространенными восстановителями (углерод, монооксид углерода, водород, метан) (рис. 2).

Из рисунка видно, что частично восстанавливается оксид цинка, однако заметное его количество образуется при температуре свыше 1000 °С и сразу в газообразном виде. Из-за недостатка углерода железо и марганец восстанавливаются в незначительной степени, восстановления MgO, SiO₂ и CaO не

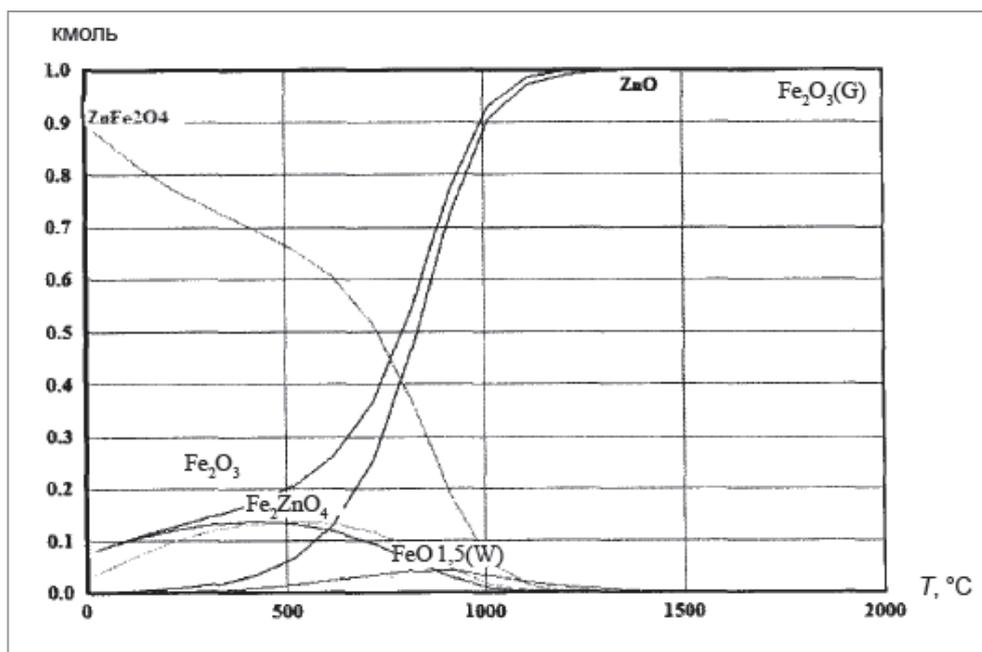
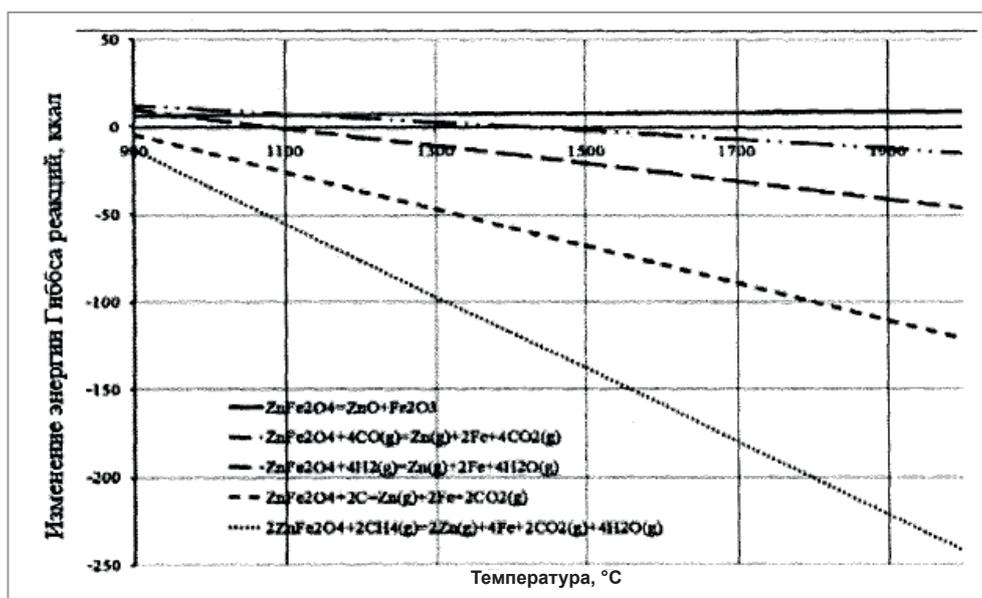


Рис. 1. Моделирование разложения феррита цинка

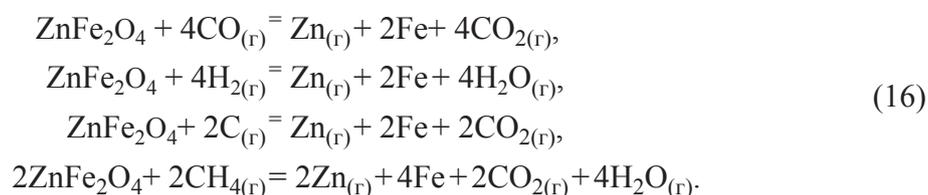
Рис. 2. Температурная зависимость ΔG реакций разложения и восстановления феррита цинка

происходит вовсе. Термодинамически устойчивым является феррит цинка $ZnFe_2O_4$ (цинкит железа), что осложняет процесс восстановления обоих элементов.

Энергия Гиббса реакции разложения $ZnFe_2O_4$ имеет положительный знак, что также свидетельствует о невозможности разложения в указанном температурном интервале.

Разложение $ZnFe_2O_4$ и его восстановление возможны при высоких температурах. Анализируя приведенные литературные данные, можно сделать вывод о том, что для разложения $ZnFe_2O_4$ необходимы высокие температуры либо восстановители.

Энергию Гиббса определяли для следующих реакций, кДж/моль:



Для реакции 1:

$$\begin{aligned} \Delta G^\circ &= \Delta G^\circ_{\text{ZnO}} + \Delta G^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} - \Delta G^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4}, \\ \Delta G^\circ_{\text{ZnO}} &= \Delta H^\circ_{\text{ZnO}} + T\Delta S^\circ_{\text{ZnO}} = -350,6 + 43,64 T, \\ \Delta G^\circ_{\text{Fe}_2\text{O}_3} &= \Delta H^\circ_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + T\Delta S^\circ_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = -822,2 + 87,4 T, \\ \Delta G^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} &= \Delta H^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} + T\Delta S^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} = -1181,98 + 153,301 T, \\ \Delta G^\circ &= -350,6 - 43,64 T - 822,2 - 87,4 T + 1181,98 + 153,30 T = 9197 + 22,21 T, \\ \Delta G^\circ &= 9197 + 22,21 T \end{aligned} \tag{17}$$

Для реакции 2:

$$\begin{aligned} \Delta G^\circ &= \Delta G^\circ_{\text{Zn(r)}} + 2\Delta G^\circ_{\text{Fe}} + 4\Delta G^\circ_{\text{CO}_2(\text{r})} - \Delta G^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} - 4\Delta G^\circ_{\text{Co(r)}}, \\ \Delta G^\circ_{\text{Zn(r)}} &= 0 - 41,63 T, \\ \Delta G^\circ_{\text{Fe}} &= 0 - 27,15 T, \\ \Delta G^\circ_{\text{CO}_2(\text{r})} &= -393,51 - 213,68 T, \\ \Delta G^\circ_{\text{Co(r)}} &= -110,52 - 197,547 T. \end{aligned} \tag{18}$$

Расчет энергии Гиббса приведен в табл. 4 с учетом реакции 2.

Т а б л и ц а 4. Расчет энергии Гиббса для реакции 2

ΔG	ΔH , Дж/моль	ΔS , кДж/(моль·К)
$\Delta G^\circ_{\text{Zn(r)}}$	0	-41,63
$2\Delta G^\circ_{\text{Fe}}$	0	-54,3
$4\Delta G^\circ_{\text{H}_2\text{O(r)}}$	-1143320	-754,88
$-\Delta G^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4}$	1181980	153,301
$-4\Delta G^\circ_{\text{H}_2(\text{r})}$	0	522,08
ΔG°	38660	-175,43T

Полученные значения энергии Гиббса для реакции 2:

$$\Delta G^\circ = 50020 - 7,189 T. \tag{19}$$

Для реакции 3:

$$\begin{aligned} \Delta G^\circ &= \Delta G^\circ_{\text{Zn(r)}} + 2\Delta G^\circ_{\text{Fe}} + 4\Delta G^\circ_{\text{H}_2\text{O(r)}} - \Delta G^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} - 4\Delta G^\circ_{\text{H}_2(\text{r})}, \\ \Delta G^\circ_{\text{H}_2\text{O(r)}} &= -285,83 - 188,72 T, \\ \Delta G^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} &= -1181,98 - 153,301 T, \\ \Delta G^\circ_{\text{H}_2(\text{r})} &= 0 - 130,52 T. \end{aligned} \tag{20}$$

Расчет энергии Гиббса приведен в табл. 5 с учетом реакции 3.

Т а б л и ц а 5. Расчет энергии Гиббса для реакции 3

ΔG	ΔH , Дж/моль	ΔS , кДж/(моль·К)
$\Delta G^\circ_{\text{Zn(r)}}$	0	-41,63
$2\Delta G^\circ_{\text{Fe}}$	0	-54,3
$4\Delta G^\circ_{\text{H}_2\text{O(r)}}$	-1143320	-754,88
$-\Delta G^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4}$	1181980	153,301
$-4\Delta G^\circ_{\text{H}_2(\text{r})}$	0	522,08
ΔG°	38660	-175,43T

Полученные значения энергии Гиббса для реакции 3:

$$\Delta G^\circ = 38660 - 175,43 T. \tag{21}$$

Для реакции 4:

$$\Delta G^{\circ} = \Delta G^{\circ}_{\text{Zn}} + 2\Delta G^{\circ}_{\text{Fe}} + 4\Delta G^{\circ}_{\text{CO}_2(\text{r})} - \Delta G^{\circ}_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} - 4\Delta G^{\circ}_{\text{C}(\text{r})}, \quad (22)$$

$$\Delta G^{\circ}_{\text{C}} = 0 - 5,740 T.$$

Расчет энергии Гиббса приведен в табл. 6 с учетом реакции 4.

Т а б л и ц а 6. Расчет энергии Гиббса для реакции 4

ΔG	ΔH , Дж/моль	ΔS , кДж/(моль·К)
$\Delta G^{\circ}_{\text{Zn}}$	0	-83,26
$2\Delta G^{\circ}_{\text{Fe}}$	0	-108,6
$4\Delta G^{\circ}_{\text{CO}_2(\text{r})}$	-787020	-427,36
$-\Delta G^{\circ}_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4}$	-1143320	-754,88
$-4\Delta G^{\circ}_{\text{CO}(\text{r})}$	2363960	306,6
ΔG°	583320	-695,12

Полученные значения энергии Гиббса для реакции 4:

$$\Delta G^{\circ} = 394960 - 358,51 T. \quad (23)$$

Для реакции 5:

$$\Delta G^{\circ} = 2\Delta G^{\circ}_{\text{Zn}} + 4\Delta G^{\circ}_{\text{Fe}} + 2\Delta G^{\circ}_{\text{CO}_2(\text{r})} + 4\Delta G^{\circ}_{\text{H}_2\text{O}(\text{r})} - 2\Delta G^{\circ}_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} - 2\Delta G^{\circ}_{\text{CH}_4(\text{r})}, \quad (24)$$

$$\Delta G^{\circ}_{\text{CH}_4} = -74,85 - 186,19 T.$$

Расчет энергии Гиббса приведен в табл. 7 с учетом реакции 5.

Т а б л и ц а 7. Расчет энергии Гиббса для реакции (5)

ΔG	ΔH , Дж/моль	ΔS , кДж/(моль·К)
$\Delta G^{\circ}_{\text{Zn}}$	0	-83,26
$2\Delta G^{\circ}_{\text{Fe}}$	0	-108,6
$4\Delta G^{\circ}_{\text{CO}_2(\text{r})}$	-787020	-427,36
$-\Delta G^{\circ}_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4}$	-1143320	-754,88
$-4\Delta G^{\circ}_{\text{CO}(\text{r})}$	2363960	306,6
ΔG°	583320	-695,12

Полученные значения энергии Гиббса для реакции 5:

$$\Delta G^{\circ} = 583,32 - 695,12 T. \quad (25)$$

Выводы

Теоретически установлено, что пары цинка, свинца и железа образуются не одновременно, а с временным интервалом, что позволяет селективно извлекать цветные металлы из пыли в зависимости от содержания в ней углерода.

При низком содержании углерода (менее 3%) первым в процессе нагрева материала извлекается свинец, затем цинк. При увеличении продолжительности процесса извлечения цветных металлов из пыли содержание углерода не имеет значения. При увеличении содержания углерода цинк и свинец извлекаются одновременно.

Установлено, что для извлечения феррита цинка необходимы высокотемпературные процессы, но с использованием восстановителей возможен процесс при более низких температурах.

Результаты экспериментов по извлечению цинка и свинца из пыли электросталеплавильного производства показали, что при ее обработке высокотемпературным способом степень извлечения цинка достигает до 97 и 99% соответственно (при отсутствии значительных потерь Fe).

Получено, что образующийся конденсат состоит в основном из ZnO, а спек – в основном из оксидов Fe.

Показана перспективная возможность селективного извлечения цинка с низким содержанием углерода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Корнеев, В. П.** Исследование физико-химических свойств цинксодержащих пылей электросталеплавильного производства / В. П. Корнеев, В. П. Сиротинкин, Н. В. Петракова, В. Г. Дюбанов, Л. И. Леонтьев // *Металлы*. 2013. № 4. С. 38–43.
2. **Несмеянов, А. Н.** Давление пара химических элементов / А. Н. Несмеянов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 396 с.
3. **Туркдоган, Е. Т.** Физическая химия высокотемпературных процессов / Е. Т. Туркдоган. М.: Металлургия, 1985. 344 с.
4. **Могутнов, Б. М.** Термодинамика железоуглеродистых сплавов / Б. М. Могутнов, И. А. Томилин. М.: Металлургия, 1972. 249 с.

REFERENCES

1. **Korneev V.P., Sirotinkin V.P., Petrakova N.V., Djubanov V.G., Leont'ev L.I.** Issledovanie fiziko-himicheskikh svoystv cink-soderzhashhih pylej jelektrostaleplavil'nogo proizvodstva [Investigation of the physicochemical properties of zinc-containing dusts of electric steel-making production]. *Metally = Metals*, 2013, no. 4, pp. 38–43.
2. **Nesmejanov A.N.** *Davlenie para himicheskikh jelementov* [Vapor pressure of chemical elements]. Moscow, Izdatel'stvo AN SSSR Publ., 1961. 396 p.
3. **Turkdogan E.T.** *Fizicheskaja himija vysokotemperaturnyh processov* [Physical chemistry of high-temperature processes]. Moscow, Metallurgija Publ., 1985. 344 p.
4. **Mogutnov B.M., Tomilin I.A.** *Termodinamika zhelezouglerodistyh splavov* [Thermodynamics of iron-carbon alloys]. Moscow, Metalurgija Publ., 1972. 249 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-114-123>
УДК 621.7.014

Поступила 12.01.2021
Received 12.01.2021

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МАТЕРИАЛОМ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПОРОШКОВ И ВОЛОКОН

Ю. Д. ЧЕРНИЧЕНКО, М. Н. ВЕРЕЩАГИН, С. Н. ЦЕЛУЕВА, УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», г. Гомель, Беларусь, пр. Октября, 48. E-mail: tselueva@gmail.com, М. Ю. ЦЕЛУЕВ, ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси», г. Гомель, Беларусь, ул. Кирова, 32а

Воздействие лазерного излучения на твердое тело приводит к изменению температурного поля обрабатываемого вещества. Характер нагрева, определяющийся скоростями изменения температуры, температурных градиентов, оказывается различным в зависимости от свойств обрабатываемого материала и условий обработки.

Основными физическими параметрами процесса лазерной обработки твердых тел являются удельная мощность поглощенного лазерного потока 10^4 – 10^9 Вт/см² и время взаимодействия металла с лучом 10^{-5} – 10^{-8} с. При взаимодействии подобных импульсов излучения с поверхностью происходит мгновенное взрывоподобное плавление части материала и перевод окружающего поверхность вещества в плазменное состояние. Последующее расширение плазмы сопровождается возникновением ударной волны с пиковым давлением 1–10 ГПа, которая действует на материал, и имеет место диспергирование металла.

Решена математическая задача нагрева и плавления цилиндрической пластины нормально падающим на ее поверхность световым потоком лазерного излучения, описываемая системой уравнений теплопроводности в трех сечениях нагреваемой пластины, которые характеризуются временным фактором воздействия лазерного излучения на вещество: 1) $0 \leq t \leq t_m$; 2) $t > t_m$; 3) $t_m < t \leq t_h$ (здесь t_m , t_h – момент времени, соответствующий началу образования жидкой фазы и завершению плавления пластины).

Представлены расчетные зависимости изменения температуры поверхности металлических сплавов X18H10T, X15H60 в течение воздействия импульса излучения лазера длительностью $\tau=5$ мс. Наличие фазового перехода, связанного с плавлением металла (перегиб на кривых), ведет к временному снижению скорости роста температуры. Распределение температурных полей показывает значительную неоднородность в распределении температуры по толщине материалов, которая достигает 2000 °С и более в зависимости от толщины металла и условий воздействия. Температурные кривые нагрева поверхности повторяют форму импульса, а температура остального металла имеет нелинейную тенденцию к повышению с выходом на асимптоту.

Установлено, что процесс взрывного распыления металла требует прогрева объема материала выше температуры плавления при толщине 300–350 мкм и энергии воздействия 7–8 Дж. Снижение уровня энергетического воздействия до 5–6 Дж и увеличение толщины заготовки более 500 мкм не обеспечивают требуемого для реализации процесса распыления распределения температурных полей.

Ключевые слова. Лазерное излучение, лазерная поверхностная обработка, температурное поле, уравнение теплопроводности, граничные условия, импульс излучения лазера, удельная плотность мощности, температура плавления, интегральное преобразование Лапласа, интегральное преобразование Ханкеля.

Для цитирования. Черниченко, Ю. Д. Взаимодействие лазерного излучения с материалом при получении порошков и волокон / Ю. Д. Черниченко, М. Н. Верещагин, С. Н. Целуева, М. Ю. Целуев // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 114–123. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-114-123>.

INTERACTION OF LASER RADIATION WITH THE MATERIAL DURING PRODUCTION POWDERS AND FIBERS

Y. D. CHERNICHENKO, M. N. VERESCHAGIN, S. N. TSELUEVA, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj, Gomel, Belarus, 48, Ochyabrya ave. E-mail: tselueva@gmail.com, M. Yu. TSELUEV, V. A. Belyi Metal-polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus, 32a, Kirova str.

The effect of laser radiation on a solid body leads to a change in the temperature field of the processed substance. The nature of heating, which is determined by the rate of change in temperature and temperature gradients, is different depending on the properties of the processed material and processing conditions.

The main physical parameters of the process of laser processing of solids are the specific power of the absorbed laser stream 10^4 – 10^9 W/cm² and the interaction time of the metal with the beam – 10^{-5} – 10^{-8} s. When such radiation pulses interact with the

surface, an instantaneous explosive melting of a part of the material occurs and the substance surrounding the surface is transferred to the plasma state. The subsequent expansion of the plasma is accompanied by the appearance of a shock wave with a peak pressure of 1–10 GPa, which acts on the material, and the metal is dispersed.

The mathematical problem of heating and melting a cylindrical plate with a laser light flux that normally affects its surface is solved. This problem is described by a system of thermal conductivity equations in three sections of the heated plate, which are characterized by the time factor of the laser radiation effect on the substance 1) $0 \leq t \leq t_m$; 2) $t > t_m$; 3) $t_m < t \leq t_h$ (here t_m , t_h is the time moment corresponding to the beginning of the formation of the liquid phase and the end of the melting of the plate, respectively).

The calculated dependences of changes in the surface temperature of metal alloys X18N10T, X15N60 during the action of a laser radiation pulse with a duration of $\tau=5$ ms are presented. The presence of a phase transition associated with metal melting (an inflection in the curves) leads to a temporary decrease in the rate of temperature growth. The distribution of temperature fields causes a significant heterogeneity in the distribution of temperature over the thickness of materials, which reaches 2000 °C or more depending on the thickness of the metal and the conditions of exposure. The temperature curves of the surface heating repeat the shape of the pulse, and the temperature of the rest of the metal has a nonlinear tendency to increase with the output to the asymptote.

It is established that the process of explosive metal sputtering requires heating the volume of the material above the melting point at a thickness of 300–350 microns and an impact energy of 7–8 J. Reducing the level of energy impact to 5–6 J and increasing the thickness of the workpiece more than 500 microns does not provide the distribution of temperature fields required for the implementation of the spraying process.

Keywords. Laser radiation, laser surface treatment, temperature field, thermal conductivity equation, boundary conditions, laser radiation pulse, specific power density, melting point, Laplace integral transform, Hankel integral transform.

For citation. Chernichenko Y.D., Vereschagin M.N., Tselueva S.N., Tseluev M. Yu. Interaction of laser radiation with the material during production powders and fibers. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 1, pp. 115-123. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-115-123>.

Одним из перспективных направлений лазерной технологии является лазерная обработка металлов и сплавов, которая включает ряд технологических процессов: закалку, легирование и наплавку, ударно-импульсную обработку, аморфизацию поверхности и др. [1–3]. Перспективность данных технологий обусловлена возможностью создания новых структур с улучшенными физико-химическими, механическими и эксплуатационными свойствами. Улучшение эксплуатационных свойств материалов связано с изменением структуры, фазового и химического составов слоев. Взаимодействие лазерного излучения с твердым телом обеспечивает возможность получения метастабильных структур, которые недостижимы, или трудно достижимы, традиционными методами обработки. Неравновесная структура образуется вследствие воздействия лазерного луча с высокой плотностью энергии с металлом за короткий промежуток времени. Такое воздействие позволяет фиксировать высокие скорости охлаждения расплава, порядка 10^5 – 10^6 °C/с. Импульсное плавление малых объемов металла обеспечивает получение однородных жидкостей (расплавов), которые после кристаллизации могут фиксировать структуру жидкостей или аморфное состояние с уникальными свойствами. Основными физическими параметрами процесса лазерной обработки твердых тел являются удельная плотность мощности поглощенного лазерного потока (10^4 – 10^9 Вт/см²) и время взаимодействия металла с лучом (10^{-5} – 10^{-8} с) [1]. При взаимодействии подобных импульсов излучения с поверхностью происходит мгновенное взрывоподобное испарение части материала и перевод окружающего поверхность вещества в плазменное состояние. Последующее расширение плазмы сопровождается возникновением ударной волны с пиковым давлением 1–10 ГПа, которая действует на материал. Следствием распространения ударных волн в кристаллическом веществе является образование различного рода структурных дефектов, что, в свою очередь, приводит к изменению свойств материала.

Цель данной работы – исследование процесса взаимодействия лазерного излучения с материалом при получении порошков и волокон.

Рассмотрим однородную цилиндрическую пластину радиусом ρ_0 и толщиной h , имеющую начальную температуру T_0 . С момента времени $t=0$ поверхность пластины ($z=0$, $0 \leq \rho \leq \rho_0$) облучается нормально падающим световым потоком монохроматического импульсного лазерного излучения (рис. 1).

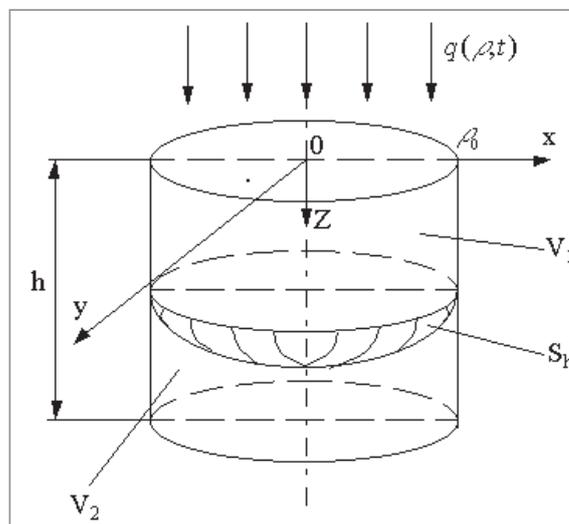


Рис. 1. Схема процесса нагрева и плавления материала

При нормальном падении лазерного излучения на поверхность цилиндрической пластины световой поток частично отражается от поверхности ($z=0, 0 \leq \rho \leq \rho_0$), а частично проникает внутрь материала, поглощаясь в нем. Будем предполагать, что распределение плотности поглощенного светового потока в сечении $z = \text{const}$ и изменение его во времени подчиняется закону Бугера-Ламберта [4]:

$$Q(\rho, z, t) = Aq(\rho, t) \exp \left\{ - \int_0^z \alpha(z') dz' \right\}, \quad (1)$$

где $A=1-R$ – поглощательная способность материала;

R – усредненный коэффициент отражения материала при нормальном падении излучения;

$\alpha(z)$ – коэффициент поглощения света в среде (для металлов $\alpha(z) = \alpha = \text{const}$).

Функция $q(\rho, t) = q(\rho)p(t)$ описывает пространственно-временное распределение плотности мощности светового потока в поперечном сечении лазерного луча. Будем считать, что пространственное распределение плотности мощности лазерного излучения описывается гауссовским законом распределения [5]:

$$q(\rho) = q_0 \exp(-k\rho^2), \quad \rho \geq 0, \quad (2)$$

где q_0 – плотность мощности светового потока на оси лазерного луча;

k – коэффициент сосредоточенности, см^{-2} , определяющий степень «остроты» источника.

Описание временной структуры квазистационарного монохроматического импульсного лазерного излучения, создаваемого оптическим квантовым генератором (ОКГ), выберем в виде (рис. 2):

$$p(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \Theta(t - \tau_i) - \Theta(t - \tau_i - \tau_i) \right\} \sin \left(\frac{\pi}{\tau_i} (t - \tau_i) \right), \quad (3)$$

$$\tau_i = i\tau_{ip}, \tau_{ip} = \tau_i + \tau_p,$$

где τ_i – длительность импульса лазерного излучения;

τ_p – длительность паузы между двумя последовательными импульсами лазера;

$$\Theta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

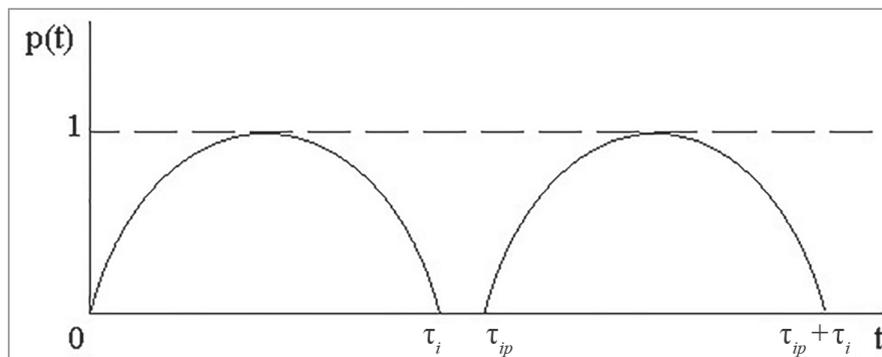


Рис. 2. Временная структура излучения

Будем предполагать, что за время нагрева и плавления пластины теплообмен между поверхностью пластины и окружающей ее средой (воздухом) подчиняется закону Ньютона. Потерями тепла с поверхности пластины за счет лучеиспускания по закону Стефана-Больцмана и за счет абляции можно пренебречь. Вся энергия лазерного излучения идет на нагрев и плавление материала пластины. Учитывая сделанные предположения, математическая модель нагрева и плавления цилиндрической пластины радиусом ρ_0 и толщиной h (см. рис. 1) нормально падающим на ее поверхность ($z=0$) световым потоком лазерного излучения (1) описывается системой уравнений теплопроводности (задача Стефана [6, 7]):

$$C_2 \gamma_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_2 \Delta T_2 + \alpha_2 A_2 q(\rho) p_2(t)^{-\alpha_2 z}, \quad (\rho, z) \in V_1 + V_2, \quad 0 < t < t_m, \quad (5)$$

$$C_1 \gamma_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \Delta T_1 + \alpha_1 A_1 q(\rho) p_1(t) e^{-\alpha_1 z}, \quad (\rho, z) \in V_1, \quad t > t_m, \quad (6)$$

$$C_2 \gamma_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \Delta T_2, \quad (\rho, z) \in V_2, \quad t_m < t < t_h \quad (7)$$

с граничными условиями:

$$\left. \frac{\partial T_2}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial T_2}{\partial z} \right|_{z=h} = 0, \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial T_2}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} = 0, \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial T_1}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial T_1}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} = 0, \quad (12)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=h} = 0, \quad (13)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} = 0. \quad (14)$$

На границе раздела фаз S_t с момента времени $t \geq t_m$ выполняются дополнительные условия [6]:

$$T_1 = T = T_m \text{ при } (\rho, z) \in S_t, t_m \leq t \leq t_h, \quad (15)$$

$$(\lambda_2 \text{grad} T - \lambda_1 \text{grad} T_1) \text{grad} F + L_m \gamma_1 \frac{\partial F}{\partial t} = 0 \quad (16)$$

при $(\rho, z) \in S_t, t_m \leq t \leq t_h$.

Начальные условия при $t=0$ и $t=t_m$:

$$T_2(\rho, z, 0) = T_0, \quad (17)$$

$$T(\rho, z, t_m) = T_2(\rho, z, t_m). \quad (18)$$

В выражениях (5)–(18) приняты следующие обозначения:

V_1, V_2 – области жидкой и твердой фаз соответственно;

$C_1 \gamma_1, C_2 \gamma_2$ – коэффициенты объемной удельной теплоемкости жидкой и твердой фаз;

λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности жидкой и твердой фаз;

L_m – удельная теплота плавления материала;

α_1, α_2 и A_1, A_2 – коэффициенты поглощения света и поглощательная способность жидкой и твердой фаз материала пластины;

$F(\rho, z, t)=0$ – уравнение границы S_t раздела фаз;

t_m – момент времени, соответствующий началу образования жидкой фазы;

t_h – момент времени, соответствующий завершению плавления пластины;

T_m – температура плавления материала пластины.

Функции $p_i(t)$ ($i=1, 2$) определяются через функции (3):

$$p_1(t) = p(t) \Theta(t - t_m),$$

$$p_2(t) = p(t) [\Theta(t) - \Theta(t - t_m)].$$

При формировании математической модели предполагалось, что теплофизические свойства материала соответствующих областей постоянны, т.е. коэффициенты $C_i, \gamma_i, \lambda_i, \alpha_i, A_i$ ($i=1, 2$) – постоянны. С учетом сказанного решение системы уравнений (5)–(7) с граничными (8)–(16) и начальными (17)–(18) условиями распадается на следующие три задачи:

А. Решение уравнения теплопроводности (5) с граничными условиями (8), (9), а также начальным условием (17) в области $V_1+V_2, 0 \leq t \leq t_m$, а также определение времени t_m .

В. Решение уравнения теплопроводности (6) с граничными условиями (10), (11) в области $V_1, t > t_m$.

С. Решение уравнения теплопроводности (7) с граничными условиями (13), (14) и начальным условием (18) в области $V_2, t_m \leq t \leq t_h$ с использованием решения А.

Дополнительные условия (15) и (16) необходимы для определения границы раздела фаз S_i .

Поскольку при радиусе пятна нагрева $r_0 \geq \rho_0$ выполняется условие

$$r_0 \gg \sqrt{a_j \tau_i}, \quad j=1,2,$$

в задачах А–С можно полагать $\rho_0 = \infty$. Кроме того, длительность импульса лазера τ_i существенно больше длительности паузы τ_p : $\tau_i \gg \tau_p$. Поэтому выражение (3) при $\tau_p = 0$ можно представить в виде:

$$p(t) = \frac{1}{2}(1 - \cos \omega t), \quad \omega = \frac{2\pi}{\tau_i}. \quad (19)$$

Решение задач А, В, С ищем в цилиндрической системе координат (ρ, φ, z) :

$$\begin{aligned} T_2(\rho, z, t) &= T_0 + U_2(\rho, z, t), \\ T_1(\rho, z, t) &= T_m + U_1(\rho, z, t), \\ T(\rho, z, t) &= T_m + U(\rho, z, t). \end{aligned} \quad (20)$$

Учитывая сказанное выше, вместо уравнений (5)–(7) с краевыми и начальными условиями (8)–(18) имеем следующие задачи:

Задача А:

$$\frac{1}{a_2} \frac{\partial U_2}{\partial t} = \Delta_\rho U_2 + \frac{\partial^2 U_2}{\partial z^2} + \frac{\alpha_2 A_2}{\lambda_2} q(\rho) p_2(t) e^{-\alpha_2 z}, \quad (\rho, z) \in V_1 + V_2, 0 < t \leq t_m, \quad (21)$$

$$\left. \frac{\partial U_2}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial U_2}{\partial z} \right|_{z=h} = 0, \quad (22)$$

$$\left. \frac{\partial U_2}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} = 0, \quad (23)$$

$$U_2|_{\rho=0} < \infty, \quad (24)$$

$$U_2|_{t=0} = 0. \quad (25)$$

Задача В:

$$\frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial U_1}{\partial t} = \Delta_\rho U_1 + \frac{\partial^2 U_1}{\partial z^2} + \frac{\alpha_1 A_1}{\lambda_1} q(\rho) p_1(t) e^{-\alpha_1 z}, \quad (\rho, z) \in V_1(t), t > t_m, \quad (26)$$

$$\left. \frac{\partial U_1}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad (27)$$

$$\left. \frac{\partial U_1}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} = 0, \quad (28)$$

$$U_1|_{\rho=0} < \infty. \quad (29)$$

Задача С:

$$\frac{1}{a_2} \frac{\partial U}{\partial t} = \Delta_\rho U + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}, \quad (\rho, z) \in V(t), t_m < t < t_h, \quad (30)$$

$$\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{z=h} = 0, \quad (31)$$

$$\left. \frac{\partial U}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} = 0, \quad (32)$$

$$U|_{\rho=0} < \infty, \quad (33)$$

$$U = U_0 = U_2 + T_0 - T_m \quad \text{при } t = t_m. \quad (34)$$

К задачам В и С необходимо присоединить дополнительные условия, которые в принятых обозначениях имеют следующий вид:

$$U_1=U=0 \text{ при } (\rho, z) \in S_t, t_m \leq t \leq t_h, \tag{35}$$

$$(\lambda_2 \text{grad}U - \lambda_1 \text{grad}U_1) \text{grad}F + L_m \gamma_m \frac{\partial F}{\partial t} = 0$$

при $(\rho, z) \in S_t, t_m \leq t \leq t_h$.

Здесь введены следующие обозначения:

$$a_j = \frac{c_j \gamma_j}{\lambda_j} - \text{коэффициент теплопроводности } (j=1, 2);$$

$$\Delta \rho = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) - \text{радиальная часть оператора Лапласа в цилиндрической системе координат.}$$

Для решения задачи А применяются интегральное преобразование Лапласа по переменной t :

$$\tilde{U}(\rho, z, s) = \int_0^\infty dt e^{-st} U(\rho, z, t), \tag{36}$$

интегральное преобразование Ханкеля по переменной $\rho (0 \leq \rho < \infty)$:

$$V(r) = \int_0^\infty d\rho \sqrt{r\rho} J_0(r\rho) \tilde{\mathcal{G}}(\rho, z, s), \tag{37}$$

$$\tilde{\mathcal{G}}(\rho, z, s) = \sqrt{\rho} \tilde{U}(\rho, z, s),$$

где $J_0(r\rho)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка, а также обратные интегральные преобразования Ханкеля:

$$\tilde{\mathcal{G}}(\rho, z, s) = \sqrt{\rho} \tilde{U}(\rho, z, s) = \int_0^\infty dr \sqrt{r\rho} J_0(r\rho) V(r, z, s) \tag{38}$$

и Лапласа

$$U(\rho, z, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{x_0-i\infty}^{x_0+i\infty} ds e^{st} \tilde{U}(\rho, z, s), \quad x_0 > \text{Re } s. \tag{39}$$

Решение уравнения теплопроводности (21) с граничными и начальными условиями (22)–(25) с учетом интегрального преобразования Лапласа (36), интегрального преобразования Ханкеля (37), а также обратных интегральных преобразований Ханкеля (38) и Лапласа (39) принимает следующий вид (решение задачи А):

$$U_2(\rho, z, t) = \frac{\alpha_2^2 q_2}{2\pi} e^{-\alpha_2^2 h} \frac{\partial}{\partial z} \int_0^{t'} d\sigma \frac{e^{\frac{\alpha_2^2 \sigma - \rho^2}{4(\sigma+\eta)}}}{\sigma + \eta} \sin^2 \left[\frac{\omega_2}{2} (t' - \sigma) \right] \times$$

$$\times \int_{t'-\sigma}^{t'} d\tau' \frac{e^{-\alpha_2^2 (t'-\tau') - (h^2+z^2)/4(t'-\tau')}}{\sqrt{(t'-\tau')}} \text{sh} \left[\frac{hz}{2(t'-\tau')} \right] \int_0^{\sigma+\tau'-t'} d\tau'' \frac{e^{-\alpha_2^2 \tau''}}{\sqrt{\tau''}} \left(1 + \Theta_0 \left(0, e^{\frac{h^2}{\tau''}} \right) \right) -$$

$$- \frac{\alpha_2^2 q_2}{2\sqrt{\pi}} \int_0^{t'} d\sigma \frac{e^{\frac{\alpha_2^2 \sigma - \rho^2}{4(\sigma+\eta)}}}{\sigma + \eta} \sin^2 \left[\frac{\omega_2}{2} (t' - \sigma) \right] \int_0^\sigma d\tau' \frac{e^{-\alpha_2^2 \tau' - \frac{z^2}{4\tau'}}}{\sqrt{\tau'}} +$$

$$+ \frac{\alpha_2 q_2}{2} e^{-\alpha_2 z} \int_0^{t'} d\sigma \frac{e^{\frac{\alpha_2^2 \sigma - \rho^2}{4(\sigma+\eta)}}}{\sigma + \eta} \sin^2 \left[\frac{\omega_2}{2} (t' - \sigma) \right],$$

где Θ_0 – эллиптическая тэта-функция.

Для решения задачи В применим преобразование Лапласа (36) к соотношениям (26)–(29), проведя в них преобразование новой переменной $\tau : \tau = t - t_m \geq 0$. При этом функция $p_1(t)$ переходит в функцию $p_1(\tau) = \Theta(\tau) p(\tau + t_m)$, $\tau \geq 0$. При решении задачи используются также обратные интегральные преобразования Ханкеля (38) и Лапласа (39).

Окончательно решение задачи В записывается в виде:

$$\begin{aligned}
U_1(\rho, z, t) = & \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\partial}{\partial z} \int_0^{\tau_1} d\tau' e^{\frac{-(h^2+z^2)}{4(\tau_1-\tau')}} \operatorname{sh} \left[\frac{hz}{2(\tau_1-\tau')} \right] C_1(\rho, \tau_1, \tau') + \\
& + \frac{\alpha_1 q_1}{2} e^{-\alpha_1^2 \eta - \alpha_1 z} \int_{\eta}^{\tau_1 + \eta} d\tau'' e^{\frac{\alpha_1^2 \tau'' - \rho^2}{4\tau''}} \sin^2 \left[\frac{\omega_1}{2} (\tau_1 - \tau'' + t'_m + \eta) \right] - \frac{\alpha_1^2 q_1 e^{-\alpha_1^2 \eta}}{2\sqrt{\pi}} \times \\
& \times \int_{\eta}^{\tau_1 + \eta} d\tau'' e^{\frac{\alpha_1^2 \tau'' - \rho^2}{4\tau''}} \sin^2 \left[\frac{\omega_1}{2} (\tau_1 - \tau'' + t'_m + \eta) \right] \int_0^{\tau'' - \eta} d\tau' e^{\frac{-\alpha_1^2 \tau' - z^2}{4\tau'}}.
\end{aligned} \quad (41)$$

Переходим к решению задачи С. Для этого применяем преобразования Лапласа (36) к соотношениям (30)–(34), проводя в них также преобразование к новой переменной $\tau : \tau = t - t_m \geq 0$. В результате приходим к следующему уравнению с граничными и начальными условиями:

$$\Delta \rho \tilde{U} + \frac{d^2 \tilde{U}}{dz^2} - \frac{s}{a_2} \tilde{U} = -\frac{U_0}{a_2}, \quad (42)$$

$$\left. \frac{\partial \tilde{U}}{\partial z} \right|_{z=h} = 0, \quad (43)$$

$$\left. \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \rho} \right|_{\rho=\infty} = 0, \quad \tilde{U} \Big|_{\rho=0} < \infty. \quad (44)$$

Для решения уравнения (42) с граничными условиями (43) и (44) будем предполагать, что к моменту времени $\tau=0$ ($t=t_m$) температура T_2 достигает значения T_m (задача А) и только после этого происходит плавление (задачи В и С). Из такой модели нагрева и плавления следует, что в начальном условии (34) $U_0=0$. Вводя функцию (37) и применяя интегральное преобразование Ханкеля (37) к уравнению (42), считая $U_0=0$, и граничному условию (43), приходим к следующей задаче:

$$\frac{\partial^2 V(r, z, s)}{\partial z^2} - \left(r^2 + \frac{s}{a_2} \right) V(r, z, s) = 0, \quad (45)$$

$$\left. \frac{\partial V}{\partial z} \right|_{z=h} = 0. \quad (46)$$

Решение соотношений (45), (46) представим в виде:

$$V(r, z, s) = \tilde{A}(r, s) \left[e^{-z\sqrt{(s+a_2 r^2)/a_2}} + e^{-(z-2h)\sqrt{(s+a_2 r^2)/a_2}} \right]. \quad (47)$$

Применяя обратные преобразования Ханкеля (38) и Лапласа (39), решение задачи С запишем в виде:

$$U(\rho, z, t) = T(\rho, z, t) - T_m = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\partial}{\partial z} \int_0^{\tau_2} d\tau' e^{\frac{-h^2+(h-z)^2}{4(\tau_2-\tau')}} \operatorname{sh} \left[\frac{h(h-z)}{2(\tau_2-\tau')} \right] C(\rho, \tau_2, \tau'), \quad \tau_2 = a_2 \tau, \quad \tau = t - t_m, \quad (48)$$

где

$$C(\rho, \tau_2, \tau') = \int_0^{\infty} dr \sqrt{r} J_0(\rho r) A(r, \tau') e^{-r^2(\tau_2-\tau')}; \quad (49)$$

$$A(r, \tau) = \frac{1}{2\pi i} \int_{x_0-i\infty}^{x_0+i\infty} ds e^{s\tau} \tilde{A}(r, s). \quad (50)$$

Для определения коэффициентных функций $C_1(\rho, \tau_1, \tau')$, $C(\rho, \tau_2, \tau')$ и уравнения границы плавления S_t необходимо использовать дополнительные условия (35). Подстановка в условия (35) решений (41) и (48) дает следующие выражения:

$$\frac{\partial}{\partial z} \int_0^{\tau_2} d\tau' e^{\frac{-h^2+(h-z)^2}{4(\tau_2-\tau')}} \operatorname{sh} \left[\frac{h(h-z)}{2(\tau_2-\tau')} \right] C(\rho, \tau_2, \tau') = 0, \quad (51)$$

$$\begin{aligned} & \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\partial}{\partial z} \int_0^{\tau_1} d\tau' \frac{e^{-\frac{h^2+z^2}{4(\tau_1-\tau')}}}{\sqrt{\tau_1-\tau'}} \operatorname{sh}(\rho, \tau_1, \tau') + \frac{\alpha_1 q_1}{2} e^{-\alpha_1^2 \eta - \alpha_1 z} \times \\ & \times \int_{\eta}^{\tau_{1+\eta}} d\tau'' \frac{e^{\frac{\alpha_1^2 \tau'' - \rho^2}{4\tau''}}}{\tau''} \sin^2 \left[\frac{\omega_1}{2} (\tau_1 - \tau'' + t'_m + \eta) \right] \int_{\eta}^{\tau_{1-\eta}} d\tau' \frac{e^{-\frac{\alpha_1^2 \tau' - z^2}{4\tau'}}}{\sqrt{\tau'}} = 0, \end{aligned} \quad (52)$$

которые должны выполняться по границе раздела фаз, задаваемой уравнением $z=f(\rho, \tau)$, для любого момента времени τ . Отсюда следует, что

$$C_1(\rho, \tau_1, \tau') \equiv 0, \quad C(\rho, \tau_2, \tau') \equiv 0. \quad (53)$$

Тогда условие (52) можно представить в виде:

$$e^{\alpha_1 z} \int_0^1 dx \frac{e^{\frac{\alpha_1^2 \tau_1 x - \rho^2}{4(\tau_1 x + \eta)}}}{\tau_1 x + \eta} = \frac{\alpha_1 \sqrt{\tau_1}}{\sqrt{\pi}} \int_0^1 dx \frac{e^{\frac{\alpha_1^2 \tau_1 x - \rho^2}{4(\tau_1 x + \eta)}}}{\tau_1 x + \eta} \int_0^1 dy \frac{e^{-\frac{\alpha_1^2 \tau_1 xy - z^2}{4\tau_1 xy}}}{\sqrt{y}} \quad (54)$$

при $z = f(\rho, \tau)$.

Подстановка в условия (35) решений (41), (48) и (53) приводит к условию:

$$\begin{aligned} & \frac{\rho \alpha_1 \lambda_1 q_1 \tau_1}{4} \frac{\partial f}{\partial \rho} \left\{ e^{-\alpha_1 z} \int_0^1 dx \frac{e^{\frac{\alpha_1^2 \tau_1 x - \rho^2}{4(\tau_1 x + \eta)}}}{(\tau_1 x + \eta)^2} - \frac{\alpha_1 \sqrt{\tau_1}}{2\sqrt{\pi}} \int_0^1 dx \sqrt{x} \frac{e^{\frac{\alpha_1^2 \tau_1 x - \rho^2}{4(\tau_1 x + \eta)}}}{(\tau_1 x + \eta)^2} \times \right. \\ & \left. \times \int_0^1 dy \frac{e^{-\frac{\alpha_1^2 \tau_1 xy - z^2}{4\tau_1 xy}}}{\sqrt{y}} \right\} - \frac{\alpha_1 \sqrt{\tau_1}}{2\sqrt{\pi}} \int_0^1 dx \sqrt{x} \frac{e^{\frac{\alpha_1^2 \tau_1 x - \rho^2}{4(\tau_1 x + \eta)}}}{(\tau_1 x + \eta)^2} \int_0^1 dy \frac{e^{-\frac{\alpha_1^2 \tau_1 xy - z^2}{4\tau_1 xy}}}{\sqrt{y}} \left\{ - \frac{\alpha_1 \lambda_1 q_1 \tau_1}{2} \times \right. \\ & \left. \times \left\{ e^{\alpha_1 z} \int_0^1 dx \frac{e^{\frac{\alpha_1^2 \tau_1 x - \rho^2}{4(\tau_1 x + \eta)}}}{(\tau_1 x + \eta)} - \frac{z}{2\sqrt{\pi \tau_1}} \int_0^1 dx \frac{e^{\frac{\alpha_1^2 \tau_1 x - \rho^2}{4(\tau_1 x + \eta)}}}{\sqrt{x} (\tau_1 x + \eta)} \int_0^1 dy \frac{e^{-\frac{\alpha_1^2 \tau_1 xy - z^2}{4\tau_1 xy}}}{\sqrt{y}} \right\} + L_m \gamma_1 \frac{\partial f}{\partial \tau} = 0, \end{aligned} \quad (55)$$

которое должно выполняться на границе раздела фаз и служит вместе с условием (54) для определения уравнения этой границы $z = f(\rho, \tau)$.

Учитывая условия (53), решение задач В и С принимает вид:

$$U(\rho, z, t) = T(\rho, z, t) - T_m = 0, \quad (\rho, z) \in V_2; \quad (56)$$

$$\begin{aligned} U_1(\rho, z, t) = T_1(\rho, z, t) - T_m = & \frac{\alpha_1 q_1 e^{-\alpha_1^2 \eta - \alpha_1 z}}{2} \int_{\eta}^{\tau_{1+\eta}} d\tau'' \frac{e^{\frac{\alpha_1^2 \tau'' - \rho^2}{4\tau''}}}{\tau''} \sin^2 \left[\frac{\omega_1}{2} (\tau_1 - \tau'' + \eta) \right] - \\ & - \frac{\alpha_1^2 q_1 e^{-\alpha_1^2 \eta}}{2\sqrt{\pi}} \int_{\eta}^{\tau_{1+\eta}} d\tau'' \frac{e^{\frac{\alpha_1^2 \tau'' - \rho^2}{4\tau''}}}{\tau''} \sin^2 \left[\frac{\omega_1}{2} (\tau_1 - \tau'' + \eta) \right] \int_0^{\tau''-\eta} d\tau' \frac{e^{-\frac{\alpha_1^2 \tau' - z^2}{4\tau'}}}{\sqrt{\tau'}}, \quad (\rho, z) \in V_1. \end{aligned} \quad (57)$$

Одним из основных результатов воздействия лазерного излучения на металлические материалы является изменение температурного поля в объеме вещества. Процесс нагрева материала, характеризующийся достигаемыми температурами, температурными градиентами, скоростью нагрева, наличием структурных и фазовых переходов, зависит от оптических и теплофизических свойств материала и энергетических условий воздействия излучения. Фазовые переходы при нагреве металлов сопровождаются поглощением значительного количества скрытой теплоты, учет влияния которой на развитие температурных полей в веществе возможен при решении соответствующей задачи Стефана.

На рис. 3, 4 представлены расчетные зависимости изменения температуры поверхности металлических сплавов (X18N10T и X15N60) в течение воздействия импульса излучения лазера длительностью $\tau=5$ мс. В расчетах использовали симметричную колонообразную (синусоида) временную форму импульса. Наличие фазового перехода, связанного с плавлением металла (перегиб на кривых), ведет к временному снижению скорости роста температуры, которая восстанавливается после полного расплавления заготовки. Ход температурных кривых при различных энергиях импульса и толщинах заготовки соответствует структуре импульса со сдвигом пика температуры на $\sim 1,5$ мс относительно пика выделения энергии излучения.

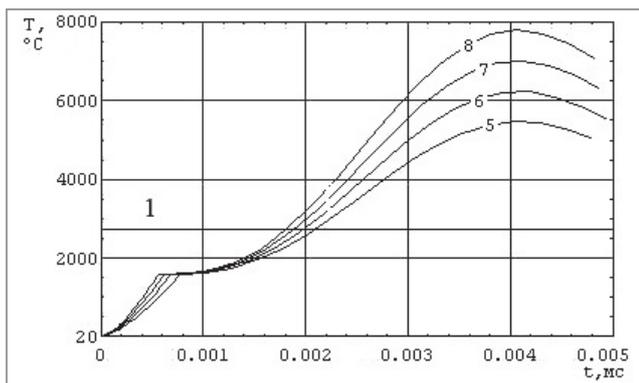


Рис. 3. Изменение температуры поверхности заготовки в течение длительности импульса излучения (материал – X18H10T; $h = 300$ мкм; 1 – температура кипения сплава; надписи на кривых соответствуют энергии в импульсе излучения, Дж)

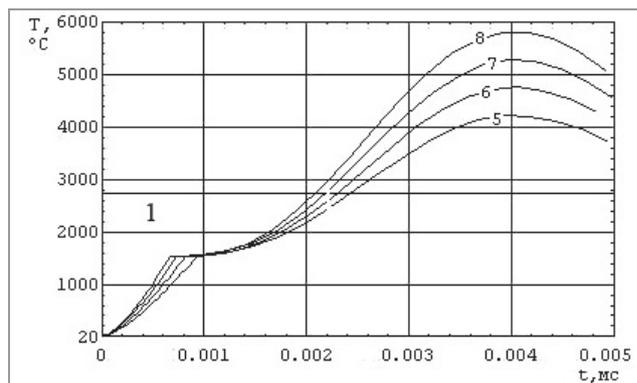


Рис. 4. Изменение температуры поверхности заготовки в течение длительности импульса излучения (материал – X15H60; $h = 300$ мкм; 1 – температура кипения сплава; надписи на кривых соответствуют энергии в импульсе излучения, Дж)

Распределение температурных полей в жидкой фазе сплавов X15H60 и X18H10T приведено на рис. 5–8. Графики показывают значительную неоднородность в распределении температуры по толщине материалов, которая достигает 2000 °C и более в зависимости от толщины металла и условий воздействия. Температурные кривые нагрева поверхности и околоповерхностных слоев повторяют форму импульса, температура остального объема металла имеет нелинейную тенденцию к повышению с выходом на асимптоту.

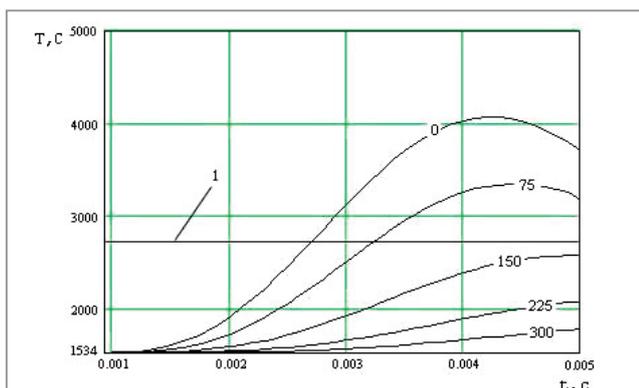


Рис. 5. Температурное поле в расплаве (X15H60) при толщине исходной заготовки $h=300$ мкм и энергии в импульсе излучения $E=5$ Дж (1 – температура кипения сплава; надписи на кривых соответствуют расстоянию (мкм), отсчитываемому от поверхности нагрева)

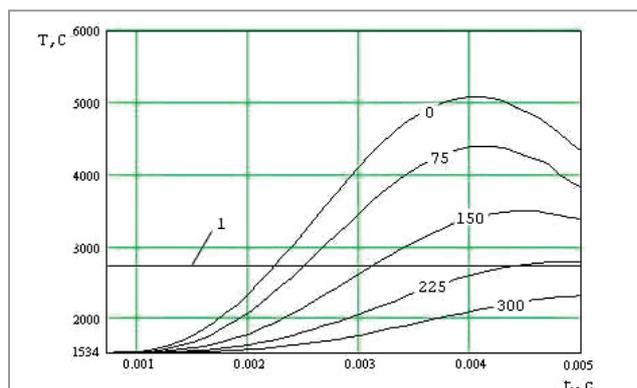


Рис. 6. Температурное поле в расплаве (X15H60) при толщине исходной заготовки $h=300$ мкм и энергии в импульсе излучения $E=7$ Дж (1 – температура кипения сплава; надписи на кривых соответствуют расстоянию (мкм), отсчитываемому от поверхности нагрева)

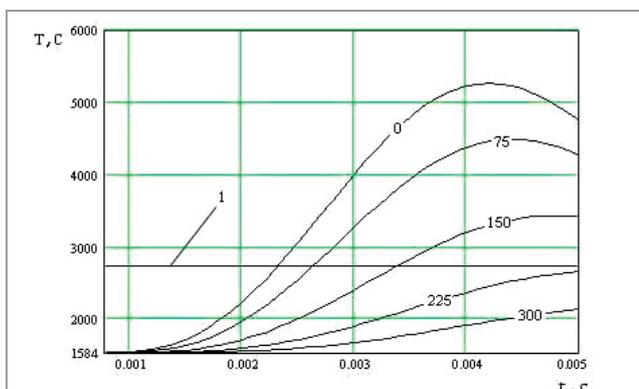


Рис. 7. Температурное поле в расплаве (X18H10T) при толщине исходной заготовки $h=300$ мкм и энергии в импульсе излучения $E=5$ Дж (1 – температура кипения сплава; надписи на кривых соответствуют расстоянию (мкм), отсчитываемому от поверхности нагрева)

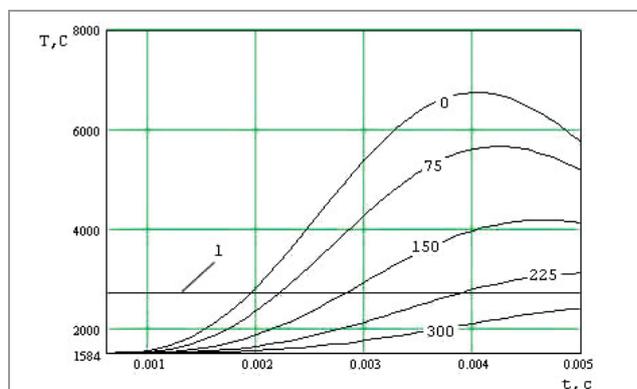


Рис. 8. Температурное поле в расплаве (X18H10T) при толщине исходной заготовки $h=300$ мкм и энергии в импульсе излучения $E=7$ Дж (1 – температура кипения сплава; надписи на кривых соответствуют расстоянию (мкм), отсчитываемому от поверхности нагрева)

Реализация процесса взрывного распыления металла требует прогрева объема материала выше температуры кипения. С этой точки зрения целесообразно использовать заготовки сплавов X18H10T и X15H60 толщиной 300–350 мкм при энергии воздействия 7–8 Дж, что обеспечивает прогрев выше точки кипения более 50% толщины заготовки (рис. 6, 8). Снижение уровня энергетического воздействия до 5–6 Дж и увеличение толщин заготовки более 500 мкм не обеспечивают требуемого для реализации процесса распыления распределения температурных полей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справ. / Н. Н. Рыкалкин [и др.]. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
2. **Леонтьев, П. А.** Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов / П. А. Леонтьев, Н. Г. Чеканова, М. Г. Хан. М.: Metallurgija, 1986. 142 с.
3. **Коваленко, В. С.** Обработка материалов импульсным излучением лазеров / В. С. Коваленко. Киев: Выща шк., 1977. 144 с.
4. **Соколов, А. В.** Оптические свойства металлов / А. В. Соколов. М.: Физмашгиз, 1961. 464 с.
5. **Бреховских, В. Ф.** Определение вида пространственного распределения мощности теплового источника при действии луча лазера на сталь / В. Ф. Бреховских, А. Н. Кокора, А. А. Углов // Физика и химия обработки материалов. 1967. № 6. С. 3–9.
6. **Рубинштейн, Л. И.** Проблема Стефана / Л. И. Рубинштейн. Рига: Звайгзне, 1967. 457 с.
7. **Гольдфарб, Э. М.** Теплотехника металлургических процессов / Э. М. Гольдфарб. М.: Metallurgija, 1967. 439 с.

REFERENCES

1. **Rykalkin N. N.** *Lazernaja i jelektronno-luchevaja obrabotka materialov* [Laser and electron-beam processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 496 p.
2. **Leont'ev P. A., Chekanova N. G., Han M. G.** *Lazernaja poverhnostnaja obrabotka metallov i splavov* [Laser surface treatment of metals and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1986, 142 p.
3. **Kovalenko V. S.** *Obrabotka materialov impul'snym izlucheniem lazerov* [Processing of materials by pulsed laser radiation]. Kiev, Vyshha shkola Publ., 1977, 144 p.
4. **Sokolov A. V.** *Opticheskie svojstva metallov* [Optical properties of metals]. Moscow, Fizmashgiz Publ., 1961, 464 p.
5. **Brehovskih V. F., Kokora A. N., Uglov A. A.** *Opređenje vida prostranstvennogo raspredelenija moshhnosti teplovogo istochnika pri dejstvii lucha lazera na stal'* [Determination of the type of spatial power distribution of a heat source under the action of a laser beam on steel]. *Fizika i himija obrabotki materialov = Physics and chemistry of materials processing*, 1967, no. 6, pp. 3–9.
6. **Rubinshtejn L. I.** *Problema Stefana* [Stefan's Problem]. Riga, Zvajgzne Publ., 1967, 457 p.
7. **Gol'dfarb Je. M.** *Teplotehnika metallurgicheskikh processov* [Heat engineering of metallurgical processes]. Moscow, Metallurgija Publ., 1967, 439 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-124-129>
УДК 621.762:620

Поступила 12.02.2021
Received 12.02.2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТЕРМОДИФФУЗИОННЫХ ЖАРСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА МЕДИ

В. М. КОНСТАНТИНОВ, В. Г. ДАШКЕВИЧ, И. В. ПЛЕТЕНЕВ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: vladimirdv@tut.by

В статье представлены данные об особенностях структуры и свойств жаростойких слоев, полученных термодиффузионным алитированием и силицированием меди (марка М1) в порошковых насыщающих средах. Исследован фазовый состав диффузионных слоев, в частности, установлено, что в результате алитирования формируется гетерогенная структура диффузионного слоя с участием алюминидов Cu_3Al и Cu_9Al_4 . Приведены данные по жаростойкости в условиях испытаний общей продолжительностью 25 ч и температуре 800 °С. Испытания показали, что лучшими защитными свойствами обладают алитированные диффузионные слои, которые характеризуются более высокой стойкостью против высокотемпературного окисления и циклических условий нагрева. По результатам анализа микроструктур до и после окисления отмечены особенности защитного действия и разрушения алитированного и силицированного диффузионных слоев. На алитированных образцах при испытаниях на жаростойкость происходит рост толщины слоя в глубь образца и постепенное перераспределение концентрации алюминия. Для силицированных диффузионных слоев отмечена потеря сплошности защитного слоя путем отслаивания участков (вспучивание) и появление очагов коррозии слоя при длительности испытаний более 15 ч.

Ключевые слова. Алитирование, силицирование, повышение жаростойкости меди, медные водоохлаждаемые холодильники стекольного производства.

Для цитирования. Константинов, В. М. Исследование особенностей структуры и свойств термодиффузионных жаростойких покрытий на меди / В. М. Константинов, В. Г. Дашкевич, И. В. Плетенев // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 124–129. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-124-129>.

STUDY OF STRUCTURE FEATURES AND PROPERTIES OF THERMODIFFUSION HEAT RESISTANT COATINGS ON COPPER

V. M. KONSTANTINOV, V. G. DASHKEVICH, I. V. PLETENEV, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: vladimirdv@tut.by

The article presents data on the features of the structure and properties of heat-resistant layers obtained by thermal diffusion aluminization and siliconization of copper (grade M1) in powder saturating media. The phase composition of the diffusion layers has been investigated, in particular, it has been established that, as a result of aluminization, a heterogeneous structure of the diffusion layer is formed with the participation of Cu_3Al and Cu_9Al_4 aluminides. The data on heat resistance under test conditions with a total duration of 25 hours and a temperature of 800 °C are given. Tests have shown that the best protective properties are possessed by aluminized diffusion layers, which are characterized by a higher sink rate against high-temperature oxidation and cyclic heating conditions. According to the results of the analysis of the microstructures before and after oxidation, the features of the protective action and destruction of the aluminized and silicified diffusion layers were noted. On aluminized specimens, during heat resistance tests, the layer thickness grows deep into the specimen and the aluminum concentration gradually redistributes. For siliconized diffusion layers, a loss of continuity of the protective layer by peeling off sections (swelling) and the appearance of focal of layer corrosion with a test duration of more than 15 h were noted.

Keywords. Aluminizing, siliconizing, increasing the heat resistance of copper, copper water-cooled refrigerators for glass production.

For citation. Konstantinov V.M., Dashkevich V.G., Pletenev I.V. Study of structure features and properties of thermofusion heat resistant coatings on copper. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 124–129. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-124-129>.

Введение

Медь и ее сплавы широко используются при изготовлении теплоотводящих элементов технологического оборудования (кристаллизаторы и фурмы металлургического производства, различные охлаждающие устройства химической отрасли, подфиллерные холодильники стекольного производства и др.),

которые эксплуатируются в условиях воздействия высоких температур и агрессивных сред в виде паров и веществ, вызывающих активную коррозию поверхности изделий. Обладая высокой теплопроводностью, медь имеет низкую жаростойкость и коррозионную стойкость в некоторых средах, в частности, быстро разрушается под действием серы и ее соединений [1].

Способов защиты меди и медных сплавов в настоящее время достаточно много, все они направлены на создание барьерного слоя на поверхности изделия. Из наиболее эффективных стоит выделить, во-первых, создание на поверхности защитного покрытия систем легирования Ni и Ni-P, Ni-B и др., как правило, электрохимическим способом. Гальванические покрытия Ni-P характеризуются достаточно высокой коррозионной стойкостью и износостойкостью, поскольку имеют твердость 6500–11 000 МПа. Покрытие получают толщиной 10–40 мкм, структура такого слоя состоит из пересыщенного твердого раствора фосфора в никеле (рис. 1, а). Однако, кроме характерной, очевидной дороговизны процесса, на изделиях сложной геометрической формы такие технологии реализуются с трудностями. Во-вторых, получение защитного покрытия газотермическим способом, напылением на поверхность материала с высокой стойкостью. Обычно в качестве напыляемых материалов используются никелевые порошки или порошки алюминия [2]. Для этого способа очевидна также сложность при напылении изделий, имеющих сложную форму, например, ламельные элементы водоохлаждаемого холодильника, расположенные близко друг к другу (рис. 1, б). В-третьих, одним из наиболее рациональных способов защиты от высокотемпературного окисления и коррозии меди является термодиффузионное насыщение элементами, образующими при окислении плотные, устойчивые оксидные слои [3, 4]. Это прежде всего такие элементы, как алюминий и кремний. Получаемый, например, Cu-Al диффузионный слой имеет твердость в 1,5–2,0 раза, износостойкость в 3,5–6,0 раз и жаростойкость в 4,0 раза выше по сравнению с медью [5].

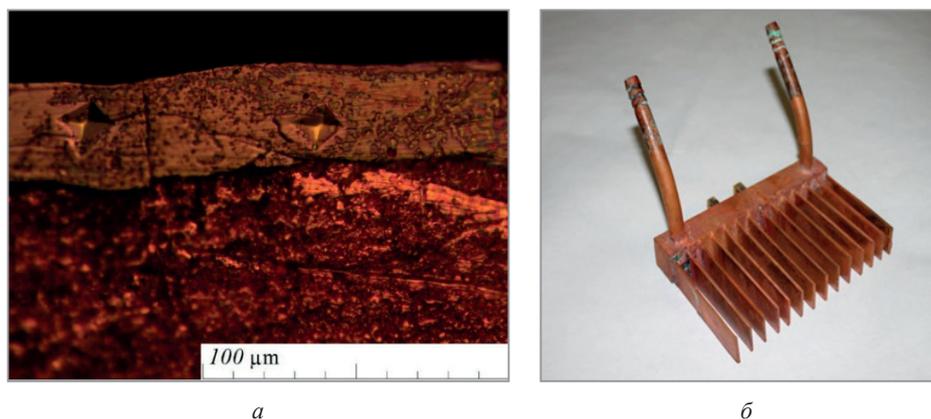


Рис. 1. Микроструктура медного элемента промышленного охладителя с гальваническим Ni-P покрытием (а) и внешний вид подфиллерного медного холодильника стекольного производства ламельной конструкции (б)

Целью настоящей работы является исследование особенностей структурообразования, фазового состава и свойств термодиффузионных слоев на меди и подтверждение эффективности применения обработки для повышения стойкости медных изделий.

Эффективность алитирования и силицирования для повышения жаростойкости была отмечена ранее в работах [4, 6–8 и др.], однако в каждом конкретном случае для определенной толщины и состава полученного диффузионного слоя определяются свои количественные характеристики стойкости, а также проявляются особенности механизма защитного действия и разрушения. С практической точки зрения особенно актуальна оценка стойкости таких защитных слоев в условиях циклических режимов нагрева и охлаждения, а также сопутствующего действия различных агрессивных сред, вызывающих активную коррозию поверхности изделий. Для применения в направлении, например, упрочнения подфиллерных медных холодильников стекольного производства упомянутых выше.

Отметим, что при нагревании на воздухе медь начинает заметно окисляться при температуре 400 °С и выше. Поэтому оценку показателя жаростойкости в литературе приводят в диапазоне 600–1000 °С, чаще 800 °С.

Материалы и методика исследований

Для термодиффузионного насыщения меди марки М1 ГОСТ 1173 применяли порошок алюминия. Для алитирования смесь была приготовлена на основе алюминия марки ПА-2 по ГОСТ 5494 с добавкой

инертного наполнителя (оксид алюминия Al_2O_3 , ГОСТ 3136), активатора (аммоний хлористый NH_4Cl , ГОСТ 2210) и продуктов реакции алюмотермического восстановления оксидов хрома и бора. Для силицирования в качестве активной составляющей смеси был выбран ферросилиций марки ФС-70 ГОСТ 1415-93. Термодиффузионное насыщение проводили при печном нагреве в герметичном контейнере с плавким затвором. Режим обработки: температура – 560 °С, время – 4 ч. Для проведения процесса использовали шахтную электрическую печь с селитовыми нагревателями.

Испытания на жаростойкость проводили в статических условиях при температуре 800 °С, на воздухе, в течение 25 ч, циклами по 3–6 ч каждый. Измерения жаростойкости проводили весовым методом, в окислительной атмосфере воздуха, который заключался в определении увеличения массы (привеса) образца в процессе испытаний, подвергающегося коррозии. Нагрев осуществляли в печи СНОЛ 1,6,2,5.1/11-И2. Фазовый анализ выполняли на рентгеновском дифрактометре «Ultima IV» фирмы Rigaku в CuK_{α} -излучении и дифрактометре Дрон-6. ДюрOMETрический анализ проводили на приборе ПМТ-3 на поперечных микрошлифах образцов при нагрузке 0,49 Н.

Результаты и обсуждение

Алитирование как способ увеличения жаростойкости сплавов на железной основе известен с 1915 г. [4], этот процесс назывался калоризацией. Полученное покрытие толщиной 25–40 мкм применялось в те времена, например, для защиты рабочих лопаток турбины газотурбинных двигателей. Для меди и медных сплавов данные по стойкости после алитирования и соответственно применение были позже.

Известно, что растворение алюминидных фаз начинается при температуре 850–900 °С, до этой температуры барьерный слой эффективно защищает основной металл от проникновения кислорода и других веществ, поскольку при повышенных температурах на поверхности образуется оксид алюминия или шпинель, обладающая намного лучшими защитными свойствами, чем CuO и Cu_2O . Концентрация алюминия, необходимая для эффективной защиты меди, напрямую зависит от температуры и внешней среды. Исследователи отмечают, что при 4% алюминия в меди сплав уже показывает значительное сопротивление высокотемпературному окислению [7]. Очевидно, что чем выше концентрация алюминия на поверхности, тем более эффективная защита должна реализовываться. При недостатке алюминия он не предотвращает процесс диффузии кислорода в глубь изделия, что приводит к активному формированию оксидного слоя.

Толщина алитированного слоя за 4 ч обработки (без учета времени на прогрев контейнера) составила около 50 мкм. Микротвердость фаз после алитирования основной части диффузионного слоя изменяется незначительно относительно основного металла, в среднем составляет 550 МПа.

При использовании в качестве активатора хлористого аммония в контейнере протекают реакции диссоциации хлористого аммония и образования галогенидов и субгалогенидов алюминия, которые в процессе самовосстанавливаются на поверхности изделия, формируя активные атомы и в дальнейшем диффузионный слой. Установлено, что при насыщении алюминием на поверхности образуется диффузионный слой (рис. 2), в котором отчетливо видны три зоны: ближе к поверхности – твердый раствор толщиной около 5–10 мкм, глубже – комплекс алюминидных фаз, это твердые растворы на основе соединений Cu_3Al и Cu_9Al_4 общей толщиной 35–40 мкм, а также переходная зона (до 8 мас. % Al), представляющая собой α -фазу толщиной 10–20 мкм [6, 9]. На поверхности рентгеноструктурным анализом также обнаруживается фаза Al_2O_3 как результат взаимодействия с кислородом воздуха уже сформировавшегося диффузионного слоя (рис. 3).

Отметим, что такая структура слоя и его морфология получаются благодаря низкотемпературному процессу насыщения (560 °С), поскольку при высоких температурах обработки вследствие больших скоростей диффузии не достигается высокое содержание алюминия в слое. Традиционно для алитирования рекомендуется температура насыщения 700–800 °С [3, 4].

Для диффузионного слоя, полученного после силицирования, характерны также несколько зон (рис. 4), согласно диаграмме состояния [9], ближе к поверхности – твердый раствор Cu в Si толщиной около 5–15 мкм, далее в глубь изделия – предположительно зона ϵ -фазы (10,6–10,7 мас. % Si), тонкая прослойка γ -фазы и α -твердый раствор (до 3,5 мас. % Si). Толщина силицированного слоя за 4 ч обработки составила около 60 мкм. Необходимо отметить наличие пористости в микроструктуре исследуемых образцов, особенно на межфазной границе, между верхним слоем практически чистого кремния и слоем ϵ -фазы. Кроме того, фазовым анализом зафиксировано присутствие фазы на поверхности образца Al_2O_3 , следы которой, видимо, появляются от присутствия в смеси продуктов алюмотермического синтеза оксидов Cr и B (рис. 5).

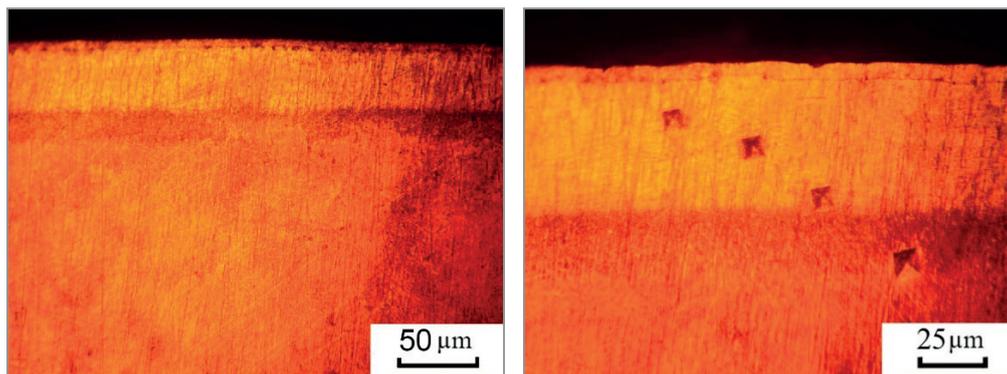


Рис. 2. Микроструктура алитированного слоя на меди

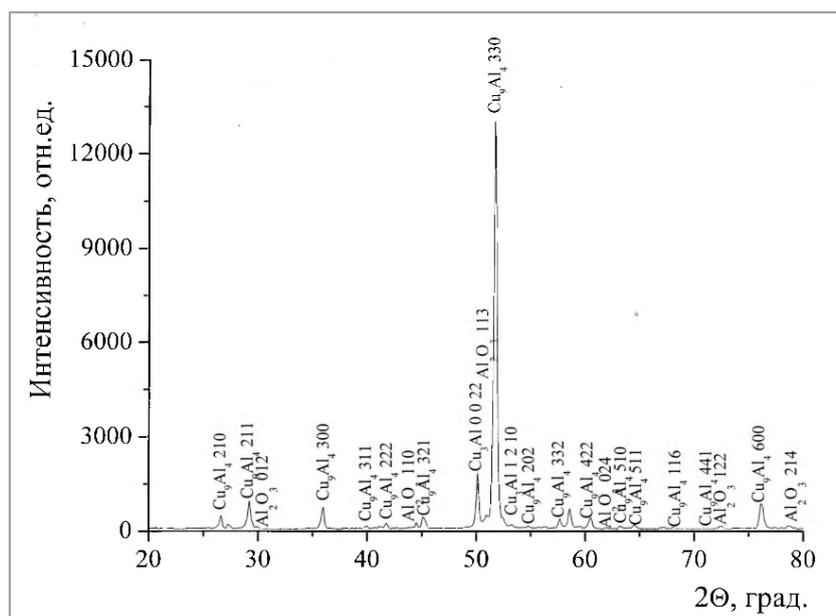


Рис. 3. Фрагмент рентгеновской дифрактограммы медного образца после алитирования

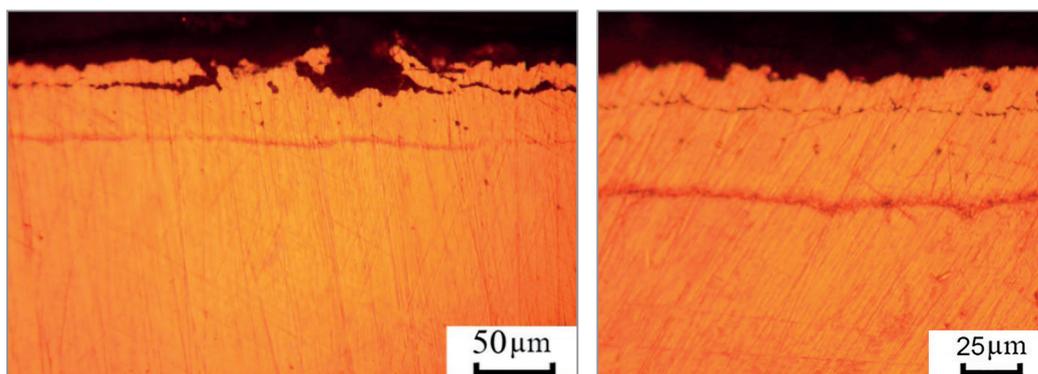


Рис. 4. Микроструктура силицированного слоя на меди

Для выявления механизма защитного действия алитированного и силицированного диффузионных слоев были изучены микроструктуры до и после окисления. Установлено, что на алитированных образцах при испытаниях на жаростойкость происходит рост толщины слоя в глубь детали и перераспределение концентрации алюминия, «рассасывание» слоя. За 25 ч испытаний слой увеличился на 10–20%. Такое перераспределение приводит к заметному обеднению поверхностных слоев алюминием. В подтверждение этому можно привести внешний вид образцов, цвет которых меняется от металлического к бронзовому (рис. 6, б). Для силицированных медных образцов при испытаниях длительностью более 15 ч отмечено появление участков отслаивания диффузионного слоя (вспучивания) (рис. 7). На поверхности образуются точечные очаги коррозии, которые увеличиваются в размерах и количестве.

Результаты исследования жаростойкости представлены зависимостью привеса алитированных и силицированных образцов меди от продолжительности окисления на воздухе при температуре 800 °С (рис. 6, а).

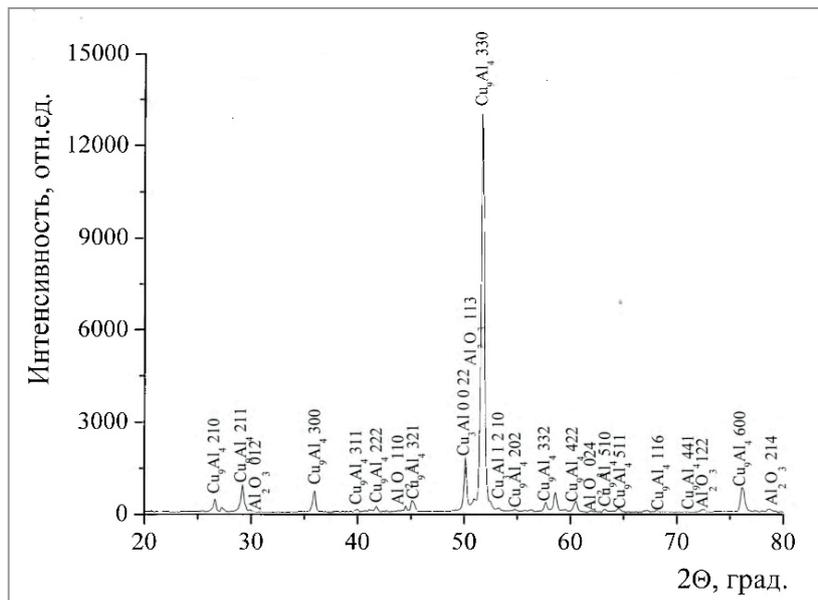


Рис. 5. Фрагмент рентгеновской дифрактограммы медного образца после силицирования

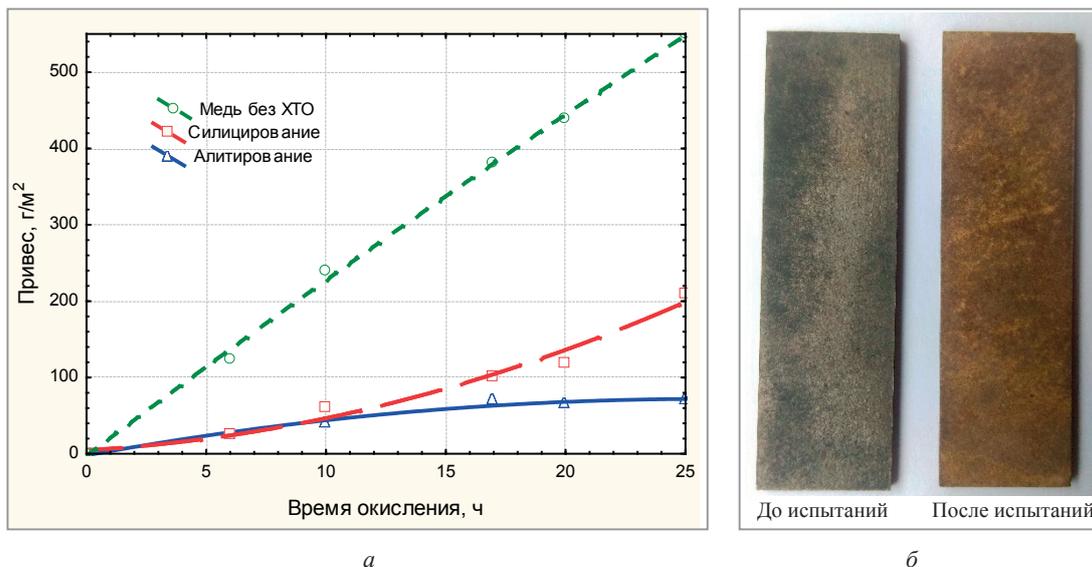


Рис. 6. Зависимость привеса образцов меди с термодиффузионным слоем и без от продолжительности окисления на воздухе при температуре 800 °С (а) и внешний вид алитированных образцов меди до и после испытаний (б)

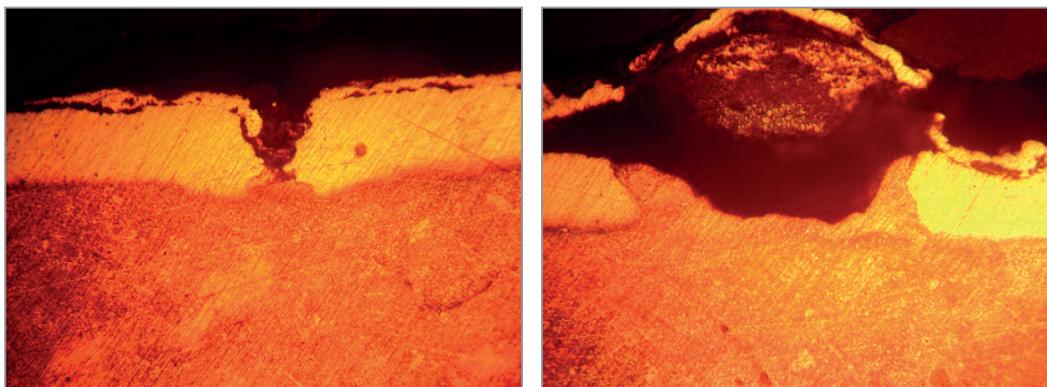


Рис. 7. Микроструктура силицированного образца меди после испытания на жаростойкость с участками локального разрушения. $\times 500$

Выводы

Проведены структурные исследования образцов технической меди после термодиффузионной обработки, заключающейся в их алитировании и силицировании в порошковых смесях. Проанализированы кинетика роста, фазовый состав и морфология слоя.

Исследованы эксплуатационные свойства полученных защитных слоев, в частности их жаростойкость. Установлено, что за 4 ч термодиффузионного алитирования при 560 °С образуется диффузионный слой толщиной 50 мкм, работоспособный до температур 800 °С. В результате сравнительных испытаний на жаростойкость в течение 25 ч, 800 °С алитированных, силицированных слоев и исходных, неупрочненных образцов технической меди, отмечено увеличение стойкости практически в 8 раз образцов алитированной меди в сравнении с медью без защитного слоя. При первых 10 ч испытаний силицированные слои на меди показали практически такую же стойкость, как и алитированные, но затем в них появлялись локальные участки коррозии, которые, по нашему мнению, были спровоцированы циклическими режимами нагрева и охлаждения в ходе испытаний. Для силицированных образцов меди отмечено отслаивание участков (вспучивание) и появление очагов коррозии слоя при длительности испытаний более 15 ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пахомов, В. С. Коррозия металлов и сплавов: справ.: В 2-х книгах. Кн. 2 / В. С. Пахомов. М.: Наука и технологии, 2013. 554 с.
2. Акимов, В. А. Исследование влияния оксида алюминия на состав и свойства медно-алюминиевого диффузионного слоя / В. А. Акимов, А. Г. Радюк, А. Е. Титлянов // Технология металлов. 2010. № 7. С. 42–46.
3. Минкевич, А. Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А. Н. Минкевич. М.: Машиностроение, 1965. 491 с.
4. Коломыцев, П. Т. Жаростойкие диффузионные покрытия / П. Т. Коломыцев. М.: Metallurgia, 1979. 272 с.
5. Украинцев, А. Е. Разработка составов и создание на меди диффузионных слоев электродуговой металллизацией с последующей термообработкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 22 с.
6. Гордеева, Л. Т. Окисление меди при высоких температурах и повышение ее жаростойкости алитированием / Л. Т. Гордеева, Н. Г. Вавиловская, Г. В. Григорян // Защитные покрытия на металлах. 1968. № 1. С. 111–113.
7. Plascencia G. The oxidation resistance of copper-aluminum alloys at temperatures up to 1,000 °C / G. Plascencia, T. Utigard, T. Marin // Journal of The Minerals, Metals and Materials Society (JOM). 2005. Vol. 57. P. 80–84.
8. Радюк А. Г. и др. Исследование способов повышения жаростойкости меди и улучшения свойств медно-алюминиевого диффузионного слоя // Цветные металлы. 2009. № 6. С. 112–113.
9. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справ. В 3-х т. Т. 1 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. 992 с.

REFERENCES

1. Pakhomov V.S. *Korroziya metallov i splavov: Spravochnik* [Corrosion of metals and alloys: Handbook]: In 2 books. Book 2. Moscow, Nauka i tekhnologii Publ., 2013, 554 p.
2. Akimov V.A., Radyuk A.G., Titlyanov A.E. Issledovanie vliyaniya oksida alyuminiya na sostav i svojstva medno-alyuminiyevogo diffuzionnogo sloya [Study of the influence of aluminum oxide on the composition and properties of a copper-aluminum diffusion layer]. *Tekhnologiya metallov=Metal Technology*, 2010, no. 7, pp. 42–46.
3. Minkevich A.N. *Himiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov* [Chemical heat treatment of metals and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965, 491 p.
4. Kolomytsev P.T. *Zharostojkie diffuzionnye pokrytiya* [Heat-resistant diffusion coatings]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979, 272 p.
5. Ukraintsev A.E. *Razrabotka sostavov i sozdanie na medi diffuzionnyh sloev elektrodugovoj metallizaciej s posleduyushchej termoobrabotkoj. Avtoref. Diss. kand. techn. nauk* [Development of compositions and creation of diffusion layers on copper by electric arc metallization with subsequent heat treatment. Abstract of Ph. D. dissertation tech. nauk]. Moscow, 2010, 22 p.
6. Gordeeva L.T., Vavilovskaya N.G., Grigoryan G.V. Okislenie medi pri vysokih temperaturah i povyshenie ee zharostojkosti alitirovaniem [Oxidation of copper at high temperatures and increasing its heat resistance by aluminizing]. *Zashchitnye pokrytiya na metallah = Protective coatings on metals*, 1968, no. 1, pp. 111–113.
7. Plascencia G., Utigard T., Marin T. The oxidation resistance of copper-aluminum alloys at temperatures up to 1,000 °C. *Journal of The Minerals, Metals and Materials Society (JOM)*. Springer, 2005, vol. 57, pp. 80–84.
8. Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Kuznetsov V.E., Ukraintsev A.E. Issledovanie sposobov povysheniya zharostojkosti medi i uluchsheniya svojstv medno-alyuminiyevogo diffuzionnogo sloya [Study of the methods of increase of copper heat resistance and improvement of properties of copper aluminum diffusion layer]. *Cvetnye metally = Non-ferrous metals*, 2009, no. 6, pp. 112–113.
9. *Diagrammy sostoyaniya dvojnnyh metallicheskih sistem*. Tom 1 [State diagrams of binary metal systems. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996, 992 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-130-136>
УДК 541.183

Поступила 18.11.2020
Received 18.11.2020

ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ПАРОВ РАСТВОРИТЕЛЯ МАРКИ 646 АДСОРБЦИОННО–КАТАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

А. С. ПАНАСЮГИН, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: niilogaz@tut.by

Н. П. МАШЕРОВА, А. Р. ЦЫГАНОВ, Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а. E-mail: Mascherova.Nat@mail.ru

Н. Д. ПАВЛОВСКИЙ, Гродненский государственный медицинский университет, г. Гродно, Беларусь, ул. Горького, 80

Целью данной работы является изучение процесса нейтрализации паров смешанного растворителя марки 646 адсорбционно-каталитическим методом. Сущность метода состоит в концентрировании компонентов растворителя на сорбенте, термической десорбции с последующим периодическим беспламенным каталитическим окислением накопленных органических веществ до диоксида углерода и воды. В качестве сорбента был использован синтетический цеолит марки NaX, в качестве катализатора – пористый материал на основе пенокерамики состава Al_2O_3/SiO_2 с высоко развитой модифицированной поверхностью с нанесенной активной каталитической фазой. Смешанный растворитель содержит ацетон, толуол, н-бутилацетат, этанол, этилцеллозоль, н-бутанол. Показано, что на величину сорбционного объема цеолита для каждого класса рассмотренных соединений оказывают влияние определенные факторы: длина и строение углеродного скелета, положение гидроксильной группы (для спиртов и эфиров), количество метильных групп в составе молекул (для производных бензола). Степень конверсии компонентов смешанного растворителя составила 65,4–90,1%.

Ключевые слова. Адсорбционно-каталитический метод, смешанный растворитель, обезвреживание паров органических веществ, ацетон, толуол, этанол, н-бутанол, этилцеллозоль, бутилацетат.

Для цитирования. Панасюгин, А. С. Обезвреживание паров растворителя марки 646 адсорбционно-каталитическим методом / А. С. Панасюгин, Н. П., Машерова, А. Р. Цыганов, Н. Д. Павловский // *Литье и металлургия*, 2021. № 1. С. 130–136. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-130-136>.

NEUTRALIZATION OF SOLVENT VAPORS OF BRAND 646 BY THE ADSORPTION–CATALYTIC METHOD

A. S. PANASYUGIN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: niilogaz@tut.by

N. P. MASHEROVA, A. R. TSYGANOV, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Swerdlova str. E-mail: Mascherova.Nat@mail.ru

N. D. PAVLOVSKIY, Grodno State Medical University, Grodno, Belarus, 80, Gorkogo str.

The aim of the paper is investigation of neutralization of solvent vapors of the brand 646 by an adsorption-catalytic method. The adsorption-catalytic method includes the following stages: adsorption of the solvent components by adsorbent, thermal desorption and periodic flameless catalytic oxidation of organic substances to carbon dioxide and water. Synthetic zeolite of the NaX brand was used as a sorbent, catalyst was porous Al_2O_3/SiO_2 ceramic foam material with an active catalytic phase. Solvent contains acetone, toluene, butylacetate, ethanol, ethyl cellosolve, n-butanol. It is shown that the value of the sorption volume of zeolite for each class of compounds depends on the certain factors: the length and structure of the carbon skeleton, the position of the hydroxyl group (for alcohols and esters), number of methyl groups in the molecules (for benzene derivatives). The conversion of the mixed solvent components was 65.4–90.1%.

Keywords. Adsorption-catalytic method, mixed solvent, neutralization of vapors of organic substances, acetone, toluene, ethanol, n-butanol, ethyl cellosolve, butylacetate.

For citation. Panasyugin A. S., Masherova N. P., Tsyganov A. R., Pavlovsky N. D. Neutralization of solvent vapors of brand 646 by the adsorption-catalytic method. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 130–136. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-130-136>.

Введение

Развитие промышленных технологий приводит к неуклонному расширению спектра органических соединений, используемых в различных отраслях производства. Одновременно с этим все актуальнее становится задача по охране окружающей среды, предотвращению выбросов этих веществ в атмосферу и разработке способов их нейтрализации.

В реальном производственном процессе практически всегда суммарные концентрации выбросов колеблются в широком диапазоне и, как следствие, оптимизировать режим работы систем нейтрализации, работающих по принципу метода прямого дожигания, весьма проблематично.

Ранее было показано [1–6], что при низких концентрациях органических газовых выбросов рациональнее использовать адсорбционно-каталитический метод, сущность которого состоит в концентрировании веществ на сорбенте с последующим периодическим беспламенным каталитическим окислением накопленных органических веществ до диоксида углерода и воды. Низкотемпературное осуществление процесса окисления, отсутствие трудоемких стадий регенерации, а также особенности технологического процесса, позволяющие минимизировать образование продуктов неполного сгорания соединений углерода, являются несомненными достоинствами адсорбционно-каталитического метода очистки газовых выбросов.

В указанных выше работах приведены результаты исследований по нейтрализации паров фенола, формальдегида, триэтанолamina, производных бензола, предельных углеводородов нормального и циклического строения, пропилен гликолей, сложных эфиров уксусной кислоты, одноатомных спиртов.

Однако материалы, в которых в качестве растворителя используются индивидуальные вещества, встречаются достаточно редко, в большинстве случаев применяют смесевые составы.

Целью данной работы являлось изучение процесса нейтрализации паров смесевого растворителя марки 646 (ГОСТ 18188–72)* адсорбционно-каталитическим методом.

Методика эксперимента

Для решения поставленной задачи в качестве сорбента был выбран синтетический цеолит марки NaX, представляющий собой сферические гранулы диаметром 2,5–3,5 мм. В качестве катализатора глубокого окисления использовали пористые материалы с высокоразвитой модифицированной поверхностью на основе пенокерамики состава Al_2O_3/SiO_2 с нанесенной активной каталитической фазой, имеющие на поверхности пенокерамики сформированный буферный слой, содержащий 11,1 мас.% $\gamma-Al_2O_3$, и обладающие удельной поверхностью 15,6 м²/г [1, 7].

Схема модельной установки нейтрализации паров адсорбционно-каталитическим методом, принцип ее работы детально описаны в работе [1]. Алгоритм работы установки основан на полициклическом принципе:

- 1 – цикл адсорбции паров органических соединений на поверхности сорбента;
- 2 – цикл термической десорбции паров органических соединений в адсорбционном реакторе;
- 3 – цикл глубокого каталитического окисления паров органических веществ.

Для измерения скорости движения газового потока использовали дифференциальный манометр Testo 512 и датчик скорости движения воздуха Testo 425 производства Германии.

Определение концентрации органических веществ осуществляли с помощью газового хроматографа «Цвет-106», оснащенного пламенно-ионизационным детектором (ПИД). Интерпретацию полученных хроматограмм производили с использованием программы «Мультихром 1.39». Процесс адсорбции проводили до проскока 10%-ного суммарного состава всех компонентов растворителя.

Компонентный состав растворителя марки 646 представлен различными классами органических веществ: кетоны (ацетон), спирты нормального строения (этанол, бутанол), производные бензола (толуол), эфиры (бутилацетат, этилцеллозольв). Порядок выхода компонентов смесевого растворителя марки 646 и степень конверсии определяли на основании дискретных значений, полученных при анализе газовых проб, которые отбирали с интервалом в 1 мин. Полноту каталитического окисления органических соединений оценивали по показателям газоанализатора Dräger MSI 150 EURO, который

* ГОСТ 18188–72 Растворители марок 645, 646, 647, 648 для лакокрасочных материалов. Технические условия.

оснащен датчиками, позволяющими оценить количественное и качественное содержание в составе газовых выбросов CO и CO₂.

Результаты и их обсуждение

Адсорбция. Ранее было установлено, что оптимальными условиями проведения сорбционного процесса являются высота слоя сорбента не более 20 см при загрузке 275 г цеолита NaX в реактор диаметром 40 мм и высотой 250 мм [1] при оптимальной скорости газовой смеси 0,5 м/с.

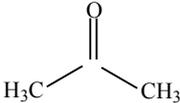
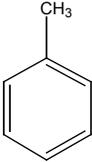
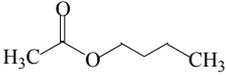
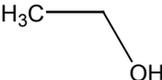
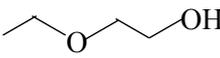
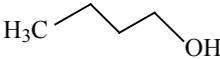
Из табл. 1 видно, что в зависимости от концентрации органических веществ на входе в реактор интервал степени сорбции (*S*) различных компонентов растворителя марки 646 меняется сложным образом (от 90,2 до 96,1%), что несколько отличается от показателей для индивидуальных веществ (95–99,8%) [1–6]. Данные различия вызваны процессом конкурирующей сорбции, обусловленной большими различиями в физико-химических свойствах – химический состав, структурное строение, температура кипения, посадочная площадка и др. (табл. 2).

Таблица 1. Сорбционные свойства цеолита NaX по отношению к парам растворителя марки 646

Адсорбат	Исходная смесь, мг/м ³	Сорбция				<i>S</i> _{sorb} , %
		мг/г	мг/275 г	ммоль/г	ммоль/275г	
Ацетон	353,64	11,2	3080	0,192	52,8	92,4
Толуол	2526	104	28600	1,136	312	96,1
Бутилацетат	505,2	10,32	2838	0,08	22	93,6
Этанол	505,2	12	3300	0,26	71,52	94,3
Этилцеллозольв	404,16	2,56	704	0,028	7,68	90,2
Бутанол	757,8	12,72	3498	0,168	46,24	91,7
Сумма	5052	152,8	42028	1,86	512	93,1*

* Среднее значение.

Таблица 2. Физико-химические свойства компонентов растворителя марки 646

Вещество	Структурная формула	Брутто-формула	<i>T</i> _{кип} , °C	Молярная масса <i>M</i> , г/моль	Посадочная площадка ω, нм ²
Ацетон		C ₃ H ₆ O	56,1	58,08	0,277
Толуол		C ₇ H ₈	110,6	92,14	0,355
Бутилацетат		C ₈ H ₁₂ O ₂	126,0	116,16	0,413
Этанол		C ₂ H ₆ O	78,3	46,07	0,238
Этилцеллозольв		C ₄ H ₁₀ O ₂	135,6	90,12	0,335
н-Бутанол		C ₄ H ₁₀ O	117,7	74,12	0,322

На основании приведенных выше данных можно сделать определенные заключения о том, что на степень адсорбции изученной органической смеси оказывают влияние одновременно несколько факторов. Так, для одноатомных спиртов нормального строения при увеличении числа атомов углерода в молекуле с 2 (этанол) до 4 (н-бутанол) динамическая сорбционная емкость цеолита снижается с 149 до

106,0 мг/г (с 3,24 до 1,43 ммоль/г). Вероятно, в этом случае решающую роль играют как размер посадочной площадки, так и затруднения, возникающие при пространственной ориентации более длинноцепочечных молекул относительно сорбционных центров NaX.

Смещение месторасположения для изомеров C₃-C₅ (пропанол-2, бутанол-2 и пентанол-2), понижение динамической сорбционной емкости цеолита находится в пределах 102–9,7 мг/г (1,71–0,11 ммоль/г), при этом увеличение размеров посадочной площадки молекул вторичных спиртов незначительно [5, 6].

Для производных бензола на значение величин сорбционного объема V_S наибольшее влияние оказывает количество метильных групп в составе молекул. Увеличение размеров посадочных площадок соединений сопровождается уменьшением сорбционного объема, при этом введение в бензольное кольцо очередной метильной группы приводит к более существенному уменьшению сорбционного объема (табл. 3).

Сорбционный объем толуола по отношению к бензолу меньше на 16,27%, сорбционный объем ксилолов по отношению к толуолу уменьшается на 30,07%, а сорбционный объем по мезитилену по сравнению с ксилолами снижается на 62,44% [8].

Т а б л и ц а 3. Сорбционные характеристики цеолита NaX по отношению к производным бензола

Ароматический углеводород	Сорбционный объем V_S		Посадочная площадка ω , нм ²
	ммоль/г	мг/г	
Бензол C ₆ H ₆	3,38	263,63	0,32
Толуол C ₆ H ₅ CH ₃	2,83	260,36	0,36
Ксилолы C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	1,97	208,82	0,39
Мезитилен C ₆ H ₃ (CH ₃) ₃	0,74	88,8	0,43

В работе [9] были изучены сорбционные характеристики цеолита NaX по отношению к эфирам уксусной кислоты (табл. 4). При увеличении длины углеводородного радикала на метиленовую группу CH₂ размер посадочной площадки эфиров увеличивается. Увеличение размеров посадочных площадок молекул эфиров уксусной кислоты сопровождается уменьшением сорбционного объема (V_S). Увеличение посадочной площадки пропилацетата на 12,9% в сравнении с этилацетатом ведет к снижению сорбционного объема на 27,1% (ΔV_S , ммоль/г), а с увеличением посадочной площадки бутилацетата на 12,23% в сравнении с пропилацетатом снижается сорбционный объем на 32,95% (ΔV_S , ммоль/г). Однако при переходе от бутилацетата к пентилацетату увеличение посадочной площадки на 8,2% приводит к тому, что сорбционный объем снижается на 79,1% (ΔV_S , ммоль/г), что объяснимо более рыхлой упаковкой молекул с объемными радикалами [9].

Т а б л и ц а 4. Сорбционные характеристики цеолита NaX по отношению к эфирам уксусной кислоты

Эфир уксусной кислоты	Сорбционный объем V_S		Посадочная площадка ω , нм ²
	ммоль/г	мг/г	
Этилацетат	2,15	189,2	0,326
н-Пропилацетат	1,56727	159,9	0,368
н-Бутилацетат	1,05091	121,90	0,413
н-Пентилацетат (амилацетат)	0,22	28,6	0,447

При сравнении ацетона и этилцеллозольва (табл. 5) видно, что размер посадочной площадки у этилцеллозольва всего на 20% выше, чем у ацетона, и из-за этого закономерно уменьшается сорбционный объем [10]. Однако одним увеличением размеров посадочной площадки невозможно объяснить снижение сорбционной емкости в 7,8 раз, вероятно, в данном случае определяющее влияние оказывают строение углеродного скелета и положение гидроксильной группы, что было показано на примере изомеров амилового спирта [11].

Таблица 5. Адсорбционные характеристики NaX по отношению к парам ацетона и этилцеллозольва

Адсорбат	Сорбционный объем V_S		Посадочная площадка ω , нм ²
	ммоль/г	мг/г	
Ацетон	3,44	0,27816	199,53
Этилцеллозольв	0,44	0,33550	39,6

Установлено, что на величину сорбционного объема (V_S) цеолита NaX для каждого класса рассмотренных соединений оказывают влияние свои лимитирующие параметры. Так, для спиртов – длина углеводородного скелета и положение гидроксильной группы, для производных бензола – количество метильных групп в составе молекул, для эфиров уксусной кислоты – увеличение длины углеводородного радикала на метиленовую группу CH_2 и конформация углеводородного радикала спирта, для этилцеллозольва – строение углеродного скелета и положение гидроксильной группы.

Десорбция. В процессе выполнения экспериментов установлено, что десорбция компонентов растворителя марки 646 протекает в течение 3–18 мин (рис. 1).

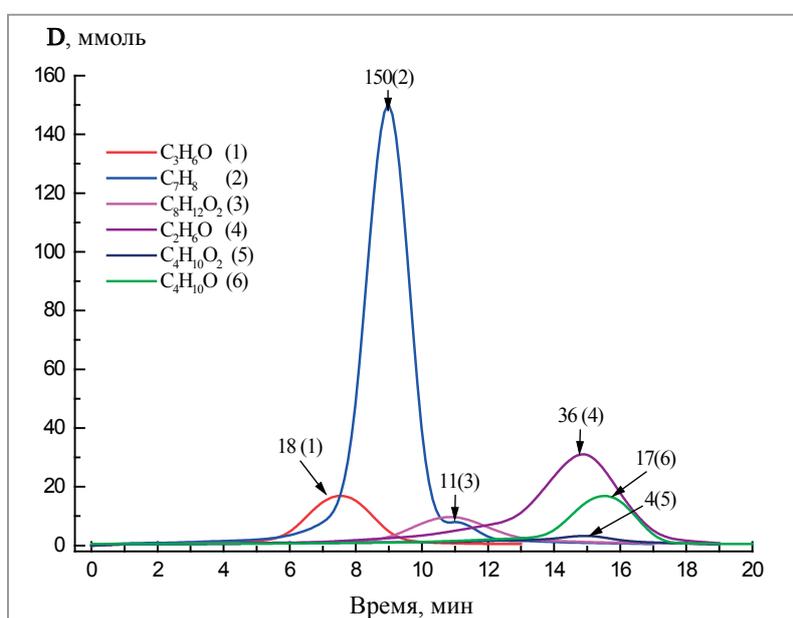


Рис. 1. Кривые десорбции: 1 – ацетон; 2 – толуол; 3 – бутилацетат; 4 – этанол; 5 – этилцеллозольв; 6 – бутанол

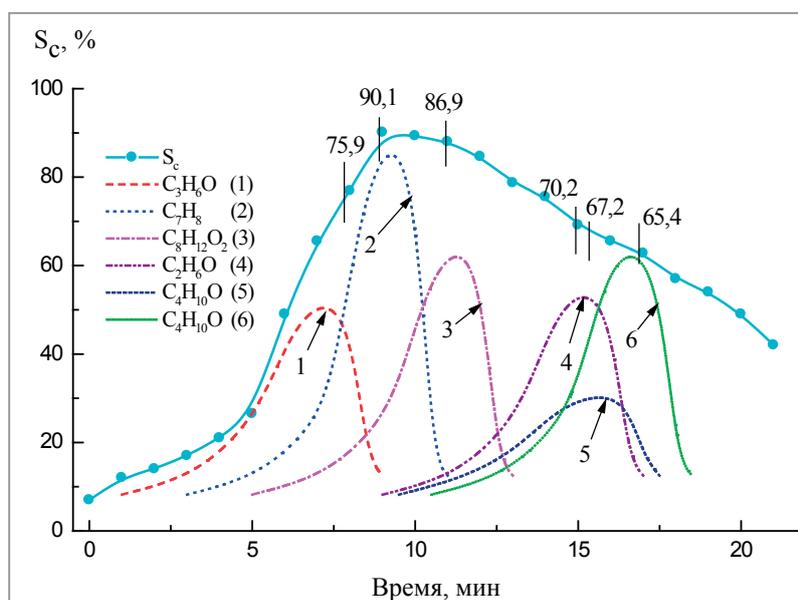


Рис. 2. Зависимость степени конверсии паров растворителя марки 646 от времени:
 S_c – интегральная кривая суммарной конверсии компонентов паров растворителя 646:
 1 – паров ацетона; 2 – толуола; 3 – н-бутилацетата; 4 – этанола; 5 – этилцеллозольва; 6 – н-бутанола

Из рисунка видно, что в отличие от индивидуальных адсорбатов, где процесс десорбции описывается одним пиком или кривой, имеющей плато, в случае смесевых растворителей, имеющих в своем составе соединения различных классов, на кривой десорбции присутствует ряд пиков, на время выхода которых определяющее влияние оказывают их физико-химические свойства.

Конверсия. Поскольку десорбция паров и процесс каталитического окисления протекают практически одновременно, их нейтрализация происходит в интервале 3–18 мин.

На рис. 2 показаны результаты процесса конверсии компонентов смесевых растворителей марки 646, полученные при анализе газовых проб, которые отбирали с интервалом в 1 мин. Степень конверсии (S_c) после десорбции газов из сорбционной колонки и прохождения через каталитический реактор определяли по формуле:

$$S_c = \frac{C_n - C_k}{C_n} \cdot 100\%,$$

где C_n – концентрация паров загрязняющих веществ на входе в каталитический реактор;

C_k – концентрация паров загрязняющих веществ на выходе из каталитического реактора.

Следует отметить, что степень конверсии составила 65,4–90,1%, несмотря на то что концентрации веществ, поступающих в каталитический реактор на заключительной стадии термодесорбции, имеют относительно низкие значения. За счет инерционности процесса разогрева в объеме катализатора создается зона высокотемпературного горения, где в автокаталитическом режиме реализуется процесс разложения паров органических веществ.

Выводы

На величину сорбционного объема (V_S) цеолита марки NaX для каждого класса рассмотренных соединений оказывают влияние свои лимитирующие параметры: для спиртов – длина углеродного скелета и положение гидроксильной группы, для производных бензола – количество метильных групп в составе молекул, для эфиров уксусной кислоты – увеличение длины углеводородного радикала на метиленовую группу CH_2 и конформация углеводородного радикала спирта, для этилцеллозольва – строение углеродного скелета и положение гидроксильной группы.

В случае смесевых растворителей, имеющих в своем составе органические соединения различных классов, на кривой десорбции присутствует ряд пиков, на время выхода которых определяющее влияние оказывают их физико-химические свойства.

Степень конверсии компонентов смесевых растворителей составляет 65,4–90,1%, несмотря на то что концентрации веществ, поступающих в каталитический реактор на заключительной стадии термодесорбции, имеют относительно низкие значения. За счет инерционности процесса разогрева в объеме катализатора создается зона высокотемпературного горения, где в автокаталитическом режиме реализуется процесс каталитического разложения паров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панасюгин А. С., Ломоносов В. А., Сморгыо О. Л. Использование адсорбционно-каталитического метода для очистки вентиляционных выбросов формовочных участков литейных цехов от паров фенола и формальдегида // *Литье и металлургия*. 2014. № 2. С. 19–25.
2. Панасюгин А. С., Ломоносов В. А., Сморгыо О. Л. Использование адсорбционно-каталитического метода для очистки вентиляционных выбросов, образующихся при использовании азотсодержащих формовочных смесей // *Литье и металлургия*. 2014. № 2. С. 26–29.
3. Панасюгин А. С., Ломоносов В. А., Сморгыо О. Л. Использование адсорбционно-каталитического метода для очистки выбросов в атмосферу, образующихся при использовании антипригарных покрытий, содержащих этиловый спирт // *Литье и металлургия*. 2014. № 4. С. 44–46.
4. Панасюгин А. С., Цыганов А. Р., Григорьев С. В. и др. Обезвреживание паров пропанола и изопропанола адсорбционно-каталитическим методом // *Литье Украины*. 2017. № 3. С. 2–5.
5. Панасюгин А. С., Цыганов А. Р., Григорьев С. В. и др. Обезвреживание паров одноатомных спиртов С1–С5 адсорбционно-каталитическим методом // *Литье Украины*. 2017. № 7. С. 2–8.
6. Цыганов А. Р., Панасюгин А. С., Павловский Н. Д., Машерова Н. П. Обезвреживание паров одноатомных спиртов С1–С5 и их изомеров адсорбционно-каталитическим методом // *Нефтехимия-2018: материалы I Междунар. науч.-техн. форума по химическим технологиям и нефтепереработке*. Минск, 27–30 ноября 2018 г. В 2-х ч. Минск: БГТУ, 2018. Ч. 1. С. 67–70.
7. Lomonosov V. A., Panasyugin A. S., Smorygo O. L., Mikutskii V. A. et al. Pd/ γ - Al_2O_3 catalysts on cellular supports for VOC vapor neutralization // *Catalysis in Industry*. 2010. Vol. 2. № 4. Pp. 387–392.
8. Цыганов А. Р., Панасюгин А. С., Павловский Н. Д. и др. Обезвреживание паров производных бензола адсорбционно-каталитическим методом // *Литье Украины*. 2019. № 6. С. 2–5.

9. **Цыганов А.Р., Панасюгин А.С., Павловский Н.Д. и др.** Обезвреживание паров эфиров уксусной кислоты адсорбционно-каталитическим методом // *Литье Украины*. 2019. № 10. С. 4–8.
10. **Цыганов А.Р., Панасюгин А.С., Павловский Н.Д., Машерова Н.П.** Нейтрализация паров кетонов и этилцеллозольва адсорбционно-каталитическим методом// *Нефтехимия-2019: материалы II Междунар. науч.-техн. и инвестиционного форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке*. Минск, 16–18 октября 2019 г. Минск: БГТУ, 2019. С. 28–32.
11. **Панасюгин А.С., Силина Т.В., Григорьев С.В., Павловский Н.Д., Машерова Н.П.** Обезвреживание паров изомеров амилового спирта адсорбционно-каталитическим методом // *Литье Украины*. 2017. № 5. С. 12–16.

REFERENCES

1. **Panasyugin A.S., Lomonosov V.A., Smorygo O.L.** Ispolzovanie adsorbtsionno-kataliticheskogo metoda dlya ochistki ventilyatsionnykh vybrosov formovochnykh uchastkov liteynykh uchastkov ot parov fenola i formaldegida [The use of the adsorption-catalytic method for purification of ventilation emissions of moulding sections of foundries from phenol and formaldehyde vapors]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2014, no. 2, pp. 19–25.
2. **Panasyugin A.S., Lomonosov V.A., Smorygo O.L.** Ispolzovanie adsorbtsionno-kataliticheskogo metoda dlya ochistki ventilyatsionnykh vybrosov, obrazuyuschikhsya pri ispolzovanii azotsoderzhaschikh formovochnykh smesey [The use of the adsorption-catalytic method for purification of ventilation emissions forming under use of nitrogen containing molding mixtures]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2014, no. 2, pp. 26–29.
3. **Panasyugin A.S., Lomonosov V.A., Smorygo O.L.** Ispolzovanie adsorbtsionno-kataliticheskogo metoda dlya ochistki vybrosov v atmosferu, obrazuyuschikhsya pri ispolzovanii antiprigrarnykh pokrytyi, sodержaschikh etilovyy spirt [The use of the adsorption-catalytic method for purification of air emissions generated under use of non-stick coatings containing ethyl alcohol]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2014, no. 4, pp. 44–46.
4. **Panasyugin A.S., Tsyganov A.R., Grigoriev S.V. et al.** Obezvrezhivanie parov propanola i izopropanola adsorbtsionno-kataliticheskim metodom [Neutralization of propanol and isopropanol vapors by the adsorption-catalytic method]. *Lit'e Ukrainy = Ukraine Foundry production*, 2017, no. 3, pp. 2–5.
5. **Panasyugin A.S., Tsyganov A.R., Grigoriev S.V. et al.** Obezvrezhivanie parov odnoatomnykh spirtov C₁-C₅ adsorbtsionno-kataliticheskim metodom [Neutralization of vapors of monohydric alcohols C₁-C₅ by the adsorption-catalytic method]. *Lit'e Ukrainy = Ukraine Foundry production*, 2017, no. 7, pp. 2–8.
6. **Tsyganov A.R., Panasyugin A.S., Pavlovskiy N.D., Masherova N.P.** Obezvrezhivanie parov odnoatomnykh spirtov C₁-C₅ i ikh izomerov adsorbtsionno-kataliticheskim metodom [Neutralization of vapors of monohydric alcohols C₁-C₅ and their isomers by the adsorption-catalytic method]. *Neftekhimiya-2018: materialy I Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma po khimicheskim tekhnologiyam i neftepererabotke, Minsk, noyabr 27–30, 2018 = Petrochemistry-2018: materials of the I International Scientific and technical Forum on Chemical Technologies and on oil processing*. Minsk, November 27–30, 2018. In 2 parts. Minsk, BGTU Publ., 2018, part 1, pp. 67–70.
7. **Lomonosov V.A., Panasyugin A.S., Smorygo O.L., Mikutskiy V.A. et al.** Pd/γ-Al₂O₃ catalysts on cellular supports for VOC vapor neutralization. *Catalysis in Industry*, 2010, vol. 2, no. 4, pp. 387–392.
8. **Tsyganov A.R., Panasyugin A.S., Pavlovskiy N.D. et al.** Obezvrezhivanie parov proizvodnykh benzola adsorbtsionno-kataliticheskim metodom [Neutralization of benzene derivatives vapors by adsorption-catalytic method]. *Lit'e Ukrainy = Ukraine Foundry production*, 2019, no. 6, pp. 2–5.
9. **Tsyganov A.R., Panasyugin A.S., Pavlovskiy N.D. et al.** Obezvrezhivanie parov efirov uksusnoy kisloty adsorbtsionno-kataliticheskim metodom [Neutralization of vapors of acetic acid esters by adsorption-catalytic method]. *Lit'e Ukrainy = Ukraine Foundry production*, 2019, no. 10, pp. 4–8.
10. **Tsyganov A.R., Panasyugin A.S., Pavlovskiy N.D., Masherova N.P.** Neytralizatsiya parov ketona i etilsellozol'va adsorbtsionno-kataliticheskim metodom [Neutralization of ketone and ethyl cellosolve vapors by the adsorption-catalytic method]. *Neftekhimiya-2019: materialy II Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo investitsionnogo foruma po khimicheskim tekhnologiyam i neftegazopererabotke, Minsk, oktyabr 16–18, 2019 = Petrochemistry-2019: materials of the II International Scientific, Technical and Investment Forum on Chemical Technologies and oil gas Processing*. Minsk, October 16–18, 2019. Minsk, BGTU Publ., 2019, pp. 28–32.
11. **Panasyugin A.S., Silina T.V., Grigoriev S.V., Pavlovskiy N.D., Masherova N.P.** Obezvrezhivanie parov izomerov amilovogo spirta adsorbtsionno-kataliticheskim metodom [Neutralization of vapors of amyl alcohol isomers by the adsorption-catalytic method]. *Lit'e Ukrainy = Ukraine Foundry Production*, 2017, no. 5, pp. 12–16.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-137-141>
УДК 620.3; 621.74

Поступила 10.02.2021
Received 10.02.2021

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

П. А. ВИТЯЗЬ, Национальная академия наук Беларуси, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 66
Ю. А. НИКОЛАЙЧИК, С. Л. РОВИН, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: foundry@bntu.by
Н. А. СВИДУНОВИЧ, Д. В. КУИС, Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а. E-mail: KuisDV@belstu.by

Настоящая статья является продолжением цикла, посвященного вопросам создания и применения наноматериалов и нанотехнологий в современной промышленности в целом и в металлургии, материаловедении и литейном производстве в частности. Рассматриваются вопросы выбора оборудования и разработки эффективных методов получения наноматериалов. Приводятся примеры применения разработанного оборудования, технологий и полученных материалов в Республике Беларусь и за рубежом.

Ключевые слова. Нанодисперсные связующие материалы, нанопорошки, нанотехнологии, диспергирование, механоактивация, оборудование, энергоэффективность.

Для цитирования. Витязь, П. А. Оборудование и технологии получения и использования наноструктурированных материалов / П. А. Витязь, Ю. А. Николайчик, С. Л. Ровин, Д. В. Куис, Н. А. Свидунович // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 137-141. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-137-141>.

EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES FOR THE PRODUCTION AND USE OF NANOSTRUCTURED MATERIALS

P. A. VITYAZ, National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus, 66, Nezavisimosti ave.
Yu. A. NIKALAICHYK, S. L. ROVIN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: foundry@bntu.by
N. A. SVIDUNOVICH, D. V. KUIS, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str. E-mail: KuisDV@belstu.by

This article is a continuation of the series devoted to the creation and application of nanomaterials and nanotechnologies in modern industry in general and in metallurgy, materials science and foundry production in particular. The article deals with the choice of equipment and the development of effective methods for obtaining nanomaterials. Examples of the application of the developed equipment, technologies and materials obtained in the Republic of Belarus and abroad are given.

Keywords. Nanodispersed binders, nanopowders, nanotechnology, dispersion, mechanical activation, equipment, energy efficiency.

For citation. Vityaz P. A., Nikalaichyk Yu. A., Rovin S. L., Svidunovich N. A., Kuis D. V. Equipment and technologies for the production and use of nanostructured materials. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 137-141. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-137-141>.

С появлением измельчающих устройств, обладающих высокой энергонапряженностью, коренным образом изменились возможности получения микро- и нанодисперсных материалов и представления о процессах, протекающих при тонком диспергировании и механической активации, открылись новые перспективные направления в индустрии строительных материалов, в литейном производстве и металлургии, в химической промышленности и других отраслях.

В результате механического воздействия на твердые материалы происходят не только дробление, измельчение и увеличение их удельной поверхности, но и значительные изменения свойств материалов – их активация: увеличение химической, магнитной и электрофизической активности.

Кроме того, важной отличительной особенностью частиц нанометрового диапазона является их способность самоорганизовываться в структуры различного функционального назначения, а также порождать структуры, себе подобные (эффект саморепликации). Таким образом, в результате применения

методов механосинтеза реализуются новые, не имеющие аналогов, соединения и структуры, обладающие уникальными свойствами [1].

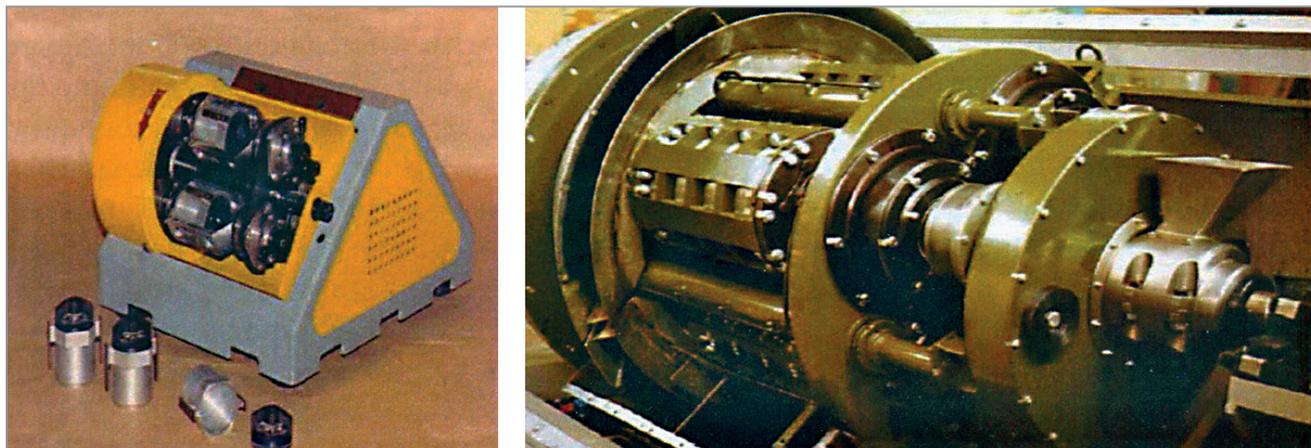
Для измельчения материалов используется большое разнообразие различного оборудования: гравитационные и шаровые, молотковые и вибрационные мельницы, струйные мельницы и дезинтеграторы, планетарные и дифференциальные центробежные мельницы и др. Несмотря на большое многообразие аппаратов, все варианты воздействия на измельчаемый материал условно можно разделить на четыре вида: раздавливание (I), удар (II), истирание (III), раскалывание (IV).

Наиболее эффективным оборудованием для получения тонкодисперсных порошков и механической активации материалов являются мельницы, в которых измельчаемый материал испытывает комплексное воздействие: вибрационные, планетарные и дифференциальные центробежные мельницы. В таблице приведено сопоставление энергонапряженности планетарных мельниц и других типов размольного оборудования применительно к механической активации [2].

Классификация аппаратов по энергонапряженности применительно к механической активации фосфатных руд

Тип аппарата	Энергонапряженность	Давление на частицы вещества, ГПа
Планетарные мельницы	Высоконапряженные	3–8
Центробежные активаторы: аттриторы, вибромельницы	Средненапряженные	1–4
Струйные мельницы и дезинтеграторы	Слабонапряженные	0,1–0,5

Планетарные мельницы, использующие высокие ускорения, характеризуются более высокой энергонапряженностью по сравнению с аттриторами, вибромельницами и дезинтеграторами. Планетарные мельницы способны развивать высокие ускорения (до 100 g) и обеспечивать быстрое и эффективное измельчение различных материалов в промышленных масштабах. Общий вид планетарных мельниц, предлагаемых одним из ведущих производителей РФ, компанией «ТТД», показан на рис. 1.



а

б

Рис. 1. Планетарные мельницы российской компании «ТТД»:

а – лабораторная мельница периодического действия; б – промышленная установка непрерывного действия

Весьма перспективным для получения нанопорошков представляется также применение нового поколения измельчающего оборудования – роторно-вихревых мельниц, обладающих эффектом механохимической активации (рис. 2) [3].

Основной принцип работы роторно-вихревых мельниц заключается в самоизмельчении частиц – разрушение при многократном столкновении частиц друг с другом. Рабочим телом, инициирующим движение частиц, служит воздух или инертные газы – при измельчении взрывоопасных материалов. В свою очередь, воздух разгоняется вращающимся ротором. В камере измельчения формируется пылевое облако, в котором частицы движутся подобно молекулам газа – хаотически, непрерывно соударяясь, что и обеспечивает их эффективное измельчение, смешивание и гомогенизацию получаемого порошкообразного материала. Линейная скорость рабочих органов этих мельниц превышает 250 м/с, а ускорение частиц достигает 1000 g. Эти мельницы дают возможность эффективно измельчать как хрупкие, так и пластичные, эластичные и даже волокнистые материалы. Разделение готового материала осуществляется с помощью центробежных или спиральных классификаторов. Принцип действия центробежного

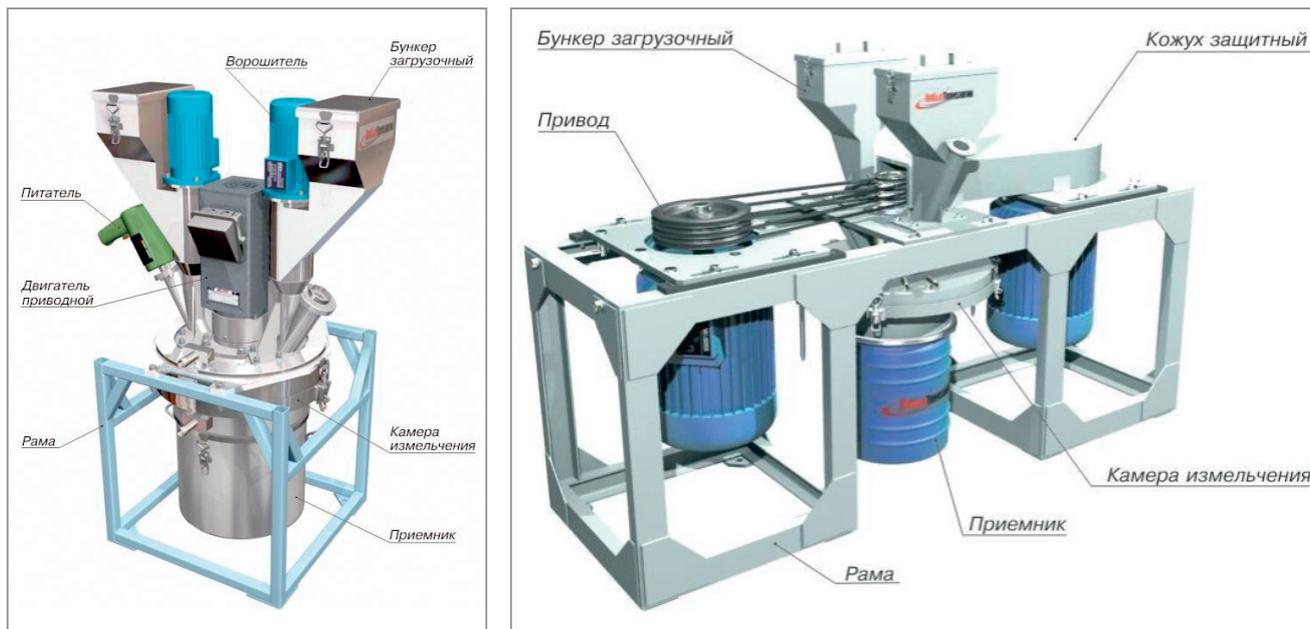


Рис. 2. Роторно-вихревые мельницы ЗАО «Новые технологии» (г. Санкт-Петербург, РФ)

классификатора основан на разделении порошкообразного материала в противоточной зоне, в которой вихревое движение обеспечивается за счет вращения ротора (принудительный вихрь). Такая конструкция по сравнению с воздушными сепараторами спирального типа, использующими свободный вихрь в зоне разделения, позволяет при необходимости разделять порошкообразные материалы в диапазоне граничной крупности менее 3 мкм [3].

Признанными мировыми лидерами в области разработки оборудования и технологий для тонкого измельчения различных материалов являются Япония, Англия и США. Однако значительных успехов в этой области добились ученые и разработчики и постсоветского пространства. Помимо ООО «ТТД» и ЗАО «Новые технологии», следует отметить разработки ОАО «МНПО «Полиметалл» (г. Санкт-Петербург, РФ) и НПЦ «Прикладные технологии» (г. Москва, РФ), НПО «Инновационные нанотехнологии Казахстана», где под руководством главного конструктора А. А. Башкирцева созданы механоактиваторы, позволяющие измельчать материалы до размеров меньше 100 нанометров, ОАО «Московский институт материаловедения и эффективных технологий» (ОАО «Московский ИМЭТ»), где под руководством академика РАЕН М. Я. Бикбау разрабатываются процессы нанокапсуляции – технологии получения покрытых тончайшей оболочкой (капсулированных) композиционных наноматериалов. В Беларуси разработкой технологий и оборудования для получения тонкодисперсных материалов успешно занимаются ученые и специалисты Белорусского государственного технологического университета, НПО «Центр», Института органической химии НАН Беларуси, Объединенного института машиностроения НАН Беларуси.

Наибольший опыт применения оборудования для тонкого измельчения и использования ультра- и нанодисперсных материалов сегодня накоплен в строительной индустрии, где крупнейшим в мире производителем и потребителем является Китай. В Китае ежегодно возводится более 1 миллиарда квадратных метров жилья и на ближайшее 5-летие принята амбициозная программа – обеспечить для каждого жителя Поднебесной не менее 32 м² жилой площади. Делается это за счет масштабной модернизации строительной отрасли и, в первую очередь, путем широкого использования наноматериалов и нанотехнологий. Так, например, тонкое измельчение цемента позволяет значительно снизить температуру и время обжига, изменяет кинетику его гидратации, и что самое важное – применение наноцемента позволяет многократно повысить прочность бетона. Основой модернизации индустрии строительных материалов Китая является современное промышленное оборудование для получения сверхтонких порошков. На рис. 3 показаны схема современной автоматической линии для производства таких порошков компании SHANHAI SHIBANG MACHINERY Co. и общий вид размольного блока планетарной мельницы для сверхтонкого измельчения XZM. Размер частиц известняка после размолва на этой линии находится в пределах 0,4–8,0 мкм, при этом выход фракции размером менее 2 мкм составляет не менее 50% [4].

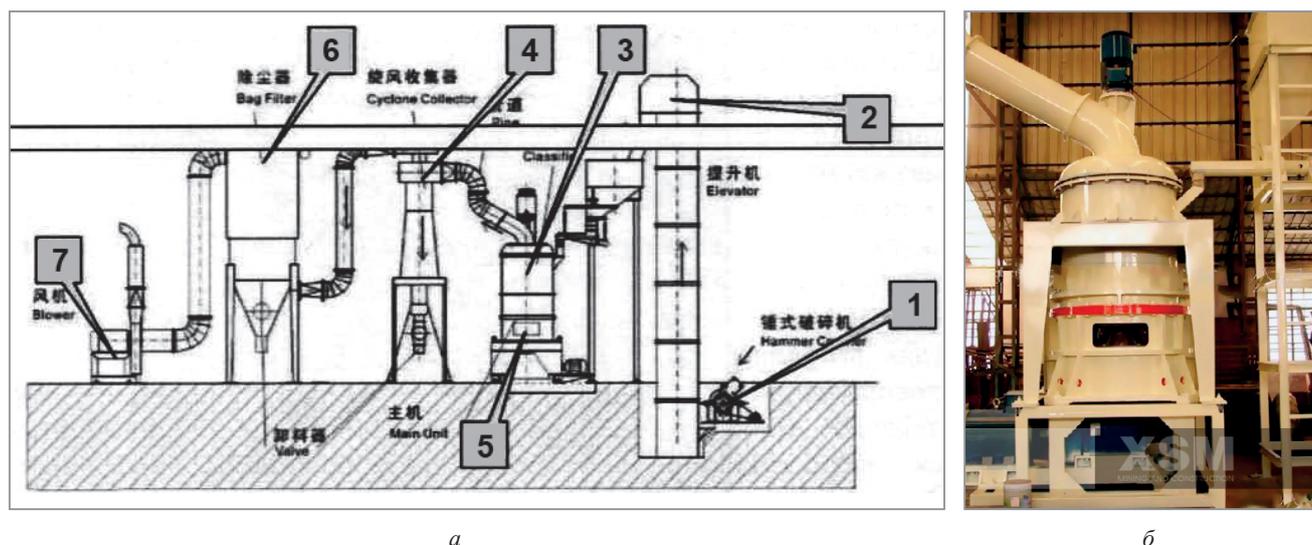


Рис. 3. Поточная линия XZM для получения сверхтонких порошков:
 а – схема линии: 1 – молотковая дробилка; 2 – элеватор; 3 – классификатор; 4 – циклон-сборник;
 5 – размольный узел; б – мешочный фильтр; 7 – воздуходувки; б – общий вид размольного узла

Помимо повышения дисперсности самого цемента, значительный эффект обеспечивается также введением в него наноструктурных добавок углерода: наночастиц, нановолокон, нанотрубок и астраленов. Наночастицы и нановолокна углерода при введении в бетоны на основе цементных вяжущих улучшают их физико-технические характеристики – повышают прочность, ударную вязкость и увеличивают энергию, необходимую для их разрушения. Углеродные нановолокна и нанотрубки ведут себя в цементном растворе как протяженные зародыши, способствующие образованию удлиненных кристаллов, срастаясь и переплетаясь, они образуют пространственную структуру длиной в сотни мкм, пронизывающую цементный массив. При введении их в количестве всего 1–5 мас. % прочность бетона возрастает на 10–15 %, а работа разрушения – почти в 3 раза.

Микродобавки астраленов – многослойных фуллероидных частиц размером 80–150 нм почти в 2 раза позволяют увеличить текучесть песчано-цементной смеси, снизить расход пластификатора и водопотребление, при этом значительно повысить прочность, водонепроницаемость и морозостойкость бетона [4].

Не меньший эффект обеспечивает тонкое диспергирование связующих и применение наноструктурных добавок в литейном производстве: при синтезе противопопригарных красок и огнеупорных покрытий, термостойкой керамики и футеровочных масс (в том числе с применением нанопорошков из техногенных отходов), модифицировании глинистых и силикатных связующих.

Исследования, выполненные на кафедре «Машины и технология литейного производства» БНТУ, показали, что одним из наиболее эффективных способов модифицирования силикатного связующего является введение нанодисперсных углеродсодержащих материалов в процессе автоклавного растворения силикат-глыбы. Так, добавка в жидкое стекло 0,08–0,16 мас. % диспергированного до размеров 50–100 нм шунгита (использовали шунгит марки ШН-08 Карельского месторождения), более чем вдвое облегчает выбиваемость и регенерацию смеси при сохранении уровня ее физико-механических и технологических свойств в процессе приготовления и формообразования (прочности, текучести, газопроницаемости и др.) [5, 6].

Введение в состав дистенсиллиманитовых противопопригарных красок 3–5 % наноструктурированного бемита ($\gamma\text{-AlOOH}$) приводит к качественному изменению микроструктуры противопопригарного покрытия и сопровождается увеличением прочности краски к истиранию на 30–35 % (с 2,4 до 3,2 кг/мм) за счет роста когезионной прочности манжет связующего и увеличения числа адгезионных контактов. Модифицированная краска обладает более высокой кроющей и проникающей способностью, а ее седиментационная устойчивость достигает 99 %.

Кроме того, исследования показали, что введение в состав наноструктурированного бемита позволяет интенсифицировать в период взаимодействия расплава с литейной формой процесс формирования в алюмосиликатных противопопригарных покрытиях высокотемпературной фазы – муллита ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), обладающего повышенными высокотемпературными свойствами: высокой огнеупорностью ($T_{\text{пл}} \sim 1890$ °С), низким коэффициентом термического расширения и теплопроводностью, высокой термической и эрозионной стойкостью [7, 8].

Казахстанские ученые и специалисты из Рудненского индустриального института (г. Рудный) и Карагандинского индустриального университета (г. Темиртау) в качестве объектов исследования влияния диспергирования на свойства формовочных глин использовали первосортные глины веселовского, дружковского, печорского, латненского месторождений, а также измельченные до микронных размеров промышленные отходы – отработанные огнеупоры, катализатор ИМ2201 и металлургические шлаки индукционной плавки сплавов на основе меди (МЗр, БрАЖН, БрХ0,8, МН19, Л70, Л63).

Измельчение чистых оксидов и глин проводили в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ) в мельнице планетарного типа при следующих условиях: длительность измельчения – 20–35 с при $v_{\text{const}}=2200$ об/мин; 50–60 с при $v_{\text{const}}=1820$ об/мин. В качестве ПАВ использовали этиловый спирт ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ – 95 %) в количестве 5 %. Для сравнительного анализа прочностных характеристик в работе использовали чистые оксиды алюминия (Al_2O_3) и хрома (Cr_2O_3). Определение размеров частиц проводили на лазерном анализаторе Fritsch Analysette 22 NanoTec.

Результаты исследований показали, что скорость измельчения глин в значительной степени зависит от содержания в смеси твердых частиц электрокорунда Al_2O_3 и оксида хрома. Кроме того, показатель рассеивания «сухого» измельчения бентонитовой глины в 3,16 раз ниже показателя рассеивания того же материала, но в условиях «мокрого» измельчения с добавкой в навеску $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ в качестве ПАВ, что связано со смещением порога начала интенсивной агрегации в сторону повышения формирования фракции наноразмеров.

В результате проведенных работ были разработаны новые виды термостойкой алюмосиликатной керамики из высокоглиноземистого сырья с добавками тонкодиспергированных отходов магний-силикатных и муллитсодержащих огнеупоров, а также набивной футеровки для плавильных печей и разливочных ковшей с применением нанопорошков, полученных из отработанного шамотного кирпича (ША-5) и катализатора (ИМ-2201). Использование микро- и нанодиспергированных материалов в составе разработанных композиций позволило 3–5 раз повысить термостойкость футеровки и защитных покрытий [9, 10].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Витязь, П.А.** Наноматериаловедение: учеб. пособие / П. А. Витязь, Н. А. Свидуневич, Д. В. Куис. Минск: Выш. шк., 2015. 511 с.
2. **Пивняк, Г.Г. и др.** Измельчение. Энергетика и технология: учеб. пособие для вузов. М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2007. 296 с.
3. Роторно-вихревые мельницы серии «Титан МД» [http:// www.allbeton.ru/](http://www.allbeton.ru/) (дата обращения: 5 февраля 2021 года).
4. **Витязь, П. А.** Высокие технологии и наноматериалы в строительной индустрии / П. А. Витязь, В. Г. Горобцов // Строительная наука и техника. 2009. № 9(27). С. 4–16.
5. **Гуминский, Ю.Ю.** Применение жидкостекольного связующего, модифицированного ультрадисперсными материалами / Ю.Ю. Гуминский, С.Л. Ровин // Литейное производство. 2019. № 11. С. 17–20.
6. Пат. ВУ 21926 В22С1/18 Легковыбываемая жидкостекольная смесь для литейных форм и стержней / Ю.Ю. Гуминский, А.Н. Крутилин, Ю.Н. Фасевич; заявитель и патентообладатель Белорусский национальный технический университет; заявка № а 20150673 от 29.12.2015; опубл. 30.06.2018.
7. **Кукуй, Д.М.** Закономерности формирования структурномеханических свойств противопопригарных покрытий, модифицированных наноструктурированными материалами / Д.М. Кукуй, Ю.А. Николайчик, Р.С. Филимоненко // Литье и металлургия. 2013. № 1. С. 43–47.
8. **Кукуй, Д.М.** Применение наноматериалов для синтеза высокотемпературной фазы в противопопригарных покрытиях / Д.М. Кукуй, Ю.А. Николайчик // Литье и металлургия. 2014. № 2. С. 5–8.
9. **Малькова, М.Ю.** Нанотехнологии в металлургической отрасли / М.Ю. Малькова, А.Н. Задиранов, А.Б. Найзабеков, С.Н. Лежнев, В.А. Андреященко. Темиртау: КГИУ, 2013. 200 с.
10. **Малькова, М.Ю.** Нанотехнологии в литейном производстве. Темиртау: Изд-во КГИУ, 2012. 193 с.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-142-148>
УДК 669.13.017:620.18

Поступила 07.02.2021
Received 07.02.2021

АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ ИЗНОСОСТОЙКИХ ХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

А. А. ЖУМАЕВ, Навоийское отделение Академии наук Республики Узбекистан, г. Навои, Узбекистан, ул. Галаба Шох. E-mail: ahmadjon_jumayev@maul.ru

К. Э. БАРАНОВСКИЙ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: baranosky_metolit@tut.by

Ю. Н. МАНСУРОВ, Институт общей и неорганической химии Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, ул. Мирзо Улугбека, 77-А. E-mail: yulbarsmans@gmail.com

В Навоийском горно-металлургическом комбинате, использующем в большом количестве детали машин для горных работ, стал вопрос оптимизации составов используемых износостойких хромистых чугунов при сохранении их эксплуатационных характеристик. В работе представлены результаты исследования фазового состава литого сплава, а также влияния термообработки чугуна с высоким содержанием хрома на его структуру и свойства. В качестве операции термообработки применяли закалку по различным режимам и низкий отпуск. Исследование позволило систематизировать известные литературные данные параметров термообработки группы износостойких хромистых чугунов, а также оптимизировать их режимы термообработки для деталей, работающих в горно-обогательном производстве.

Ключевые слова. Железо, углерод, чугун, легирующие элементы, высокохромистый белый чугун, термическая обработка, свойства.

Для цитирования. Жумаев, А. А. Анализ микроструктуры износостойких хромистых чугунов после термической обработки / А. А. Жумаев, К. Э. Барановский, Ю. Н. Мансуров // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 142–148. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-142-148>.

ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE OF WEAR RESISTANT CHROME CAST IRONS AFTER HEAT TREATMENT

A. A. JUMAIEV, Navoi branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Navoi, Uzbekistan str. Galaba Shokh. E-mail: ahmadjon_jumayev@maul.ru

K. E. BARANOVSKY, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: baranosky_metolit@tut.by

Yu. N. MANSUROV, Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, 77-A, Mirzo Ulugbek str. E-mail: yulbarsmans@gmail.com

At the Navoi Mining and Metallurgical Combine, which uses a large number of machine parts for mining operations, the issue of optimizing the compositions of wear-resistant chromium cast irons while maintaining their operational characteristics has arisen. The paper presents the results of studying the phase composition of the cast alloy, as well as the effect of heat treatment of cast iron with a high chromium content on its structure and properties. As heat treatment operations, quenching in various modes and low tempering were used. The study made it possible to systematize the known literature data on the heat treatment parameters of a group of wear-resistant chromium cast irons, as well as to optimize their heat treatment modes for parts operating in mining and processing industry.

Keywords. Iron, carbon, cast iron, alloying elements, high-chromium white cast iron, heat treatment, properties.

For citation. Jumaev A. A., Baranovsky K. E., Mansurov Yu. N. Analysis of the microstructure of wear resistant chrome cast irons after heat treatment. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 142–148. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-142-148>.

Современное машиностроение требует применения материалов, обладающих не только повышенными механическими свойствами, но и высокими специальными свойствами, такими, как твердость и износостойкость, обеспечивающих продолжительный срок службы деталей в конкретных условиях эксплуатации. В первую очередь, это относится к таким материалам, как высоколегированные износостойкие хромистые чугуны, область применения которых постоянно расширяется [1, 2].

В настоящее время на Навоийском машиностроительном заводе (Узбекистан) производится около 120 т в месяц литых деталей (заготовок) из износостойких хромистых чугунов. Наибольшую долю литья составляют детали оборудования для измельчителей горных пород. Примером таких деталей является «Питающий диск», который изготавливается из чугуна марки ИЧ280Х29НЛ. Состав чугуна отличается повышенным содержанием хрома и никеля. Для изготовления названной марки чугуна используют импортные дорогостоящие ферросплавы и легирующие элементы. Однако расход дорогостоящих ферросплавов и легирующих (феррохром и никель) может быть существенно уменьшен, если изготавливать отливку «Питающий диск» из менее легированного износостойкого хромистого чугуна, а затем литые детали подвергнуть термической обработке, повышающей твердость и износостойкость [3].

Цель работы – исследование возможности использования более дешевого износостойкого хромистого чугуна взамен ИЧХ280Х29НЛ, предназначенного для изготовления деталей типа «Питающий диск» турбодробилки двойного удара мод. KEV 96, и определение режима его термической обработки.

Материалы, используемые в исследовании. Научно-исследовательскую работу проводили на базе центральной заводской лаборатории производственного объединения «Навоийский машиностроительный завод». Объектом исследования являлась деталь «Питающий диск» (масса детали – 35 кг) турбодробилки двойного удара мод. KEV 96 установки «СЕМСО», предназначенной для измельчения рудных пород путем дробления. При работе деталь (рис. 1) испытывает скоростное механическое воздействие от размалываемого материала, что приводит к ударно-абразивному износу в процессе эксплуатации (рис. 2).

Ранее детали «Питающий диск» из износостойкого хромистого чугуна, выпускаемого по ASTM 532, имели следующий химический состав: С – 2,88%, Si – 0,56, Cr – 28,2, Mo – 0,2, Ni – 0,63, Ti – 0,02, P – 0,025, S – 0,023% и импортировались из-за рубежа в Узбекистан. Твердость импортных деталей составляла 59–60 HRC.

Из подобного импортному сплаву на Навоийском машиностроительном заводе было налажено производство деталей «Питающий диск» из износостойкого чугуна ИЧ300Х32Н2М2ТЛ. Отливки изготавливали в песчаных формах. Твердость полученных деталей составляла 47–50 HRC. Детали не термообработывали и использовали в литом состоянии.

В настоящее время деталь «Питающий диск» на Навоийском машиностроительном заводе выпускается из сплава ИЧ280Х29НЛ [4]. Детали эксплуатируются в литом состоянии без термообработки, а их твердость составляет 42–45 HRC.

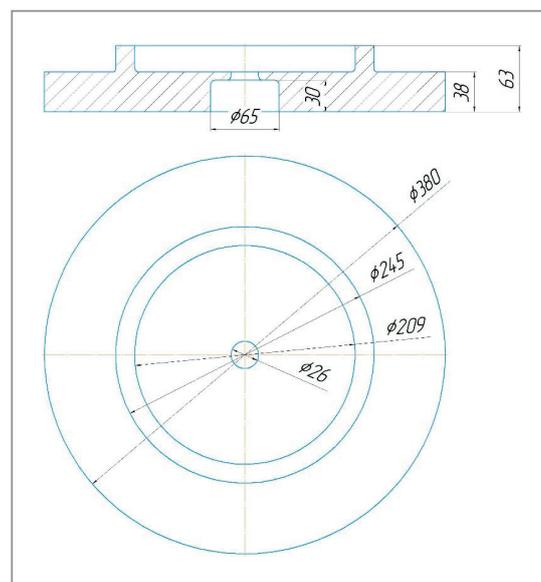


Рис. 1. Чертеж детали «Питающий диск»



а



б

Рис. 2. Деталь «Питающий диск»: а – до эксплуатации; б – после эксплуатации

В то же время в Республике Беларусь для изготовления деталей центробежных дробилок в течение последних 15 лет успешно используется сплав ИЧ320Х18, дополнительно легированный никелем, молибденом, ванадием и вольфрамом [5, 6]. Детали из этого сплава используются как в литом, так и в термообработанном состоянии, имея твердость в литом состоянии при литье в землю 48–52 HRC, а после термообработки – 61–64 HRC. Для изготовления деталей «Питающий диск» Навоийскому заводу был предложен подобный, но более дешевый, чем ИЧ320Х18, сплав ИЧ330Х17Л. Химический состав сплавов ИЧ300Х32Н2М2ТЛ, ИЧ280Х29НЛ и ИЧ330Х17Л приведен в табл. 1. Марки стали приведены согласно принятым обозначениям на Навоийском машиностроительном заводе.

Таблица 1. Химический состав износостойких хромистых чугунов, предназначенных для литья деталей дробильных установок

Номер сплава	Марка чугуна	Содержание химических элементов, мас. %							
		C	Si	Cr	Mo	Ni	Ti	P	S
1	ИЧ300Х32Н2М2ТЛ	2,60	1,2	32,0	1,7	2,1	0,4	0,067	0,032
2	ИЧ280Х29НЛ	2,5	0,6	28,23	–	1,5	–	0,062	0,030
3	ИЧ330Х17Л	3,31	0,65	17	0,4	0,5	–	0,042	0,030

Особенность этих сплавов состоит в том, что все они предназначены для литья конкретной детали. Химический состав их заметно отличается по количеству легирующих элементов. Поскольку задача заключалась в том, чтобы заменить быстроизнашиваемую деталь из дорогих сплавов, химический состав которых принимался на базе импортных чугунов (сплавы 1, 2), на деталь, изготовленную из чугуна собственного производства (сплав 3), то работа была направлена на изучение структуры и свойств чугунов разных марок. При этом необходимо было установить возможные преимущества менее легированного чугуна с точки зрения технологичности изготовления требуемой детали. Из таблицы видно, что содержание никеля, молибдена, титана, хрома в сплаве 3 ниже, чем в сплавах 1 и 2, что обеспечивает его более низкую себестоимость.

Было решено, что отливки после литья будут термообработываться (закалка на воздухе), что позволит повысить твердость и износостойкость без использования значительного количества легирующих элементов [7, 8].

Результаты работы

Плавку чугунов марок ИЧ300Х32Н2М2ТЛ, ИЧ280Х29НЛ, ИЧ330Х17Л проводили в индукционной тигельной печи ИЧТ-2,5. Сплав готовили при температуре 1420 °С, температура заливки жидкого расплава в формы составляла 1380 °С. Для исследований в земляные формы отливали образцы размером 20х20х25 мм. Затем они прошли термическую обработку в лабораторной печи. Режим термообработки показан на рис. 3.

После закалки образцы подвергали низкому отпуску для снятия внутренних напряжений при температуре 180–220 °С в течение 2,5 ч.

После литья и термообработки твердость образцов определяли методом Роквелла, а микротвердость – методом Виккерса. Результаты исследований приведены в табл. 2.

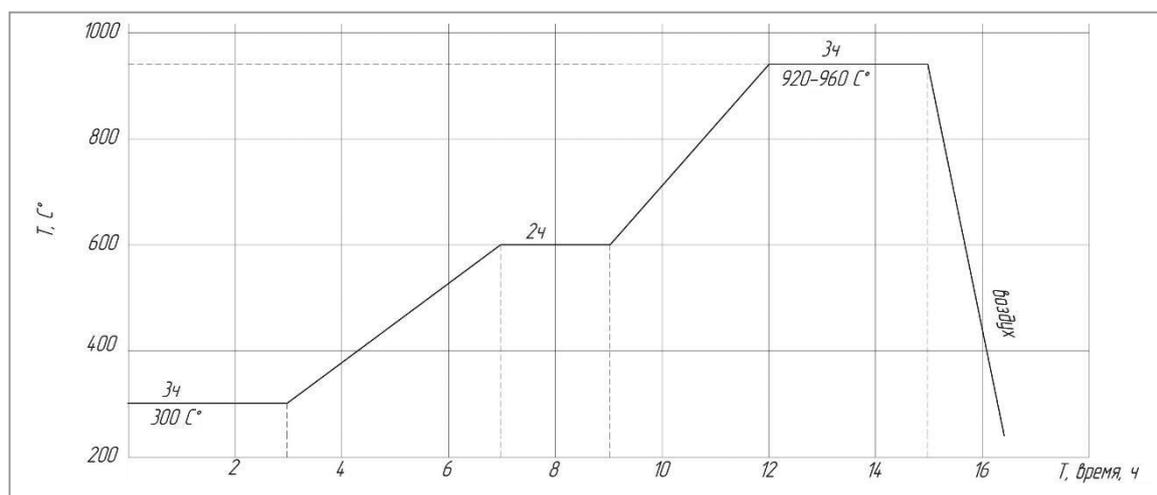


Рис. 3. Режим термообработки отливок

Таблица 2. Результаты исследований образцов сплавов

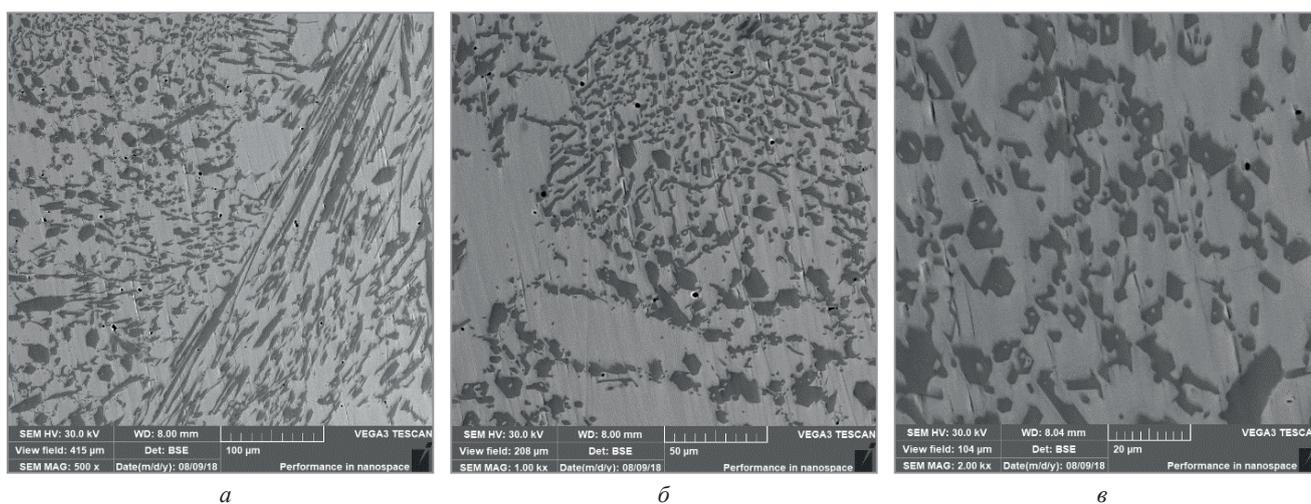
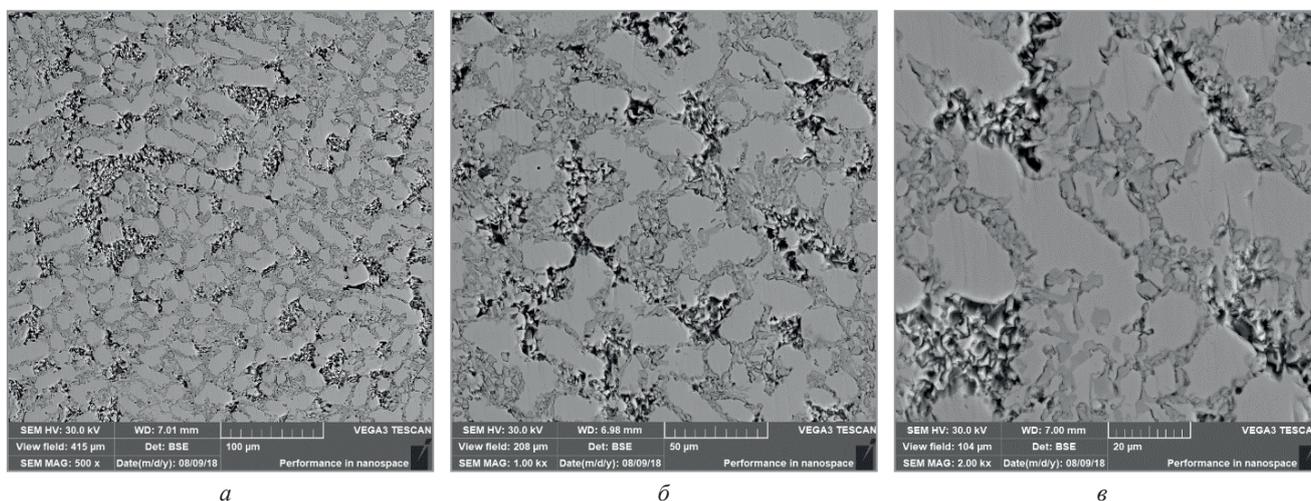
Номер сплава	Сплав	Твердость HRC		Структура металлической матрицы и микротвердость (HV ₅₀) образцов сплавов	
		до термообработки	после термообработки	до термообработки	после термообработки
1	ИЧ300Х32Н2М2ТЛ	52–53	60–62	Троостит, аустенит; 640	Мартенсит; 966
2	ИЧ280Х29НЛ	45–46	53–54	Троостит, аустенит; 541	Мартенсит; 795
3	ИЧ330Х17Л	47–48	59–61	Троостит, аустенит; 580	Мартенсит; 922

Как видно из таблицы, после термической обработки твердость сплавов 1–3 увеличилась на 9–15 единиц в результате перехода от аустенитной металлической матрицы к мартенситной металлической основе. Твердость и микротвердость сплава ИЧ280Х29НЛ повысились незначительно, что свидетельствует о нецелесообразности термообработки.

В результате термообработки твердость и микротвердость сплава ИЧ300Х32Н2М2ТЛ и менее легированного ИЧ330Х17Л значительно выросли и стали практически одинаковыми. Это делает возможным изготовления деталей «Питающий диск» из более дешевого хромистого чугуна ИЧ330Х17Л.

Микроструктура сплавов

Оценку микроструктуры осуществляли с помощью электронной и оптической микроскопии. Для проведения фазового и элементного анализов сплавов использовали методы электронной и оптической микроскопии, рентгеноспектрального и элементного анализов на современном оборудовании НИТУ «МИСиС» (г. Москва). Микроструктуры термически обработанных сплавов представлены на рис. 4–6.

Рис. 4. Микроструктура сплава ИЧ300Х32Н2М2ТЛ: а – $\times 500$; б – $\times 1000$; в – $\times 2000$ Рис. 5. Микроструктура сплава ИЧ280Х29НЛ: а – $\times 500$; б – $\times 1000$; в – $\times 2000$

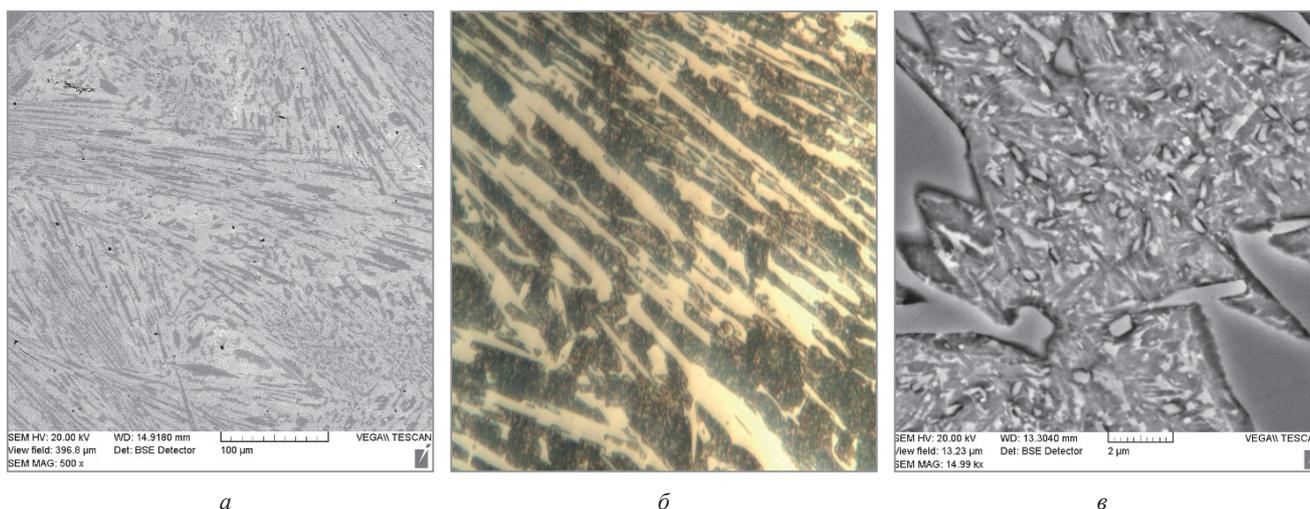


Рис. 6. Микроструктура сплава ИЧ330Х17Л: а – $\times 500$; б – $\times 1000$; в – $\times 15000$

Сравнение микроструктуры сплавов показывает, что сплав ИЧ300Х32Н2М2ТЛ (см. рис. 4) по составу близок к эвтектическому, содержание карбидов в нем составляет 35–37% [1]. Сплав ИЧ280Х29НЛ представляет собой доэвтектический чугун (см. рис. 5), эвтектические карбиды расположены между дендритами первичного аустенита. Содержание карбидов невысокое (30–32%). Сплав ИЧ330Х17Л полностью эвтектический (рис. 6) и содержит 39–40% мелких эвтектических карбидов, равномерно распределенных в металлической матрице. Такая структура более предпочтительна, так как не содержит участков металлической матрицы, не прикрытых карбидами от износа.

При охлаждении металлическая аустенитная матрица становится мартенситной и в ней выделяются вторичные карбиды. Во время термообработки металлическая матрица пересыщена углеродом и хромом, что при охлаждении приводит к выделению вторичных карбидов (рис. 6) [9, 10].

Термообработка отливок

В настоящее время в литературе содержится много информации о термической обработке хромистых чугунов, но она часто противоречива. Поэтому для уточнения режимов термообработки необходимо было провести ряд экспериментов для оптимизации процесса термообработки деталей «Питающий диск» из чугуна марки ИЧ330Х17Л с целью повышения твердости и износостойкости.

В производственных условиях использовали следующую технологию термической обработки отливок.

1. Отливки при загрузке в термическую печь размещали на поддоне рабочими поверхностями вверх.
2. Нагрев отливок под закалку проводили строго с заданной скоростью, учитывая массу, толщину отливок и низкую теплопроводность хромистых чугунов. В противном случае отливки могли разрушиться вследствие неравномерного нагрева, приводящего к возникновению больших термических напряжений. Так как особенно опасен начальный тепловой удар, отливки помещали в печь, нагретую до 300 °С и обеспечивали при этой температуре выдержку 3 ч. Дальнейший нагрев проводили в соответствии с графиком [11].

3. В процессе нагрева при температуре выше 300 °С из аустенита выделяются мелкие вторичные карбиды хрома. Выдержка при температуре 600 °С способствует образованию большого количества вторичных карбидов и в связи с этим обеднению металлической матрицы углеродом и снижению ее стабильности [12].

4. При нагреве отливок до 920–960 °С и в процессе выдержки происходит частичное растворение вторичных карбидов и выравнивание содержания углерода и легирующих элементов в колониях эвтектического аустенита. При последующем резком охлаждении на воздухе аустенит претерпевает мартенситное превращение (закалку) с выделением мартенсита, что способствует значительному повышению твердости и износостойкости хромистых чугунов [13].

После закалки отливки следует подвергнуть низкому отпуску при температуре 180–220 °С в течение 2,5 ч для снятия термических напряжений.

Из сплава ИЧ330Х17Л на Навоийском заводе были отлиты экспериментальные детали «Питающий диск». Для получения отливок использовали технологию литья в песчаные формы с внешним металлическим холодильником (рис. 7).

В изготовленных таким методом отливках была реализована строго направленная перпендикулярно поверхности износа структура, обладающая более высокой износостойкостью (рис. 8).

Детали прошли термообработку по режиму, указанному выше, и были установлены для испытаний в центробежные дробилки. Наилучшие результаты (твердость и износостойкость) были получены при закалке отливок с температуры 920–960 °С. Испытания показали увеличение ресурса работы термообработанных деталей на 35–40% по сравнению с деталями из сплава ИЧ280Х29НЛ [14, 15].

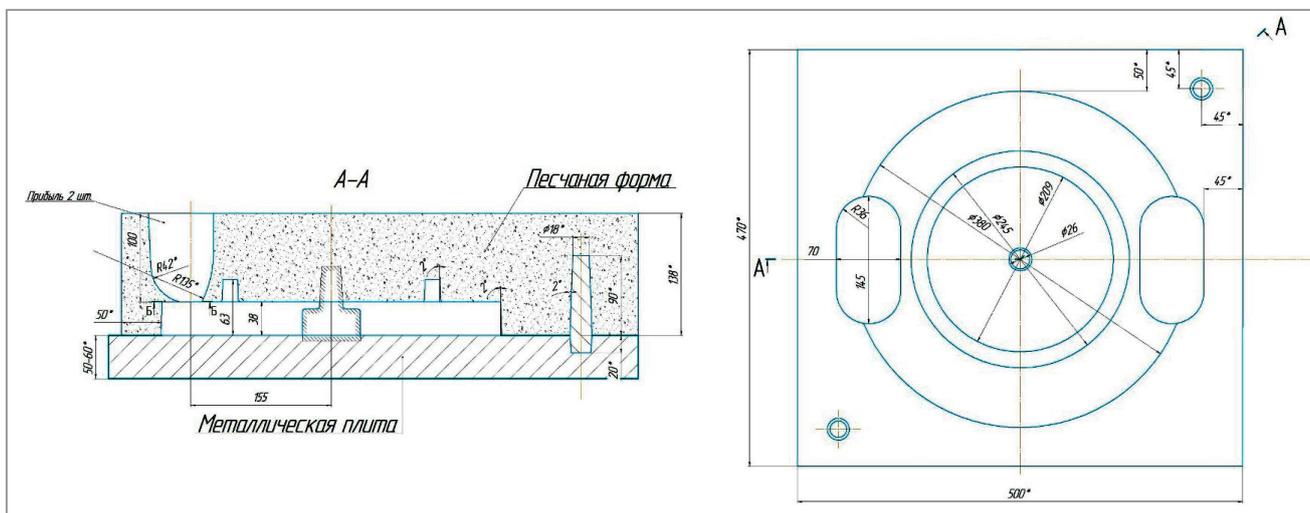


Рис. 7. Литейная форма для изготовления отливок «Питающий диск» с использованием внешнего металлического холодильника

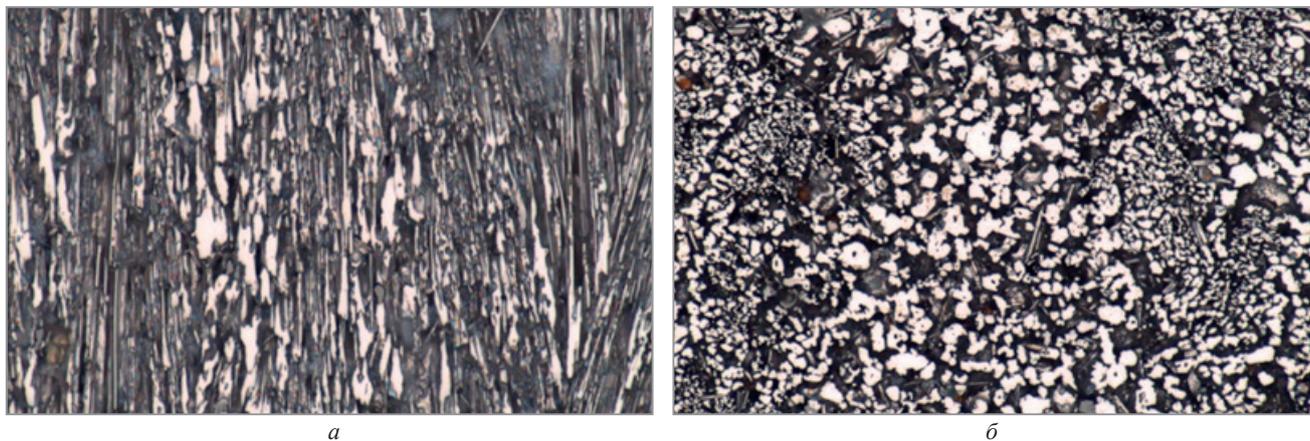


Рис. 8. Структура отливки «Питающий диск»: а – перпендикулярно поверхности износа; б – параллельно поверхности износа

Выводы

1. В литом состоянии структура чугунов марок ИЧ300Х32Н2М2ТЛ, ИЧ280Х29НЛ, ИЧ330Х17Л представляет собой троостит и остаточный аустенит с большим количеством эвтектических колоний на базе карбидов хрома розеточной формы. Из-за высокого содержания хрома повышается устойчивость против распада пересыщенного твердого раствора при охлаждении, вследствие чего в структуре сохраняется до 36% остаточного аустенита.

2. После закалки с охлаждением на воздухе получена однородная мартенситно-карбидная структура в исследуемых чугунах, причем в чугуне марки ИЧ330Х17Л вследствие меньшего содержания хрома распределение карбидов более равномерное по сравнению с чугунами марок 300Х32Н2М2ТЛ и 280Х29НЛ.

3. Исследования позволили определить оптимальную термическую обработку для чугуна ИЧ330Х17Л. Наилучшие результаты (твердость и износостойкость) были получены при закалке отливок с температуры 920–960 °С, твердость отливок после закалки была более 60 HRC.

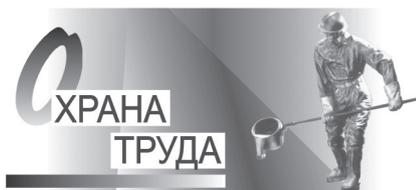
4. Проведенные исследования показали перспективность замены более легированного сплава ИЧ280Х29НЛ на менее легированный сплав ИЧ330Х17Л с последующей термообработкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. М.: Metallurgija, 1983. 176 с.
2. Гарбер М.Е. Износостойкие белые чугуны. М.: Mashinostroenie, 2010. 280 с.
3. Xiang, Ch. & Yanxiang, L. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of high boron white cast iron // *Materials Science and Engineering*. 2010. No 2 (528). P. 770–775.
4. Jumaev A.A. Comparative study of the structure of castings from white wear resistant cast iron // *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. 2018. Vol. 5. No 12. P. 7575–7577.
5. Повышение ресурса работы центробежных дробилок и мельниц. / К.Э. Барановский, В.М. Ильюшенко, В.В. Воробьев и др. // *Центробежная техника – высокие технологии. Материалы 3-й МНТК. Минск: НПО «Центр», 2008. С. 27–28.*
6. Барановский К.Э., Ильюшенко В.М., Станюленис Ю.Л. Литые детали из износостойких хромистых чугунов для центробежных мельниц в комбинированные формы и кокили // *Литье и металлургия*. 2009. № 3. С. 162–165.
7. Gevelmann G., Theisen W. Proc. Int. Conf. on Abrasion Wear Resistant Alloyed White Cast Iron for Rolling and Pulverizing Mills. 2011. P. 171–181.
8. Hashimoto M.: Proc. Int. Conf. on Abrasion Wear Resistant Alloyed White Cast Iron for Rolling and Pulverizing Mills, 2011. P. 183–192.
9. Albertin E., Beneduce F., Matsumoto M., Teixeira I. Optimizing heat treatment and wear resistance of high chromium cast irons using computational thermodynamics. *Wear*. 2011. Vol. 271. P. 1813–1818.
10. Hou Y., Wang Y., Pan Z., Yu L. Influence of rare earth nanoparticles and inoculants on performance and microstructure of high chromium cast iron // *Journal of Rare Earths*. 2012. Vol. 30. P. 283–288.
11. Kopyciński D., Kawalec M., Szczęśny A., Gilewski R., Piasny S. Analysis of the structure and abrasive wear resistance of white cast iron with precipitates of carbides. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2013. Vol. 58. No 3. P. 973–976.
12. Pearce JTH (2002) High-chromium cast irons to resist abrasive wear // *Foundryman*. 2020. No 4 (95). P. 156–166.
13. Sain P.K., Sharma C.P., Bhargava A.K. Microstructure aspects of a newly developed, low cost, corrosion-resistant white cast iron // *Metall Mater. Trans*. 2012. Vol. 44, No 4. P. 1665–1672.
14. Жумаев А., Мансуров Ю., Маматкулов Дж., Абдуллаев К. Фазовые превращения в сплавах железа с углеродом, легированных РЗМ и ПМ // *Черные металлы*. 2020. № 11. С. 22–28.
15. Жумаев А., Мансуров Ю., Маматкулов Дж., Улугов Г. Оптимизация состава и структуры износостойких белых чугунов, используемых в горнодобывающей промышленности // *Черные металлы*. 2020. № 12. С. 4–9.

REFERENCES

1. Cypin I.I. *Belye iznosostojkie chuguny* [Wear resistant white cast irons]. Moscow, Metallurgija Publ., 1983, 176 p.
2. Garber M.E. *Iznosostojkie belye chuguny* [Wear resistant white cast irons]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010, 280 p.
3. Xiang, Ch. & Yanxiang, L. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of high boron white cast iron, *Materials Science and Engineering = Materials Science and Engineering*, 2010, no. 2 (528), pp. 770–775.
4. Jumaev A.A. Comparative study of the structure of castings from white wear resistant cast iron. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology = International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 2018, vol. 5, no.12, pp. 7575–7577.
5. Baranovskij K. Je., Il'jushenko V.M., Vorob'ev V.V. Povyshenie resursa raboty centrobezhnyh drobilok i mel'nic [Increasing the service life of centrifugal crushers and mills.]. *Materijaly 3-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii* [Materials of the 3rd International Scientific and Technical Conference]. *Centrobezhnaja tehnika – vysokie tehnologii = Centrifugal technology – high technology*. Minsk, NPO "Centr" Publ., 2008, pp. 27–28.
6. Baranovskij K. Je., Il'jushenko V.M., Stanjulenis Ju. L. Lit'e detalej iz iznosostojkih hromistyh chugunov dlja centrobezhnyh mel'nic v kombinirovannye formy i kokili [Casting of wear-resistant chromium cast irons for centrifugal mills into combined molds and chill molds]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2009, no.3, pp. 162–165.
7. Gevelmann G., Theisen W. Proc. Int. Conf. on Abrasion Wear Resistant Alloyed White Cast Iron for Rolling and Pulverizing Mills, 2011, pp. 171–181.
8. Hashimoto M.: Proc. Int. Conf. on Abrasion Wear Resistant Alloyed White Cast Iron for Rolling and Pulverizing Mills, 2011. pp. 183–192.
9. Albertin E., Beneduce F., Matsumoto M., Teixeira I. Optimizing heat treatment and wear resistance of high chromium cast irons using computational thermodynamics. *Wear*. 2011, Vol. 271, pp. 1813–1818.
10. Hou Y., Wang Y., Pan Z., Yu L. Influence of rare earth nanoparticles and inoculants on performance and microstructure of high chromium cast iron. *Journal of Rare Earths*, 2012., vol. 30, pp. 283–288.
11. Kopyciński D., Kawalec M., Szczęśny A., Gilewski R., Piasny S. Analysis of the structure and abrasive wear resistance of white cast iron with precipitates of carbides. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2013, vol. 58, no.3, pp. 973–976.
12. Pearce JTH (2002) High-chromium cast irons to resist abrasive wear. *Foundryman*, 2020, no. 4 (95), pp. 156–166.
13. Sain P.K., Sharma C.P., Bhargava A.K. Microstructure aspects of a newly developed, low cost, corrosion-resistant white cast iron. *Metall Mater. Trans*. 2012, vol. 44, no. 4, pp. 1665–1672.
14. Zhumaev A., Mansurov Ju., Mamatkulov Dzh., Abdullaev K. Fazovye prevrashhenija v splavah zheleza s uglerodom, legirovannyh RZM i PM [Phase transformations in iron-carbon alloys doped with REM and PM]. *Chernye metally = Black metals*, 2020, no. 11, pp. 22–28.
15. Zhumaev A., Mansurov Ju., Mamatkulov Dzh., Ulugov G. Optimizacija sostava i struktury iznosostojkih belyh chugunov, ispol'zuemyh v gornodobyvajushhej promyshlennosti [Optimization of the composition and structure of wear-resistant white cast irons used in the mining industry]. *Chernye metally = Black metals*, 2020, no.12, pp. 4–9.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-149-154>
УДК 621.74:658.382

Поступила 12.01.2021
Received 12.01.2021

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ТРУДА РАБОТАЮЩИХ В ЦЕХАХ АЛЮМИНИЕВОГО ЛИТЬЯ

А. М. ЛАЗАРЕНКОВ, И. А. ИВАНОВ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. Тел.+375-29-669-90-98

Приведены результаты исследования условий труда работающих в цехах алюминиевого литья. Результаты проведенных исследований показали, что на рабочих местах отмечаются превышения допустимых значений по шуму, вибрации, содержанию вредных веществ в воздухе рабочей среды, интенсивности инфракрасного (теплого) излучения и температуре воздушной среды, наблюдается воздействие на организм рабочего электромагнитного излучения при обслуживании индукционных печей. Кроме того, к основным вредным производственными факторами можно отнести тяжесть работ и напряженность трудового процесса. Выполнена оценка эффективности действия защитных экранов индукционной тигельной печи ИАТ-6.

Ключевые слова. Условия труда, шум, вибрация, пыль, вредные вещества, литейный цех, электромагнитное излучение.

Для цитирования. Лазаренков, А. М. Исследование условий труда работающих в цехах алюминиевого литья / А. М. Лазаренков, И. А. Иванов // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 149–154. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-149-154>.

STUDY OF WORKING CONDITIONS IN ALUMINUM CASTING SHOPS WORKSITES

A. M. LAZARENKOV, I. A. IVANOV, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti Ave. Tel +375-29-669-90-98

The results of the study of working conditions in aluminum casting shops worksites are presented. The results of these studies showed that in worksites there are exceedance of the permissible limits for noise, vibration, the content of harmful substances in the working environment, intensity of infrared (thermal) radiation and air temperature. There is effect of electromagnetic radiation on the workers during the service of induction furnaces. In addition, the main harmful production factors include the severity of work and the intensity of the labor process. The efficiency of the protective screens of the IAT-6 induction crucible furnace was evaluated.

Keywords. Working conditions, noise, vibration, dust, harmful substances, foundry, electromagnetic radiation

For citation. Lazarenkov A. M., Ivanov I. A. Study of working conditions in aluminum casting shops worksites. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 1, pp. 149–154. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-149-154>

Область применения литых деталей (или деталей, изготавливаемых из отливок) непрерывно расширяется [1]. В некоторых производственных отраслях, например в станкостроении, доля литых изделий достигает 80%. В первую очередь это связано с совершенствованием технологий литейного производства, что позволяет получать более качественные и более точные по размерам и форме отливки [2]. Несмотря на последние технологические достижения, работники литейных цехов по-прежнему подвергаются воздействию вредных факторов, которые влияют на безопасные условия их работы и на здоровье. Поэтому борьба с вредными производственными факторами, сохранение здоровья и благополучия работающих остается одной из основных задач литейного производства [3].

Среди литейных сплавов особое место занимают алюминиевые сплавы. Алюминий и его сплавы характеризуются (в зависимости от их состава) высокой электро- и теплопроводностью, стойкостью к коррозии и пластичностью. Большая часть этих сплавов хорошо поддается штамповке, ковке, волочению, прокатке. Алюминий и ряд его сплавов хорошо подвергаются различным видам сварки. При этом температура плавления сплавов алюминия относительно не высокая. Благодаря этим свойствам использование алюминия и его сплавов увеличивается во всех отраслях мировой экономики [4]. В настоящее время сплавы алюминия широко применяются в машиностроении, самолето- и судостроении, в производстве упаковки, посуды для приготовления пищи и тары.

Условия труда работающих в цехах алюминиевого литья определяются комплексом факторов производственной среды: шумом, вибрацией, вредными веществами, параметрами микроклимата (температура воздуха, интенсивность теплового излучения), электромагнитными излучениями, а также тяжестью и напряженностью трудового процесса [5].

В работе проанализированы технологические процессы, при протекании которых на работающих воздействует наибольшее количество производственных факторов. К таким процессам можно отнести следующие: при изготовлении отливок в кокилях – подготовку кокилей, выплавку металла, заливку металла в кокили, выбивку отливок из кокилей, а при изготовлении отливок на машинах для литья под давлением – подготовку пресс-формы, выплавку металла, заливку металла, извлечение отливок из пресс-форм, обработку отливок. В табл. 1 приведены усредненные значения основных производственных и непроизводственных факторов, определяющих условия труда рабочего-литейщика. При комплексной оценке условий труда необходимо учитывать применяемые технологические процессы, производственное оборудование, характер производства и другие факторы, определяющие каждый отдельно взятый литейный цех или участок.

Таблица 1. Характеристика условий труда работающих в цехах алюминиевого литья

Профессия работающего	Факторы условий труда на рабочих местах						тяжесть и напряженность трудового процесса
	производственные факторы (превышение допустимых значений)						
	шум, дБ	вибрация, дБ	пыль, раз	вредные вещества, раз	инфракрасные излучения, раз	температура воздуха, °С	
Заливщик металла Плавильщик металла и сплавов	2–6			1,2–1,6	1,6–3,4	4–9	Могут вызвать стойкие функциональные изменения в организме, приводящими в большинстве случаев к увеличению производственно-обусловленной заболеваемости.
Литейщик на машинах для литья под давлением	2–5		1,2–1,6		1,6–2,3	2–5	
Наждачник, чистильщик литья	6–9 (12–14)	2–4	2,4–3,7				Могут привести к развитию профессиональных заболеваний легкой и средней степеней тяжести
Транспортировщик, слесарь-ремонтник, слесарь-электрик, контролер в литейном производстве, мастер участка, инженер-технолог	2–8		1,2–1,7	1,1–1,5	1,2–1,7	2–4	Могут вызвать функциональные изменения в организме

Большинство цехов (участков) алюминиевого литья белорусских предприятий оснащены плавильными индукционными тигельными печами максимальной емкостью от 0,4 до 6 т. Это связано с такими достоинствами тигельных плавильных печей, как [6]:

- выделение энергии происходит непосредственно в загрузке, без промежуточных нагревательных элементов;
- интенсивная электродинамическая циркуляция расплава в тигле, обеспечивающая быстрое плавление мелкой шихты, отходов, выравнивание температуры по объему ванны и отсутствие местных перегревов, гарантирующая получение многокомпонентных сплавов, однородных по химическому составу;
- принципиальная возможность создания в печи любой атмосферы (окислительной, восстановительной или нейтральной) при любом давлении;
- высокая производительность благодаря высоким значениям удельной мощности, особенно на средних частотах;
- возможность полного слива металла из тигля и относительно малая масса футеровки печи, что создает условия для снижения тепловой инерции печи благодаря уменьшению тепла, аккумулируемого футеровкой; печи этого типа удобны для периодической работы с перерывами между плавками и обеспечивают возможность быстрого перехода с одной марки сплава на другую;
- простота и удобство обслуживания печи, управления и регулировки процесса плавки, широкие возможности для механизации и автоматизации процесса;
- высокая гигиеничность процесса плавки и незначительное загрязнение воздуха.

Кроме тигельных индукционных печей, в заливочном отделении, как правило, установлены кокильные комплексы и кокильные станки, машины для литья под давлением, стационарные наждачные станки. Технологические операции, выполняемые в плавильных отделениях (основными профессиями работающих являются плавильщик металла и сплавов и заливщик металла), характеризуются выделением вредных веществ в виде пыли и вредных веществ (оксид алюминия, оксид углерода, оксид азота, пыль с содержанием диоксида кремния). Пыль выделяется при навеске и загрузке шихты в плавильные печи, при выплавке металла, обточке отливок, выбивке и ремонте футеровки печей и ковшей [7, 8].

В комплекс производственных факторов, определяющих условия труда указанных профессий, входят уровень шума (на рабочем месте плавильщика у индукционных печей – 82–86 дБ), запыленность воздуха рабочей зоны (в основном без превышения предельно допустимых концентраций), содержание в воздухе рабочей зоны вредных веществ (в зависимости от операции технологического процесса – превышение в 1,2–1,6 раза), температура воздуха (в зависимости от операции технологического процесса – превышение допустимой на 4–9 °С), интенсивность тепловых излучений (при выполнении операций дозагрузки шихты, по наполнению ковшей жидким металлом, снятия шлака с зеркала жидкого металла и разлива металла – превышение в 1,6–3,4 раза). По тяжести и напряженности трудового процесса профессии плавильщика металла и сплавов и заливщика металла оцениваются 2-й степенью класса с вредными условиями труда, которые могут вызвать стойкие функциональные изменения в организме, приводящими в большинстве случаев к увеличению производственно-обусловленной заболеваемости.

На рабочем месте литейщика на машинах для литья под давлением в комплекс производственных факторов, определяющих условия труда этой профессии, входят уровень шума (в зависимости от операции технологического процесса – 82–85 дБ), запыленность воздуха рабочей зоны (в основном находится на уровне предельно допустимых значений, а при применении противопопригарных покрытий пресс-форм может превышать ПДК в 1,2–1,6 раза), содержание в воздухе рабочей зоны вредных веществ (как правило, в пределах допустимых величин), температура воздуха (превышение допустимой на 2–5 °С), интенсивность тепловых излучений (при выполнении операций по наполнению ручных ковшей жидким металлом, снятия шлака с зеркала жидкого металла и от готовых отливок – превышение в 1,6–2,3 раза). По тяжести и напряженности трудового процесса профессия литейщика на машинах для литья под давлением оценивается 2-й степенью класса с вредными условиями труда.

Условия работы наждачника и чистильщика литья оцениваются комплексом производственных факторов, определяющих условия труда на обрубочно-очистном участке, в который входят уровень шума (в зависимости от применяемого оборудования – 86–89 дБ, а при использовании наждачных станков и шлифовальных машинок – 92–94 дБ), уровень локальной вибрации (превышение на 2–4 дБ), запыленность воздуха (превышение ПДК в 2,4–3,7 раза), содержание в воздухе рабочей зоны вредных веществ (в пределах ПДК), температура воздуха на рабочих местах указанных профессий находится в пределах допустимых значений. По тяжести и напряженности трудового процесса вышеуказанные профессии оцениваются 3-й степенью класса с вредными условиями труда, которые могут привести к развитию профессиональных заболеваний легкой и средней степеней тяжести.

Условия труда на рабочих местах таких профессий, как транспортировщик, слесарь-ремонтник, слесарь-электрик по ремонту электрооборудования, контролер в литейном производстве, мастер, инженер-технолог определяются теми же производственными факторами, только характер их воздействия на работающих зависит от длительности нахождения на рабочих местах у конкретного оборудования. По тяжести и напряженности трудового процесса вышеуказанные профессии оцениваются 1-й степенью класса с вредными условиями труда, которые могут вызвать функциональные изменения в организме.

Для снижения значений выделенных при анализе производственных факторов на рабочих местах рассматриваемых выше профессий предусматривают следующие мероприятия:

- плавильные отделения размещают в наиболее высоких пролетах с подветренной стороны здания для предупреждения попадания газов и нагретого воздуха в другие отделения цеха;
- используется высокоэффективная очистка от пыли и вредных отходящих газов от плавильных печей (пылесосные камеры, рукавные фильтры);
- предусматривается механизация и автоматизация технологических процессов;
- в качестве мер защиты от интенсивных тепловых излучений предусматриваются теплоизоляция нагретых поверхностей, экранирование источников тепловых излучений, воздушное душирование,

использование спецодежды, спецобуви, а также применение индивидуальных средств защиты (каска, специальные защитные очки, защитные щитки);

- для снижения уровней вибрации предусматриваются виброизолирующий фундамент, герметичные изолирующие коврики, индивидуальная защита (специальные антивибрационные рукавицы, обувь с амортизированными подошвами);
- устранение непосредственного контакта рабочих с материалом и готовой продукцией, отходами производства;
- автоматическое управление плавильными печами;
- наличие систем сигнализации, извещающих о нарушении технологического процесса или условий безопасности труда.

Особым вредным производственным фактором является длительное воздействие на организм человека электромагнитного излучения. Источниками электромагнитного поля в цехе служат плавильные индукционные печи. Электромагнитное поле от промышленного оборудования вызывает нарушение жизненно важных органов и систем человека (мозга, сердца, сосудов, нервов, работы легких, желудочно-кишечного тракта и др.) [9]. Однако особенность данного вредного фактора состоит в том, что оно не имеет внешнего зрительного проявления и может длительное время не ощущаться работником.

Поглощаемая тканями человека энергия электромагнитного поля превращается в теплоту, что может привести к повышению температуры тела. Перегрев особенно вреден для тканей со слаборазвитой сосудистой системой или с недостаточным кровообращением (глаза, мозг, почки, желудок, желчный пузырь). При действии поля происходит поляризация макромолекул тканей и ориентация их параллельно электрическим силовым линиям, что может привести к нарушению функций сердечно-сосудистой системы и обмена веществ [9].

Таким образом, электромагнитные поля снижают работоспособность, повышают утомляемость, вызывают головные боли, бессонницу, изменение кровяного давления и пульса. Допустимой величиной напряженности является значение 5 кВ/м при воздействии весь рабочий день. При более высоких значениях напряженности необходимо снижать время воздействия электромагнитного поля на работающих [10].

Существенным фактором, влияющим на напряженность магнитных полей индукционных плавильных печей, являются экранирующие магнитопроводы, наличие которых в конструкции печи необходимо. Для защиты работающих от электромагнитных излучений применяются заземленные экраны, коврики, устанавливаемые на пути излучения. Магнитопроводы позволяют уменьшить влияние магнитного поля на обслуживающий персонал, работающий вблизи индукционных установок для нагрева заготовок, на 20–70%.

Эффективность действия защитных экранов проверена на расчете экрана индукционной тигельной печи ИАТ-6, который обеспечивает защиту плавильщика от электромагнитных излучений. Напряженность электрического поля на участке не превышает 5 кВ/м. В табл. 2 приведены данные для расчета экрана индукционной печи.

Т а б л и ц а 2. Исходные данные для расчета экрана индукционной печи

Характеристика печи	ИАТ-6
Мощность печи (максимальная), кВт	1900
Напряжение сети, В	380
Частота тока, Гц	60
Рабочая частота f , Гц	2700
Сила тока в катушке I , А	200
Число витков W , шт	12
Размер рабочего пространства, м:	
диаметр D	0,6
высота H	0,8
радиус катушки a , м	0,32

Глубину проникновения электромагнитного поля в экран определяли по формуле

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu_3 \cdot \sigma_3 \cdot \pi \cdot f}} = \frac{1}{\sqrt{1,65 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^7 \cdot 3,14 \cdot 2600}} = 0,0024 \text{ м,}$$

где σ_3 – удельная проводимость материала экрана, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$: $\sigma_3 = 1 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$;

$\mu_{\text{Э}}$ – абсолютная магнитная проницаемость материала экрана, Гн/м: $\mu_{\text{Э}} = \mu_0 \mu_{\text{Э}}^1$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$;
 $\mu_{\text{Э}}^1$ – относительная магнитная проницаемость;
 f – рабочая частота, Гц, $f = 2700$.

Принимаем толщину экрана $d = 3$ мм. Радиус экрана $a = 0,32$ м.

Требуемую эффективность экранирования $\text{Э}_{\text{ТР}}$ находим путем деления величины напряженности поля, создаваемого катушкой на рабочем месте без экрана $H_{\text{Р}}$, на величину допустимой напряженности поля $H_{\text{Н}}$, равной 25 А/м.

Значение $H_{\text{Р}}$ определяем по формуле

$$H_{\text{Р}} = \frac{W \cdot I \cdot a^2}{4p^3} = \frac{12 \cdot 200 \cdot 0,32^2}{4 \cdot 0,4^3} = 960 \text{ А/м,}$$

где p – расстояние от катушки до рабочего места.

Требуемая эффективность экранирования равна

$$\text{Э}_{\text{ТР}} = 20 \lg \left(\frac{H_{\text{Р}}}{H_{\text{Н}}} \right) = 20 \lg \left(\frac{960}{25} \right) = 31,69 \text{ дБ.}$$

Фактическую величину эффективности экранирования находим по формуле

$$\text{Э} = 20 \lg \left(\frac{a \cdot e^{\frac{d}{\delta}}}{2\sqrt{2} \cdot \delta \cdot \mu_{\text{Э}}^1} \right) = 20 \lg \left(\frac{0,32 \cdot 2,72^{\frac{0,003}{0,0024}}}{2\sqrt{2} \cdot 0,0024 \cdot 1,65} \right) = 40,16 \text{ дБ.}$$

Фактическая величина эффективности экранирования превышает требуемую эффективность экранирования. Следовательно, рассчитанный экран индукционной тигельной печи ИАТ-6 обеспечивает необходимую защиту от электромагнитных полей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Витязь, П. А.** Анализ состояния литейных производств Республики Беларусь/П.А. Витязь, А.В. Толстой, М.А. Садох // Литье и металлургия. 2019. № 3. С. 35–40.
2. **Мельников, А. П.** Новые научно-технические разработки для модернизации и технического перевооружения литейных производств/ А. П. Мельников, М. А. Садох // Литье и металлургия. 2011. № 3. С. 7–10.
3. **Лазаренков, А. М.** Анализ производственных факторов литейных цехов/ А. М. Лазаренков, С. А. Хорева// Тр. 24-й междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2016. Беларусь», Минск, 19–21 октября 2016. С. 117–120.
4. Литейное производство в мире и некоторых странах СНГ // Металлургический бюллетень. <https://www.metalbulletin.ru>.
5. **Лазаренков, А. М.** Условия труда работающих в литейных цехах/ А. М. Лазаренков// Литье и металлургия. 2018. № 4. С. 160–164.
6. **Иванова, Л. И.** Индукционные тигельные печи / Л. И. Иванова, Л. С. Грובה, Б. А. Сокунов, С. Ф. Сарапулов. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2002. 87 с.
7. **Лазаренков, А. М.** Влияние пыли в воздухе рабочих мест на профессиональную заболеваемость работающих в литейных цехах/ А. М. Лазаренков, С. А. Хорева// Тр. 24-й междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2016. Беларусь», Минск, 19–21 октября 2016. С. 115–116.
8. **Лазаренков, А. М.** Прогнозирование содержания вредных веществ в воздухе рабочих зон участков литейных цехов / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева, В. В. Мельниченко // Литье и металлургия. 2012. № 3. С. 79–81.
9. **Утепова, А. Б.** Электромагнитное излучение индукционной магнитной печи <https://mosinductor.ru/info/articles/elektromagnitnoe-izluchenie-induktsionnoy-pechi/>
10. Анализ опасных и вредных производственных факторов в литейном производстве <http://metodichka.x-pdf.ru/15stroitelstvo/65578-3-analiz-opasnih-vrednih-proizvodstvennih-faktorov-liteynom-proizvodstve-metodicheskie-ukazaniya-dlya-studentov-special.php>

REFERENCES

1. **Vitjaz' P.A., Tolstoj A.V., Sadoha M.A.** Analiz sostojanija litejnyh proizvodstv Respubliki Belarus' [Analysis of the state of the foundries of the Republic of Belarus]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 3, pp.35–40.
2. **Mel'nikov A.P., Sadoha M.A.** Novye nauchno-tehnicheskie razrabotki dlja modernizacii i tehničeskogo pereosnashhenija litejnyh proizvodstv [New scientific and technical developments for modernization and technical re-equipment of foundries]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 3, pp.7–10.
3. **Lazarenkov A. M., Horeva S.A.** Analiz proizvodstvennyh faktorov litejnyh cehov [Analysis of production factors of foundries]. Trudy 24-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2016. Belarus'», Minsk, 19–21 oktjabrja 2016 [Proceedings of the 24th International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2016. Belarus”, Minsk, 19–21 October 2016]. Minsk, 2016, pp. 117–120.

4. <https://www.metalbulletin.ru>.
5. **Lazarenkov A.M.** Uslovija truda rabotajushhih v litejnyh cegah [Working conditions of workers in foundries]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 4, pp. 160–164.
6. **Ivanova L.I., Grobova L.S., Sokunov B.A., Sarapulov S.F.** *Indukcionnye tigel'nye pechi* [Induction crucible furnaces]. Ekaterinburg, UGTU-UPI Publ., 2002. 87 p.
7. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A.** Vlijanie pyli v vozduhe rabochih mestah na professional'nuju zaboлеваemost' rabotajushhih v litejnyh cegah [Influence of dust in the air at workplaces on the occupational morbidity of workers in foundries]. Trudy 24-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2016. Belarus'», Minsk, 19–21 oktjabrja 2016 [Proceedings of the 24th International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2016. Belarus», Minsk, 19–21 October 2016]. Minsk, 2016, pp. 115–116.
8. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A., Mel'nichenko V.V.** Prognozirovanie sodержanija vrednyh veshhestv v vozduhe rabochih zon uchastkov litejnyh cehov [Prediction of the content of harmful substances in the air of working areas of foundry sections]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 3, pp. 79–81.
9. <https://mosinductor.ru/info/articles/elektromagnitnoe-izluchenie-induktsionnoy-pechi/>
10. <http://metodichka.x-pdf.ru/15stroitelstvo/65578-3-analiz-opasnih-vrednih-proizvodstvennih-faktorov-liteynom-proizvodstve-metodicheskie-ukazaniya-dlya-studentov-special.php>



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-155-167>
УДК 669.1

Поступила 07.02.2021
Received 07.02.2021

ИТОГИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ ПОДПРОГРАММЫ «МЕТАЛЛУРГИЯ» В 2016–2020 ГГ. И ПЕРСПЕКТИВЫ НА 2021–2025 ГГ.

П. А. ВИТЯЗЬ, А. В. ТОЛСТОЙ, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: labmetal@rambler.ru

Представлены основные результаты выполнения заданий подпрограммы «Металлургия», полученные организациями Национальной академии наук Беларуси, Министерства образования и Министерства промышленности Республики Беларусь. Показан их вклад в решение научных и практических задач в области металлургии.

Приведены перспективные разработки, предлагаемые к выполнению в 2021–2025 гг., направленные на оптимизацию действующих литейных производств, повышение качества выпускаемой продукции, снижение производственных затрат, обеспечение максимальной загрузки литейных мощностей.

Ключевые слова. Металлургия, литье, термообработка, поверхностное упрочнение, обработка давлением.

Для цитирования. Витязь, П. А. Итоги выполнения заданий подпрограммы «Металлургия» в 2016–2020 гг. и перспективы на 2021–2025 гг. / П. А. Витязь, А. В. Толстой // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 155–167. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-155-167>.

THE RESULTS OF THE TASKS OF THE SUBPROGRAM “METALLURGY” OBTAINED IN 2016–2020 AND PROSPECTS FOR THE YEARS 2021–2025

P. A. VITYAZ, A. V. TOLSTOY, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str. E-mail: labmetal@rambler.ru

The main results of the tasks of the subprogram “Metallurgy” obtained by the organizations of the National Academy of Sciences of Belarus, the Ministry of Education and the Ministry of Industry of the Republic of Belarus are presented. Their contribution to the solution of scientific and practical problems in the field of metallurgy is shown.

The article presents promising developments proposed for implementation in 2021–2025, aimed at optimizing existing foundries, improving the quality of products, reducing of production costs, and ensuring maximum utilization of foundry capacities.

Keywords. Metallurgy, casting, heat treatment, surface hardening, pressure treatment.

For citation. Vityaz P. A., Tolstoy A. V. The results of the tasks of the subprogram “Metallurgy» obtained in 2016–2020 and prospects for the years 2021–2025. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 1, pp. 155–167. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-155-167>.

В [1–5] были представлены результаты выполнения заданий подпрограммы «Металлургия» в 2005–2015 гг. В 2016–2020 гг. в рамках подпрограммы «Металлургия» ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» были продолжены работы, направленные на разработку технологий литья черных и цветных металлов и сплавов; создание утеплительных смесей, специальных красок, модификаторов на базе ультрадисперсных частиц, моделирование процессов формообразования, разработку технологий обработки давлением, термической обработки металлов и сплавов.

Подпрограмма включала четыре раздела:

- Литье и металлургия железоуглеродистых сплавов.
- Литье цветных металлов и сплавов.
- Термическая обработка и упрочнение сталей и сплавов.
- Обработка металлов давлением.

В реализации заданий подпрограммы принимали участие 13 организаций, в том числе 6 – НАН Беларуси, 12 – Министерства образования Республики Беларусь, 1 – Министерства промышленности Республики Беларусь.

В ходе выполнения заданий подпрограммы получены следующие основные результаты.

В области литья и металлургии железоуглеродистых сплавов

Белорусским национальным техническим университетом разработан экспериментальный состав утеплительной экзотермической смеси с ультрадисперсными частицами и проведено его промышленное опробование. Показаны преимущества использования экзотермической смеси для открытых прибылей, которые заключаются в уменьшении брака отливок, вызванного дефектами усадочного характера, повышении качества отливок, уменьшении прибыльной части на 20–30%, что приводит к снижению себестоимости готовой продукции. Опробование в производственных условиях на ОАО «Белоозерский энергомеханический завод» и ОАО «Могилевлифтмаш» показало, что эффективность экспериментального модификатора выше, чем применяемых на заводе модификаторов производства Российской Федерации.

Разработана технология получения алюминиевых гранул из отходов алюминия. Подтверждена способность к разжижению рафинировочных шлаков у раскислительной смеси, полученной из отходов переработки вторичного алюминия, что позволяет отказаться от использования для этих целей плавикового шпата, повысить стойкость футеровки сталеразливочного ковша в районе шлакового пояса, снизить затраты на внепечную обработку стали и улучшить экологическую обстановку. В условиях Молдавского металлургического завода проведены испытания по использованию алюминиевых гранул, полученных из отходов производства по сухой технологии, для раскисления стали при выпуске из печи и проверена эффективность разработанных разжижителей рафинировочного шлака.

Выполнены моделирование гидродинамических процессов и анализ эффективности конструкции литниково-питающих систем, предназначенных для получения отливок-заготовок обрабатывающего инструмента и оснастки. Изготовлены экспериментальные образцы режущих вставок РКС-1 и ДВ-22 резцов горнопроходческих комбайнов из сталей ледебуритного класса Р6М5 и Р18, испытанных в производственных условиях ОАО «Белкалий» с положительным результатом. Полученные результаты позволяют существенно повысить качество и ресурс металлообрабатывающего инструмента и технологической оснастки.

Разработана технология ввода в композиционный материал упрочненных быстроохлажденных гранул. Разработана технологическая схема получения композитов и создан комплексный аппарат на основе индукционной установки для управления процессом получения композита. Он позволяет эффективно управлять процессом нагрева исходных компонентов до температуры плавления бронзы, осуществлять пропитку полученной жидкой фазой армирующих железоуглеродистых гранул, последующую выдержку, а также удалять образовавшиеся газы в процессе охлаждения композита по заданному режиму. Проведенные исследования позволили определить режимы синтеза износостойкого композиционного материала с макрогетерогенной структурой для подшипников скольжения, который характеризуется высокими физико-механическими и триботехническими свойствами при работе в условиях удельных нагрузок до 450 МПа.

Сформулирована математическая модель процесса затвердевания заготовки в условиях МНЛЗ, включающая уравнения теплопроводности, движения расплава в жидком ядре заготовки, массообмена. Достоинством данной модели является возможность более точного учета особенностей конструкции МНЛЗ и технологии непрерывной разливки. С использованием разработанной методики определены границы интенсивности внешних динамических воздействий. При разливке стали на блюмовых МНЛЗ в зоне перемешивания температура перегрева расплава не должна превышать 30 °С. При этом максимально допустимая скорость циркуляции (интенсивность воздействия) составит около 0,4 м/с; для сортовых (мелкосортных) машин скорость циркуляции ограничена диапазоном 0,5–1,0 м/с.

Разработана экспериментальная методика определения угара легирующих элементов и примесей при проведении серии опытных плавов в индукционных тигельных печах повышенной частоты, проведены натурные исследования по определению угара элементов при выплавке многокомпонентных высоколегированных железоуглеродистых сплавов. Результаты исследований использованы при разработке технологических инструкций по выплавке износостойких чугунов в индукционной тигельной печи в производственных условиях. Исследованы факторы, влияющие на угар металлошихты и выход годного в электродуговых печах. Определены оптимальные технологические схемы получения легированной стали различных марок в цикле выплавка – внепечная обработка с целью получения максимальных качественных показателей и заданных качественных показателей при минимальной себестоимости продукции.

Разработан состав и выпущена опытная партия комплексного модификатора с ультрадисперсными тугоплавкими компонентами для внепечной обработки стали с целью совершенствования структуры и свойств слитков и отливок. Комплексное модифицирование смесью, содержащей химически активные

вещества (Са), карбидообразующие (В) и поверхностно-активные (Ві), позволяет устранить транскристаллизацию, значительно измельчить первичные зерна, не оказывая существенного влияния на прочность стали после термообработки, при этом повысить характеристики пластичности, уменьшает ликвацию серы по сечению отливок и слитков.

Разработаны и внедрены технологические инструкции диспергирования и модифицирования отходов твердого сплава ВК6 и изготовления из них электроконтактным спеканием режущих вставок, фильер. С учетом реальной стоимости сырья (модифицированный из отходов порошок ВК6 дешевле первичного (импортного) ВК6 более чем в 2,9 раза), более дешевой технологии изготовления (ЭКС против спекания в вакууме) очевидна перспективность технологий модифицирования твердосплавной стружки и ее электроконтактного спекания для получения режущих вставок токарных резцов, правящих и направляющих фильер (а также других изделий). Для 11 организаций-потребителей из модифицированных отходов твердого сплава методами электроконтактного спекания, газопламенного и плазменного напыления и наплавки изготовлены экспериментальные партии деталей машин и металлургического оборудования (18 типоразмеров). Объем поставок в 2020 г. составил 58 000,76 руб.

Разработана технологическая схема глубокой переработки оловянно-свинцовой изгари за счет использования предварительного избирательного размола с последующей фильтрацией жидкого расплава от примесей меди и получение качественной лигатуры на основе олова. В лабораторных условиях отработаны технологические процессы получения и применения лигатур при получении литейных сплавов. По разработанной технологии глубокой переработки оловянно-свинцовой изгари изготовлена промышленная партия лигатуры на основе олова в количестве 773 кг.

Исследовано влияние раскислительно-модифицирующих композиций для стали на базе вторичного алюминия и отсевов модификаторов, содержащих щелочноземельные металлы (Са, Ва, Sr) в условиях ОАО «МТЗ». Применение раскислительно-модифицирующих композиций, опробованных на ОАО «МТЗ» для стали 45Л и на УПП «Универсал-Лит» для стали 20ХНМФЛ, позволило повысить предел текучести в 1,2–1,3 раза, относительное удлинение – в 1,3–1,4 раза, ударную вязкость – более чем в 1,5 раза. Полученные свойства стали соответствуют уровню получаемой при обработке сталей более дорогой смесью «БАРС» производства РФ.

По результатам металлографического и дюрOMETрического методов анализа образцов из наномодифицированной стали ледебуритного класса зафиксирован эффект дисперсионного твердения при отпуске отливок непосредственно после литья, минуя операцию закалки. Изготовлены литые заготовки из наномодифицированной стали Р6М5 переплавом отходов инструментального производства, инструмент из них (фрезы) испытаны в производственных условиях ОАО «МЗШ» с положительным результатом. Технология изготовления цельнолитых резцов вместо комбинированных с режущими вставками из быстрорежущих сталей и твердых сплавов в мировой практике горнодобывающих отраслей предлагается впервые. Внедрение технологии позволит значительно снизить себестоимость резцов за счет сокращения объема механической обработки (изготовление режущих вставок, корпусов резцов, запрессовывания, напайки или посадки).

Установлено влияние редкоземельных металлов (церия, иттрия, наноструктурированного диборида титана), вводимых в расплав в качестве модификаторов, на структуру и ударную вязкость литых бористых сплавов с высоким содержанием бора. Модификаторы способствуют эффективному диспергированию структурных составляющих сплавов (измельчение первичных зерен, составляющих эвтектики), что приводит к существенному повышению ударной вязкости.

Совместно с Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси разработаны рекомендации по изготовлению детали «Колесо рабочее» грунтовых насосов точным литьем. Полученные отливки обладают значительно лучшим качеством поверхности каналов по сравнению с отливками, изготавливаемыми по стандартным технологиям. Показано, что повысить износостойкость грунтовых насосов можно за счет применения нового инновационного материала – эвтектического легированного чугуна. Сплав имеет высокую твердость до 750 НV, содержит повышенное (до 42–45%) количество карбидов и более высокую (в 2 раза) износостойкость, чем стандартный заводской чугун ИЧХ28Н2.

Совместно с Физико-техническим институтом и Институтом порошковой металлургии НАН Беларуси синтезированы разделительные покрытия с использованием ранее не применяемых наполнителей – гранитоидных, базальтовых и диабазовых пород в композиции с металлофосфатным связующим. Экспериментально подтверждена их пригодность при литье алюминиевых сплавов. Определены основные факторы, обеспечивающие необходимую седиментационную устойчивость суспензий: дисперсность

наполнителя (не более 10–20 мкм), количественное содержание алюмофосфатного связующего и суспензирующих добавок – каолина или бентонита (3–5%). Разработанные покрытия прошли производственные испытания в цехе алюминиевого литья ОАО «Управляющая компания холдинга «Минский моторный завод» с положительными результатами.

Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси разработан способ магнитного контроля структуры материала движущегося ферромагнитного изделия. Способ снижает энергопотребление контроля и упрощает его реализацию в промышленных условиях. Эта разработка реализована при эксплуатации автоматизированного участка сортировки чугунных ниппелей в литейном цехе серого и ковкого чугуна Минского завода отопительного оборудования.

Белорусским государственным технологическим университетом разработаны процессы получения комплексного металлургического сырья из железо- и углеродсодержащих отходов. Окусковывание мелкофракционных и тонкодисперсных компонентов позволяет обеспечить предприятия дополнительными ресурсами железосодержащих материалов и уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду. Разработаны шихтовые и литейные материалы из тонкодисперсных металлосодержащих концентратов и полимерных отходов для легирования и модифицирования железоуглеродистых сплавов, поверхностного легирования отливок в форме (патенты Республики Беларусь № 11641, 14183). В составе пакетов предполагается использовать все виды тонкодисперсных железо-флюсо-легиру-углеродсодержащих материалов. Промышленные испытания метода с вводом шихтовых пакетов из железосодержащих и полимерных отходов и результаты исследований выплавленных сплавов, шлаков, материального баланса плавки показывают, что при использовании в составе пакетов в качестве восстановителя отходов аккумуляторных (тяжелых) пластиков повышаются механические характеристики чугуна с $\sigma_B = 165$ до $\sigma_B = 75$ МПа при вводе 10 кг окалина, 3,4 кг цемента, 0,39 кг аккумуляторного полимера на 412 кг расплава.

ОАО НПО «Центр» выполнены работы по построению конечно-элементной модели кокиля с использованием пакета «CosmosDesignStar». Проведен расчет гидродинамических процессов заполнения кокиля расплавом в модуле «Flow Vision» пакета «Полигон». Получена картина возможных усадочных дефектов в объеме отливки, образовавшихся в процессе кристаллизации расплава в кокиле. Показано, что применение указанных мероприятий позволило уменьшить объем прибыли на 30–35%, что повысило выход годного литья и дало возможность снизить расход дорогостоящих легирующих материалов для их компенсации при угаре во время плавки и разливки.

В области литья цветных металлов и сплавов

Институтом технологии металлов НАН Беларуси исследовано влияние металлургических и технологических параметров литья на образование глобулярного кремния в полых фасонных заготовках из силумина, полученных в металлические охлаждаемые формы. Установлено, что при литье полых фасонных отливок в спрейерно-охлаждаемую литейную форму при расходе охладителя 1,4 м³/ч размеры кристаллов эвтектического кремния в сплаве АК14 измельчаются на 81%, параметр глобулярности уменьшается на 77% по сравнению с литьем в воздушно-охлаждаемую литейную форму. Показано, что с уменьшением толщины стенки стальной литейной формы с 15 до 10 мм размеры кристаллов эвтектического кремния в сплаве АК14 измельчаются на 65%, параметр глобулярности уменьшается на 58%.

Разработана и создана опытная установка и технологическая оснастка для получения полых фасонных заготовок из силуминов с глобулярным кремнием. Изготовлена охлаждаемая металлическая литейная форма для получения полых фасонных цилиндрических отливок с наибольшим наружным диаметром 145 мм и высотой 80 мм. Литьем в металлическую охлаждаемую форму были получены экспериментальные образцы полых фасонных отливок из силумина АК14 с глобулярным эвтектическим кремнием.

Разработаны процессы литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) для ряда деталей из алюминия. Проведено моделирование ЛГМ для деталей простых форм.

Разработана и изготовлена технологическая оснастка и макет опытно-экспериментальной плавильно-литейной установки непрерывного литья вверх. Разработана физическая модель теплообменных процессов, возникающих в процессе контакта расплава и формирующейся отливки с формообразующей частью кристаллизатора, частично погруженного в расплав. Получены опытные партии алюминиевой катанки, которые прошли успешные испытания на действующем производстве ООО «ПО «Энергокомплект». Реализован договор на разработку и поставку промышленного оборудования для непрерывного литья вверх алюминиевой катанки диаметром 9,5 мм для ООО «ПО «Энергокомплект».

Исследовано влияние низкочастотной вибрации глухонного кристаллизатора с затопленно-струйной системой охлаждения на микроструктуру и качество отливок из силумина АК18М2. Исследовано влияние схемы вибрации и температуры заливки на структуру и свойства отливок из доэвтектического, эвтектического и заэвтектического силумина диаметром 53 мм, а также эвтектического силумина диаметром 70 мм. Литьем в глухонный кристаллизатор с применением пневматического вибратора постоянного удара, расположенного в вертикальной плоскости кристаллизатора, получены опытные отливки наружным диаметром 53 мм из доэвтектического силумина АК9М2, эвтектического силумина АК12М2 и заэвтектического силумина АК15М2. Проведены сравнительные триботехнические исследования опытных образцов из силумина АК12М2 наружным диаметром 70 мм, полученные литьем в глухонный кристаллизатор без вибрации и с применением пневматического вибратора постоянного удара, и образцов из бронзы БрОЦС 5-5-5 и БрОЦС 4-4-17.

Физико-техническим институтом НАН Беларуси методами компьютерного моделирования установлены особенности распределения температурных и электромагнитных полей при индукционной термообработке деталей, изготовленных из трубных заготовок. Выполнен анализ температурных полей и энергетических параметров индукционной термообработки типовых трубных деталей (ось, вал, шток). Разработаны оптимальные режимы скоростной индукционной термообработки данных сталей. Разработана лабораторная технология индукционной обработки деталей, произведенных из трубных заготовок. Разработаны макет и компоновочное решение установки автоматизированной термообработки длинномерных трубных деталей.

Совместно с Институтом порошковой металлургии и Белорусским национальным техническим университетом отработана технология получения катодов-мишеней из различных силицидов. Получены заготовки мишеней с относительной плотностью 88–89% из резистивного сплава РС 1004. На основании анализа зависимости относительной плотности прессовок от температуры спекания определены оптимальные режимы их спекания. Разработаны рекомендации по применению мишеней при изготовлении изделий электронной техники. Разработана технология изготовления мишеней для вакуумно-плазменного нанесения высокостабильных резистивных покрытий на основе силицидов металлов с использованием лигатур системы кремний – металл методом импульсного прессования. Разработаны режимы изготовления высокоомных мишеней на основе литейных лигатур с содержанием кремния больше 50 мас. %, обеспечивающие получение заготовок мишеней с отклонением плотности по высоте и диаметру заготовки менее 1,5–3,0%.

Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси установлена зависимость изменения структуры алюминий-кремниевого сплава АК12М2МгН и его свойств от количества модифицирующей добавки и морфологии используемого углеродного наноматериала, в качестве которого могут выступать неочищенные углеродные нанотрубки (УНТ), фуллеренсодержащая сажа (ФСС), алмазографитная шихта, графеноподобный углерод. Разработана лабораторная технология комплексного модифицирования эвтектического силумина АК12М2МгН добавкой, содержащей УНТ и медь. Это позволило увеличить твердость в 1,2 раза, предел прочности – в 1,3 раза, относительное удлинение – более чем в 2 раза, а также снизить коэффициент трения в 8–10 раз, интенсивность изнашивания – в 5–7 раз. Разработанная технология модифицирования алюминий-кремниевых сплавов углеродными наноматериалами позволяет повысить механические и триботехнические свойства алюминий-кремниевых сплавов при введении малого количества добавки, до 0,5 мас. %, и может использоваться на металлургических заводах при изготовлении деталей и конструктивных элементов двигателей внутреннего сгорания, получаемых литьем. Комплексное повышение свойств силуминов позлит использовать указанные сплавы для изготовления слабо- и средненагруженных втулок и подшипников взамен более дорогостоящих, стальных или на основе медных сплавов.

Белорусским национальным техническим университетом разработана литейная технология получения материалов с макроготерогенной структурой на основе цветных металлов с высокими функциональными свойствами. Изучено влияние первичных и вторичных матричных сплавов на ряд свойств композиционных материалов, предназначенных для использования в узлах трения машин, работающих в тяжелых условиях эксплуатации, что позволяет уменьшить себестоимость изготавливаемой продукции на 30–35% при сохранении требуемого качества получаемых изделий. В лабораторных условиях опробована экспериментальная технология заливки нового типа форм.

Приведены критерии оценки выбора целесообразности модернизационных мероприятий с точки зрения окупаемости проектов модернизации. Проанализированы основные реконструктивные

мероприятия, повышающие эффективность работы топливных и электрических термических (химико-термических) печей. Разработана методика выбора оптимальной степени рекуперации теплоты отходящих газов для топливных печей, позволяющая минимизировать издержки на топливо и конструкцию и обслуживание рекуператора. Предложен критерий выбора нагревательных элементов, учитывающий как конструкцию, так и способы размещения. Разработана методика, позволяющая оценивать равностоимостные коэффициенты полезного действия для топливных и электрических печей, эксплуатируемых при различных режимах работы (в одну, две и три смены и при различных коэффициентах загрузки оборудования), различных тарифах и способах оплаты за электроэнергию и принимать решение об использовании того или иного типа отопления. Предложены принципы регулирования технологическим процессом в печах химико-термической и термической обработки. Разработаны функциональные схемы управления тепловой нагрузкой и составом атмосферы печей химико-термической обработки.

На основе учета физико-химических и тепловых процессов определены пределы изменения общего КПД электрических печей, печей с комбинированными источниками и печей, работающих в дуплекс-процессах в зависимости от условий их работы. Проведены обоснование наиболее эффективного использования электрических печей (электродуговых, индукционных тигельных, индукционных канальных) в процессах плавки чугуна и анализ их эффективности в сравнении с коксовыми и коксогазовыми вагранками. Определена зависимость экономического эффекта использования топлива в электрических печах от коэффициента использования топлива и повышения производительности при различных значениях амортизационных отчислений и тарифов на электрическую энергию и топливо.

Исследованы закономерности формирования механических свойств сталей, применяемых при изготовлении деталей подшипников, после их карбонитрации, азотирования и карбидизации. Установлены эффективные режимы ХТО, подобраны составы насыщающих сред и режимы насыщения сталей различного химического состава и структурных классов для упрочнения рабочих поверхностей стальных деталей подшипников для их работы в условиях экстремальных нагрузок. Предложены составы поверхностных слоистых систем на основе термодиффузионных карбонитридных, нитридных и карбидных слоев и ионно-плазменных нитридных и углеродных алмазоподобных покрытий. Их использование позволяет повысить микротвердость в 2,1–4,4 раза и износостойкость – в 1,8–3,1 раза для систем с покрытием TiAlN, микротвердость – в 1,9–5,3 раза и износостойкость – в 2,1–3,7 раза для систем с алмазоподобным покрытием по сравнению с образцами из закаленной и отпущенной стали ШХ15. Разработана технология комплексного поверхностного упрочнения колец подшипников из стали У8А как замена стали ШХ15 для их работы в условиях экстремальных контактных нагрузок, которая включает химико-термическую обработку и нанесение твердого или сверхтвердого нитридного вакуумного ионно-плазменного покрытия.

Разработаны пути интенсификации процессов термоциклического азотирования, что позволило повысить скорость формирования азотированного слоя на 15–20% при сохранении микротвердости поверхности. Установлено влияние лазерного оплавления на микроструктуру, фазовый состав и свойства азотированного слоя на легированных сталях, что позволило определить эффективные режимы лазерной обработки азотированных сталей для повышения микротвердости поверхности в 1,4–1,6 раза. Разработан режим термоциклического азотирования, который позволяет получать твердый и износостойкий диффузионный слой с равномерным распределением твердости по сечению образца. При этом толщина слоя составляет до 0,5 мм.

В области термической обработки и упрочнения сталей и сплавов

Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси установлены зависимости, связывающие конструктивно-технологические параметры процесса электрофрикционного плакирования гибким инструментом (ЭФПИ) и тепловое состояние материала покрытия и контактирующего с ним ворса щетки, отличающиеся от известных учетом дополнительного тепла, возникающего от электрического тока. Это позволяет обоснованно выбрать рациональные режимы формирования покрытий методом ЭФПИ. В результате эксплуатационных испытаний в условиях ОАО «МЗАЛ им. П. М. Машерова» установлено, что функциональное покрытие из твердого сплава ВК8 обеспечивает повышение стойкости деталей пресс-форм в расплаве сплава ЦА4М1 в среднем в 1,9 раза по сравнению с деталями без покрытия.

Разработана методика выбора экономолегированной конструкционной стали для высоконапряженных зубчатых колес регламентированной долговечности. Установлено оптимальное содержание

легирующих элементов (никель, марганец, углерод, хром), а также добавок, измельчающих и стабилизирующих зерно, например, ниобия и азота, в конструкционной стали с регламентированной прокаливаемостью. Сформулированы основные факторы влияния ниобия на структурные превращения в легированных конструкционных сталях. К ним относятся процессы аустенизации, рекристаллизации, роста зерна, фазовых переходов, выделения фаз. Формирование высоких механических свойств в сталях сложного состава связано с влиянием ниобия, которое определяет объемное содержание и стабильность остаточного аустенита.

Совместно с Физико-техническим институтом НАН Беларуси выполнено исследование прокаливаемости новой экономнолегированной стали. Установлено, что новая сталь характеризуется высокой закаливаемостью цементованного слоя и приемлемой прокаливаемостью сердцевины (300 HV_{0,2}). В диапазоне содержания углерода 0,5–0,8 прокаливаемость цементованного слоя составляет 800–900 HV_{0,2}. Разработаны технологические параметры вакуумной химико-термической обработки зубчатых колес из новой марки стали, которые значительно отличаются от технологических параметров для стали 20ХН3А. В результате сокращения времени цементации снижается стоимость производства (сокращается расход газа и электроэнергии и пр.) и повышается производительность при изготовлении цементованных деталей. Годовой экономический эффект при снижении потребления электроэнергии от повышения температуры цементации до 1030 °С на вакуумном оборудовании фирмы «ModulTherm 7/1» составила 70 тыс. руб.

В области обработки металлов давлением

Физико-техническим институтом НАН Беларуси разработаны конструкторская документация индукционного нагревателя и технологический процесс применительно к изготовлению изделий типа ножей кормоуборочной техники. Проведены испытания экспериментальных образцов деталей на соответствие устойчивости к ударным нагрузкам и абразивному изнашиванию. Утверждены комплекты документов на технологические процессы изготовления деталей: нож косилочный поворотный ФТИ5.001.1572-ТД, нож косилочный ФТИ5.001.1592-ТД. Конструкторская и технологическая документация переданы ОАО «Минский агросервис».

Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси выполнено технологическое обоснование снижения деформаций и остаточных напряжений после термической обработки маложестких деталей типа дисков и валов с использованием динамической стабилизации на основе знакопеременного циклического. Технологическое обоснование снижения деформаций и остаточных напряжений маложестких деталей типа дисков и валов позволяет для такого типа деталей аналитическим путем определять режимы циклического знакопеременного нагружения и по расчетным параметрам этого нагружения с учетом конструктивных особенностей проектировать установки для реализации динамической стабилизации без проведения длительного и затратного цикла экспериментальных исследований. Результаты исследования использованы при выполнении договора с ЗАО «САБА МАШИНИНГ САЛЮШЕНС» (Российская Федерация) при расчете силовых параметров установок для динамической стабилизации дисков АО «Уралвагонзавод». В дальнейшем результаты исследования планируется использовать на ОАО «БелАЗ», ОАО «Муромтепловоз», АО «Концерн Калашников».

Разработаны основные положения использования циклического нагружения для исправления геометрической формы и снятия остаточных напряжений в бесшовных кольцах методом кольце-раскатки. Положения представлены в методике расчета силовых параметров установок с циклическим нагружением. Методика содержит основные положения по составу и последовательности проведения расчета силовых параметров установок для повышения геометрической точности и снятия остаточных напряжений применительно к различным типам колец с использованием циклического нагружения. В методике даны способы расчета силовых параметров установок для реализации динамического нагружения с применением двух разных типов механизмов: клиновым механизмом и рычажно-шарнирным. Для ускорения выполнения расчетов силовых параметров экспандирования с рычажно-шарнирным механизмом разработано программное обеспечение в системе Microsoft Excel, с использованием которого выполнен расчет силовых параметров экспандирования для группы колец малой жесткости (30 наименований) из номенклатуры колец ОАО «БелАЗ». При выполнении расчетов силовых параметров экспандирования использовались параметры прочности материала колец при различных температурах. Методика предназначена для использования при проведении научно-исследовательских и экспериментальных работ, связанных с разработкой методов

повышения геометрической точности и снятия остаточных напряжений в деталях типа маложестких колец, изготавливаемых с использованием горячей кольцераскатки. Разработанные параметры и положения циклического нагружения для обеспечения геометрической точности и эксплуатационных показателей деталей типа колец могут быть предложены для использования на предприятиях отечественного машиностроения ОАО «МПЗ», холдинг ОАО «БелАЗ» при производстве бесшовных колец методом радиально-осевой кольцераскатки.

Разработаны технологические схемы получения алюминиевых покрытий методом многослойной центробежной наплавки, позволяющие формировать двухслойные покрытия с использованием горизонтальной и вертикальной осей вращения, различающиеся между собой по кинематическому исполнению и направлению действующих сил. Разработаны основополагающие способы нанесения многослойной индукционной наплавки покрытий из композиций на основе алюминиевых сплавов, представляющие собой нанесение двухслойных покрытий на стальную основу путем формирования промежуточного слоя из материала, например свинца, на котором формируется основной слой алюминиевого покрытия. Изготовлена и испытана опытная партия деталей (втулок № 90.31.00.062 подбивочных блоков путевых машин ВПР и гаек № ВПО.55.70.08 подъема электромагнитов путевой машины ВПО основного производства эксплуатационного республиканского унитарного предприятия «Центр механизации путевых работ Белорусской железной дороги») с покрытиями, нанесенными из материалов и по технологии, разработанной в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси. Срок службы биметаллических деталей с двухслойными покрытиями из состава антифрикционного материала, включающего композицию в виде кусочков проволоки силумина со свинцовым порошком ПС1, разработанных в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, в 1,15–1,20 раза выше, чем у серийных деталей. Результаты исследований обоснован, откорректирован и стендовыми испытаниями подтвержден оптимальный состав композиции и разработанный оптимальный состав для нанесения покрытий с повышенной износостойкостью и адгезионной прочностью (75% силумина марки АК12 + 25% порошка свинца ПС1). Разработаны методические рекомендации по внедрению в производство технологии нанесения на стальные изделия композиций на основе алюминиевых сплавов методом многослойной индукционной наплавки в поле центробежных сил.

Гомельским государственным техническим университетом им. П. О. Сухого определена степень влияния скорости грубого волочения проволоки на обрывность металлокорда, получаемого из этой проволоки. Получена зависимость для коэффициента, влияющего на обрывность металлокорда и зависящего от скорости грубого волочения. Получено значение коэффициента, влияющего на обрывность металлокорда и зависящего от дополнительного латунирования проволочной заготовки. Установлена зависимость величины микротвердости проволоки из сталей 80 и 90 от степени деформации проволоки на отдельных этапах свивки металлокорда. Определено, что для повышения производительности свивки металлокорда требуется привести зависимость роста твердости и эквивалентных напряжений в проволоках металлокорда к линейному виду путем изменения скорости свивки на отдельных ее этапах. Разработана методика расчета оптимальной величины единичной вытяжки тонкого волочения в производстве сверх-, ультра- и мегапрочного металлокорда, позволяющая выполнять процесс тонкого волочения проволоки с оптимальной интенсивностью упрочнения.

Совместно с Физико-техническим институтом НАН Беларуси на основе анализа влияния системы калибровки прокатных валков на напряженно-деформированное состояние трубной заготовки и анализа влияния калибровки прокатных валков на геометрию черновой трубы определена наиболее эффективная система калибровки прокатных валков пяти клетей раскатного стана: круг, овал, овал, круг, круг. Найденная система калибровки прокатных валков позволяет повысить равномерность контактных напряжений в очаге деформации и точность профиля черновой трубы. Разработана зависимость, определяющая соотношение скоростей инструмента и трубы, обеспечивающее минимальный износ инструмента. Разработаны рекомендации по корректировке настроечных параметров раскатного стана с целью снижения износа прокатного инструмента, который влияет на качество поверхности черновой трубы.

Проведено исследование разработанных калибровок валков для прошивки сплошной заготовки в гильзу методом поперечно-винтовой прокатки. Калибровки предназначены для изменения напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при прошивке на более благоприятное (снижение объемов областей с растягивающими напряжениями). Исследованы грибовидные

валки (базовый вариант), валки с кольцевой калибровкой и валки с двойным пережимом. Валки с кольцевой калибровкой и валки с двойным пережимом позволяют провести большую проработку металла в очаге деформации. Это способствует изменению схемы напряженно-деформированного состояния на более благоприятную (валки с двойным пережимом позволяют добиться большей эффективности). Также изменение пластического течения металла при использовании разработанных калибровок приводит к увеличению энергосиловых параметров, необходимых для проведения операции прошивки.

Разработана численная модель редуцирования горячедеформированных бесшовных стальных труб, позволяющая производить оценку напряженно-деформированного, теплового состояния заготовки в процессе прокатки. Определено влияние деформационных режимов редуцирования на распределение напряжений, возникающих в заготовке в процессе прокатки, и степень неравномерности деформации стенки получаемого трубного профиля. Определено, что повышению точности трубного профиля и снижению напряжений в заготовке в процессе редуцирования способствует режим прокатки при коэффициенте пластического натяжения в диапазоне 0,6–0,8. Разработана методика определения деформационных, геометрических и скоростных параметров редуцирования горячедеформированных бесшовных стальных труб, способствующих повышению точности геометрических параметров трубных профилей и снижению неравномерности деформации сечения трубы. Разработаны зависимости для определения частоты вращения прокатных труб с учетом влияния растяжения трубы между клетями. Разработаны рекомендации по корректировке настроечных параметров раскатного и редуцирующе-растяжного стана, режиму термообработки в производстве трубы 93,17×12,45 мм из стали марки ТТ309, обеспечивающие снижение неравномерности деформации трубы и трещинообразования. Практическая направленность результата состоит в повышении эффективности производства бесшовных горячедеформированных труб путем снижения брака вследствие трещинообразования при термообработке. Результаты предназначены для использования на ОАО «БМЗ–УКХ«БМК».

Совместно с Белорусским государственным технологическим университетом методом сканирующей электронной микроскопии с микрорентгеноспектральным анализом исследованы микрохимический состав и структурное состояние полутеплостойких хромистых сталей класса X12M для инструментальной и технологической оснастки после термической обработки на различных режимах, подвергнутых ионно-плазменному азотированию. Выявлен механизм взаимодействия карбидной фазы и твердого раствора в исследованных образцах при действии на них пульсирующих контактных напряжений и определена роль карбидной фазы в процессе структурных изменений в поверхностном слое металла при его изнашивании под действием пульсирующих контактных напряжений. Исследованы механизм и закономерности изнашивания поверхностных слоев высоколегированных инструментальных сталей X12M, X12MФ и P18 при действии на них пульсирующих контактных напряжений с амплитудой 1300 и 1640 МПа. Показано, что традиционная термическая обработка с последующей низкотемпературной нитроцементацией не обеспечивает высокой износоустойчивости полутеплостойких штамповых сталей. Модернизация режимов термохимической обработки позволила приблизить структуру и свойства упрочненных слоев сталей X12M и X12MФ к показателям азотированных слоев стали P18 и обеспечить возможности для равноценной замены дорогостоящей быстрорежущей стали более дешевыми и менее трудоемкими в термохимической обработке штамповыми сталями при изготовлении из них штампового инструмента в металлургической промышленности.

Белорусским национальным техническим университетом выполнены исследования напряженно-деформированного состояния в очаге деформации от параметров процесса продольной прокатки бывших в употреблении рельсов. Создан метод построения поля линий скольжения при продольной прокатке путем решения задачи определения контактных напряжений методом верхнеграницной оценки. Спроектирован инструмент для производства заготовок рабочих элементов шаровых мельниц из бывших в употреблении железнодорожных рельсов методом продольной прокатки. Разработана технология получения шаров для помола из бывших в употреблении железнодорожных рельсов методами прокатки для ОАО «Кобринский инструментальный завод «СИТОМО».

Проведена теоретическая проработка новой технологии изготовления изделия «Шкворень». В ходе новой технологии производится горячая валково-клиноватая прокатка локально нагретого участка заготовки с передачей заготовки в 2-позиционный штамп для осадки и гибки. Формирование поковки «Шкворень» позволит обеспечить получение изделия с коэффициентом использования металла до 97–99%,

снижение энергозатрат на 60%, повышение производительности в 2,5 раза по сравнению с действующей молотовой технологией. Новая технология позволяет уйти от сложной и энергозатратной молотовой технологии изготовления изделия «Шкворень».

Определены закономерности угла инструмента поперечно-клиновой прокатки на усилия деформации заготовки и критерии разрушения материала заготовки. Вычислены необходимые теоретические усилия оборудования для закрытой штамповки, подобраны компенсационные магазины и предохранительные механизмы, проведен компьютерный анализ процесса закрытой штамповки, осуществлен подбор оборудования по энергосиловым параметрам, созданы трехмерные компьютерные модели штамповой оснастки. Совместное использование технологии поперечно-клиновой прокатки и закрытой штамповки открывает возможности для создания ресурсосберегающих технологий, повышения уровня проработки геометрических особенностей заготовок, промежуточных этапов и их взаимосвязи. Практическое применение данной технологии позволяет добиться коэффициента использования металла 92–95%. Данного рода технологии могут использоваться для производства изделий машиностроения и тракторостроения.

В 2021–2025 гг. работы будут продолжены в рамках подпрограммы «Металлургия», которая является составной частью государственной программы научных исследований «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» на 2021–2025 гг. Структура подпрограммы оптимизирована. Теперь она содержит 17 комплексных заданий, содержащих 42 НИР.

Подпрограмма «Металлургия» направлена на научное обеспечение технического переоснащения и модернизацию литейных производств (в соответствии с Программой развития литейных производств Республики Беларусь на 2017–2030 годы, утвержденной Министром промышленности 30.12.2017 г.), термических и других энергоемких производств.

Главными направлениями проведения исследований по подпрограмме будут:

- оптимизация действующих литейных производств, повышение качества выпускаемой продукции, снижение производственных затрат, обеспечение максимальной загрузки литейных мощностей;
- технологии литья черных и цветных металлов и сплавов, математическое моделирование процессов затвердевания, формообразования;
- технологии выплавки, обработки давлением, термической обработки металлов и сплавов;
- процессы формообразования, снижения деформаций и ряд других проектов.

В ходе реализации заданий подпрограммы будут:

1. Разработаны новые методы выбора оптимальных технологических решений в условиях литейных, металлургических и термических производств, научные основы получения аустенитных высокопрочных чугунов с использованием литья, деформации и изотермической закалки, конкурентных легированным сталям.
2. Предложены методы рециклинга дисперсных металлических отходов для создания функциональных материалов и покрытий.
3. Разработаны технологии получения новых литых композиционных материалов, сплавов и покрытий с высокой конкурентоспособностью.
4. Предложены новые ресурсосберегающие импортозамещающие литейные технологии, позволяющие использовать местное вторичное сырье для создания высококачественных литейных изделий со специальными свойствами.

В первую очередь разработки будут направлены на решение задач, актуальных для ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» и предприятий, входящих в состав холдинга «Белорусская металлургическая компания». В частности, предполагается:

- оптимизация технологии нанесения покрытий;
- определение и внедрение различных типов модификаторов поверхности бортовой бронзированной проволоки и металлокорда с целью увеличения адгезионных свойств к резине;
- разработка новых экономнолегированных сталей.

Научные разработки будут содействовать выпуску новой промышленной продукции, улучшению ее качества и срока эксплуатации, содействовать модернизации производства. Снижение импортозависимости, увеличение экспорта, использование вторичного сырья для производства научно-технической продукции – эти факторы лежат в основе укрепления национальной безопасности и улучшения качества жизни населения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Витязь П. А., Шипко А. А., Толстой А. В.** Программа «Металлургия» – важное звено научного обеспечения программы технического переоснащения энергоемких производств Республики Беларусь // *Литье и металлургия*. 2009. № 1. С. 123–128.
2. **Витязь П. А., Шипко А. А., Толстой А. В.** Программа «Металлургия» – итоги и перспективы // *Литье и металлургия*. 2011. № 1. С. 6–11.
3. **Витязь П. А., Шипко А. А., Толстой А. В.** Исследования в области металлургических переделов, выполненные в рамках подпрограммы «Металлургия» в 2011–2015 годах. Часть 1. Разработки в области литья и металлургии железоуглеродистых и цветных металлов и сплавов // *Металлургия в машиностроении Беларуси: итоги и перспективы научного обеспечения*. Минск: Беларуская навука, 2016. С. 308–324.
4. **Витязь П. А., Шипко А. А., Толстой А. В.** Исследования в области металлургических переделов, выполненные в рамках подпрограммы «Металлургия» в 2011–2015 годах. Часть 2. Результаты в области термической обработки и обработки металлов давлением // *Металлургия в машиностроении Беларуси: итоги и перспективы научного обеспечения*. Минск: Беларуская навука, 2016. С. 330–355.
5. **Витязь П. А., Шипко А. А., Толстой А. В.** Особенности подпрограммы «Металлургия» на 2016–2020 годы // *Металлургия в машиностроении Беларуси: итоги и перспективы научного обеспечения*. Минск: Беларуская навука, 2016. С. 355–369.

REFERENCES

1. **Vitjaz' P.A., Shipko A.A., Tolstoj A.V.** Programma «Metallurgija» – vazhnoe zveno nauchnogo obespechenija programmy tehničeskogo pereosnashhenija jenergoemkih proizvodstv Respubliki Belarus' [The Metallurgy program is an important part of the scientific support of the program of technical re-equipment of energy-intensive industries of the Republic of Belarus]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2009, no.1, pp. 123-128.
2. **Vitjaz' P.A., Shipko A.A., Tolstoj A.V.** Programma «Metallurgija» – itogi i perspektivy [Metallurgy Program-results and prospects]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2011, no.1, pp. 6–11.
3. **Vitjaz' P.A., Shipko A.A., Tolstoj A.V.** *Issledovanija v oblasti metallurgičeskikh peredelov, vypolnennye v ramach podprogrammy «Metallurgija» v 2011 – 2015 godah. Chast' 1. Razrabotki v oblasti lit'ja i metallurgii zhelezouglerodistykh i cvetnykh metallov i spлавov* [Research in the field of metallurgical processing carried out within the framework of the “Metallurgy” subprogram in 2011-2015. Part 1. Developments in the field of casting and metallurgy of iron-carbon and non-ferrous metals and alloys // Metallurgy in mechanical engineering of Belarus: results and prospects of scientific support] *Metallurgija v mashinostroenii Belarusi: itogi i perspektivy nauchnogo obespechenija*: Minsk. Belaruskaja navuka Publ., 2016. Pp. 308–324.
4. **Vitjaz' P.A., Shipko A.A., Tolstoj A.V.** *Issledovanija v oblasti metallurgičeskikh peredelov, vypolnennye v ramach podprogrammy «Metallurgija» v 2011 – 2015 godah. Chast' 2. Rezul'taty v oblasti termičeskoj obrabotki i obrabotki metallov davleniem* [Research in the field of metallurgical processing carried out within the framework of the “Metallurgy” subprogram in 2011-2015. Part 2. The results in the field of heat treatment and processing of metals by pressure]. *Metallurgija v mashinostroenii Belarusi: itogi i perspektivy nauchnogo obespechenija = Metallurgy in machine-building in Belarus: results and prospects of scientific support*, Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2016, pp. 330-355.
5. **Vitjaz' P.A., Shipko A.A., Tolstoj A.V.** *Osobennosti podprogrammy «Metallurgija» na 2016-2020 gody* [Features of the Metallurgy subprogram for 2016-2020]. *Metallurgija v mashinostroenii Belarusi: itogi i perspektivy nauchnogo obespechenija = Metallurgy in machine-building in Belarus: results and prospects of scientific support*, Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2016, pp. 355-369.

XV МЕЖДУНАРОДНЫЙ СЪЕЗД ЛИТЕЙЩИКОВ И МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЮБИЛЕЙНЫЙ ФОРУМ ЛИТЕЙЩИКОВ СТРАН БРИКС

Российская ассоциация литейщиков при поддержке Министерства промышленности и торговли РФ проводит XV Международный съезд литейщиков и Международный Юбилейный Форум литейщиков стран БРИКС в г. Москве с 8 по 10 июня 2021 г. на ЦВК «Экспоцентр» на Красной Пресне в период проведения Международной выставки «ЛИТМАШ-2021».

Программой съезда предусмотрено проведение пленарного и секционных заседаний с докладами ведущих специалистов и ученых России и зарубежных стран по всем переделам литейного производства, круглых столов, организация деловых встреч, обмен опытом, посещение предприятий.

Секция № 1 «Черные и цветные сплавы»

Плавильные агрегаты, технология плавки и внепечной обработки, шихтовые материалы, модифицирование, рафинирование и фильтрация, охрана труда и техника безопасности, технико-экономические и экологические показатели. Механические и эксплуатационные свойства сплавов, дефекты в отливках и методы их предотвращения, контрольно-измерительная техника.

Секция № 2 «Изготовление литейных форм и стержней»

Машины, механизированные и автоматические линии для изготовления форм и стержней, выбивки и очистки отливок. Технологические процессы изготовления форм из песчано-глинистых и холоднотвердеющих смесей, изготовления стержней по горячей и холодной оснастке, краски и связующие материалы, литниковые системы, оснастка, технико-экономические и экологические показатели.

Секция № 3 «Специальные виды литья»

Литье по выплавляемым и газифицируемым моделям, центробежное, кокильное, непрерывное литье, литье под низким и высоким давлением. Компьютерное моделирование литейных процессов, 3D-технологии, технико-экономические и экологические показатели.

К XV съезду литейщиков будут изданы труды, материалы для публикации которых необходимо представить до 30 апреля 2021 г. в электронном виде объемом не более 6 страниц текста и 3 рис.

Подготовленные публикации направлять по электронной почте на адрес lityo2021@mail.ru.

С подробными сведениями о выставке «ЛИТМАШ-2021» можно ознакомиться также на сайте www.ruscastings.ru.

**ЛИТЬЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ – МЕЖДУНАРОДНЫЕ ВЫСТАВКИ И ЯРМАРКИ В 2021 г.
FOUNDRY AND METALLURGY – INTERNATIONAL EXHIBITIONS AND FAIRS IN 2020**

№	Наименование мероприятия	Место проведения, даты	Сайт
1	Алюминий Индия 2021 Aluminium India 2021	г. Бубанесвар, Индия 3 – 6 февраля	www.aluminium-india.com
2	Промышленность литья иковки 2021 Foundry Diecasting & Forge Industry Exhibition 2021	г. Гуанчжоу, Китай 3 – 5 марта	www.cantonfair.net/event/2517-guangzhou-international-foundry
3	Конференция по высокоэнтропийным сплавам ICANEA 2021 Conference on advances in high-entropy alloys	г. Лондон, Великобритания 15 – 16 марта	https://waset.org/advances-in-high-entropy-alloys-conference
4	ЛИТМЕТЭКСПО – 2021 Международная выставка литейного производства и металлургических технологий LITMETEXPO – 2021 International trade fair of foundry and metallurgical technologies	г. Минск, Беларусь 6 – 9 апреля	alimrb@tut.by metal@minskexpo.com
5	АЛЮМИНИЙ 2021 Производство, технологии и оборудование для обработки ALUMINIUM 2021 Production, technologies and equipment	Дюссельдорф, Германия 18 – 20 мая	www.readexpo.de www.aluminium-exhibition.com/en/aluminium
6	Металл + металлургия Китай Шанхай 2021 Metal + metallurgy China Shanghai 2021	г. Шанхай, Китай 26 – 29 мая	https://www.tradefairdates.com/Metal-Metallurgy-China
7	Металлургия Россия и Литмаш Россия Metallurgy Russia and Litmash Russia	г. Москва, Россия 8 – 10 июня	www.metallurgy-russia.com/
8	КАСТФОРДЖ 2021 Технологии литья иковки THE CASTFORGE 2021 Casting and Forge Technologies	г. Штутгарт, Германия 8 – 10 июня	www.castforge.de/2021
9	Литейные технологии и литье под давлением, Корея Die casting & foundry, Korea	г. Кинтекс, Ю.Корея 9 – 11 июня	https://10times.com/die-casting-korea
10	МЕТЕФ 2021: Технологии алюминия, литья и новых материалов METEF 2021: Technology for the Aluminum, Foundry Castings & innovative Metals Industry	г. Болонья, Италия 10 – 12 июня	www.metef.com/eng/to_exhibit/metef_2021
11	Международная выставка по обработке металлов МЕТАЛЭКСПО 2021 International Metalworking Fair METALEXPO 2021	г. Париж, Франция 21 – 24 сентября	www.reedexpo.fr
12	МЕТАЛЛИ Выставка литейных технологий METAL Foundry Technology	г. Кельце, Польша 19 – 21 октября	biuro@targikielce.pl
13	74 Всемирный конгресс литейщиков «Литье будущего» 74th World Foundry Congress “Cast the Future”	г. Бусан, Ю. Корея 16 – 20 октября	Предварительное планирование
14	XXIX Международная выставка «Литейное производство и металлургия 2021. Беларусь» XXIX International Exhibition “Foundry Production and Metallurgy 2021.Belarus”	г. Минск, Беларусь 17 – 19 ноября	alimrb@tut.by

В связи с пандемией возможно изменение сроков некоторых мероприятий. Белорусские предприятия и организации, заинтересованные в посещении выставок и ярмарок, могут обращаться в Ассоциацию литейщиков и металлургов Республики Беларусь (г. Минск, ул. Я. Коласа, 24-8м, alimrb@tut.by, тел/факс +375 17 331-11-16).



Поэтическая страничка

О ЖИЗНИ

Говорят, что жизнь – это способ
 существования белковых тел.
 Но тогда жить будет тот,
 кто кого-то умертвил и съел.

Такая научная точка зрения
 очень широко распространена:
 принято считать, что человек
 и животные – это белковые тела.

Известно, что они состоят из клеток.
 Им необходимы постоянные обновления.
 Но от этого процесса не должна зависеть
 система телесного управления.

Для этого нужны стабильные носители
 информации и программное обеспечение.
 Они должны быть независимыми от тела,
 чтобы осуществлялось его управление.

Этими функциями обладает душа.
 Она работает автономно и стабильно.
 Душа использует энергию жизни,
 которая дается Богом очень обильно.

Бог – творец любой жизни.
 Она является на самом деле
 способом существования
 души в управляемом ею теле.

Владимир Стеценко

О СМЕРТИ

Мудрость: «Memento Mori» –
 Помните о своей смерти,
 и не будет большого горя
 в вашей жизни – поверьте.

Если смерть абсолютна
 и нет никакой милости,
 тогда жизнь бессмысленна
 и нет вообще справедливости.

Если человек бессмертен,
 и нет Божьего наказания,
 то своим беззакониям
 люди найдут оправдания.

Смерть – это страх Божий.
 Он не делает людей глухими,
 а заставляет учить законы Бога
 и жить в соответствии с ними.

Смерть ограничивает свободу
 людей Божественными канонами,
 и побуждает поступать мудро –
 в соответствии с Божьими законами.

Бог не желает смерти души
 и ждет от людей покаяния.
 Кто соблюдает законы Бога,
 душа того избежит наказания.

Владимир Стеценко

ПАМЯТИ

Инны Авдеевны

ЯСКЕВИЧ

1939–2021



11 января ушла из жизни главный редактор журнала «Литейное производство» Инна Авдеевна Яскевич.

Инна Авдеевна Яскевич родилась 18 ноября 1939 г. После учебы на литейной кафедре в МВТУ им. Баумана по специальности «Машины и технология литейного производства» в 1963 г. была распределена в НИИЛитмаш в качестве инженера, где проработала несколько лет. С 1969 по 1972 г. трудилась старшим инженером кафедры «Технология приборостроения» в МВТУ им. Баумана. После работы в родной Бауманке Инна Авдеевна несколько лет работала старшим научным сотрудником НИИ Информации по машиностроению Минстанкопрома. В 1975 г. она поступила на работу в издательство «Машиностроение» при Минстанкопром СССР сначала научным редактором, а затем заместителем главного редактора журнала «Литейное производство», а в 1997 г. стала главным редактором журнала.

С приходом Инны Авдеевны в журнале появились новые интересные темы, рубрики, оформление. Новым в работе журнала стала публикация тематических номеров или подборок по региональному и тематическому принципам. С 2001 г. по инициативе Инны Авдеевны начался выпуск журналов «Металлургия машиностроения» и «Библиотечка литейщика».

В 2000 г. Ассоциация содействия национальной промышленности Франции (SPI) признала журнал «Литейное производство» и ее главного редактора Инну Авдеевну лауреатом международной премии «Золотой медали» SPI, которая является свидетельством признания достижений организации в сохранении устойчивости, динамики структуры и умения выживать в условиях финансово-экономического кризиса, а персональный нагрудный знак, вручаемый руководителю, – удостоверением его вклада в область стратегического менеджмента.

Инна Авдеевна прожила интересную и насыщенную жизнь. Коллеги и друзья запомнили Инну Авдеевну как яркого, талантливого, разностороннего, эрудированного человека и высокопрофессионального специалиста с широким кругом интересов как в науке, так и в искусстве. Несмотря на техническое образование, Инна Авдеевна была автором многочисленных стихов, которые регулярно публиковались в «Библиотечке литейщика» и литературных журналах. Инна Авдеевна была добрым, понимающим и отзывчивым человеком, человеком с большим сердцем, всегда готовым выслушать и помочь.

Коллектив редакции журнала «Литье и металлургия», Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь выражают глубокие соболезнования родственникам, друзьям и коллегам по работе.

ПАМЯТИ

Владимира Михайловича ГАЦУРО 1966–2020



28 декабря 2020 г. перестало биться сердце замечательного человека, талантливого организатора, заместителя технического директора по подготовке металлургического производства – главного металлурга ОАО «Минский тракторный завод» Владимира Михайловича Гацуро.

Кажется, только-только Владимир Михайлович активно участвовал в проведении научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия 2020. Беларусь», увлеченно рассказывал о планах строительства современного высокоэффективного литейного завода, делился опытом со студентами БНТУ, которые проходили практику на заводе...

Владимиру Михайловичу Гацуро было всего 54 года, из которых 23 он отдал работе на литейных и металлургических производствах. Большой профессионал, безусловный лидер, грамотный управленец, добросовестный исполнитель – все эти слова о нем. И всех этих слов невыразимо мало, чтобы описать масштаб его личности.

Владимир Михайлович родился 17 июля 1966 г. в д. Лапки Столбцовского района. Вся его деятельность была связана с литейным и металлургическим производствами. В 1992 г. закончил БНТУ по специальности «Машины и технология литейного производства». До этого отслужил в армии срочную службу.

После учебы более десяти лет отработал на Могилевском автозаводе им. С. М. Кирова, пройдя путь от инженера-технолога до главного металлурга завода. После этого более года работал главным металлургом ОАО «Могилевлифтмаш». Далее на протяжении более семи лет Владимир Михайлович трудился заместителем технического директора ОАО «БелАЗ», занимался масштабной модернизацией сталелитейного цеха без остановки производства. С 2011 г. он работал заместителем главного инженера ОАО «Могилевский металлургический завод». Потом его трудовая биография была связана с ОАО «Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод» (Россия), ООО «КСМ–Сталь» (Россия), ОАО «Бобруйский машиностроительный завод» и, наконец, с ОАО «МТЗ».

Вся профессиональная жизнь В. М. Гацуро была наполнена поиском новых решений. Он обладатель пяти патентов на изобретение, выданных Национальным центром интеллектуальной собственности Беларуси и Федеральной службой по интеллектуальной собственности России, Премии Министерства промышленности Беларуси в области науки и техники за 2012 год в номинации «Прогрессивные технологические процессы, ресурсосберегающие технологии». На счету Владимира Гацуро 30 внедренных и признанных полезными для предприятий рационализаторских предложений, сэкономивших трудовые, материальные и финансовые ресурсы.

Владимир Михайлович был реалистом-мечтателем. Он не просто постоянно генерировал идеи, он ставил конкретные цели и уверенно шел к их достижению, мотивируя и увлекая за собой коллектив.

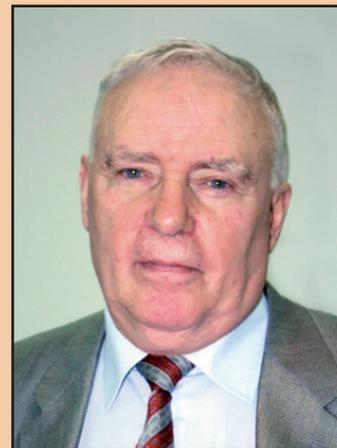
По словам коллег, Владимир Михайлович Гацуро поражал предельной ответственностью и безотказностью, лично присутствовал при монтаже оборудования, пусконаладочных работах и координировал их, несмотря на усталость и завершение рабочего дня. Так и на Минском тракторном для Владимира Михайловича не было понятия «уйти с работы согласно расписанию». Рабочий день для него заканчивался тогда, когда все запланированное было сделано. Высокая требовательность к себе и другим органично сочетались в нем с добротой и открытостью, чутким, бережным и тактичным отношением к людям, готовностью прийти на помощь и душевной теплотой.

Владимир Михайлович Гацуро останется примером преданности делу, профессионализма, интеллигентности, жизненной стойкости и бодрости духа для всех, кому посчастливилось быть с ним знакомым.

ПАМЯТИ

Сергея Семеновича ЖУКОВСКОГО

1934–2020



После тяжелой непродолжительной болезни скончался Сергей Семенович Жуковский, профессор, доктор технических наук, известный специалист по формовочным материалам.

Вся трудовая и научно-общественная жизнь С.С. Жуковского была посвящена литейному производству. После окончания в 1956 г. Московского станкоинструментального института работал инженером-технологом в литейном цехе Московского завода «Компрессор», а с 1958 г. – инженером литейной лаборатории «Института машиноведения АН СССР». В 1960 г. Сергей Семенович перешел на работу в литейный отдел «ЦНИИТМАШ». С этого момента вся его деятельность была связана с изучением и применением материалов для литейных форм и стержней. В современном литейном производстве нет процессов изготовления форм и стержней на базе песчаных материалов, в изучение и развитие которых С.С. Жуковским не внесен существенный вклад.

В 1965 г. Сергей Семенович защитил кандидатскую, а в 1976 г. – докторскую диссертацию. С 1985 по 1992 г. С.С. Жуковский работал в НПО «ВНИИЛИТМАШ» заместителем генерального директора по науке. В 1986 г. за разработку и создание промышленного производства высокоэффективных связующих материалов и смесей на их основе для изготовления стержней и форм, отверждаемых в литейной оснастке, С.С. Жуковский был удостоен премии Совета Министров СССР.

С 1992 г. С.С. Жуковский работал руководителем фирмы «Дистен-М», а затем – техническим директором фирмы «НПП Полион-П».

Постоянное внимание С.С. Жуковский уделял подготовке научных кадров, руководя диссертационными работами и участвуя в работе Ученых советов. Важной частью его деятельности было оказание непосредственной помощи заводам в освоении новых технологических процессов, связанных с применением современных связующих материалов для производства стержней и форм.

В 1978 г. опубликована книга С.С. Жуковского и А.М. Лясса «Формы и стержни из холоднотвердеющих смесей», в 1989 г. – монография С.С. Жуковского «Прочность литейной формы», в 1993 г. – справочник под общей редакцией С.С. Жуковского «Формовочные материалы и технология литейной формы», который в настоящее время является настольной книгой специалистов по формовочным и стержневым смесям. Сергей Семенович – автор 55 авторских свидетельств и изобретений.

При организации в 1988 г. Всесоюзной ассоциации литейщиков С.С. Жуковский как один из авторитетнейших специалистов-литейщиков страны был избран первым президентом ВАЛ.

От имени редакции журнала «Литье и металлургия», Ассоциации литейщиков и металлургов Республики Беларусь приносим глубокие соболезнования родным и близким Сергея Семеновича.

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.

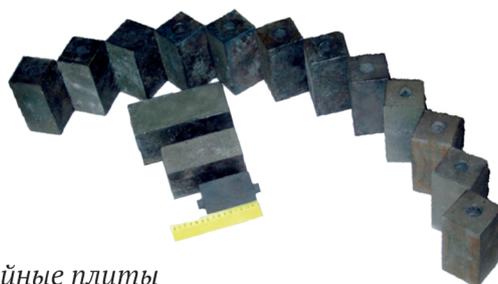
Для центробежных мельниц



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.



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

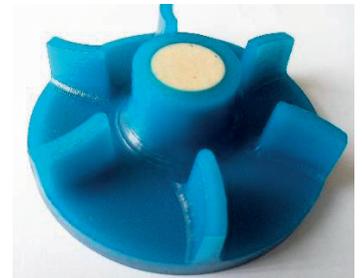
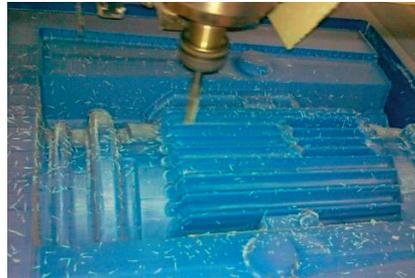
belniilit@belniilit.by; marketing@belniilit.by

www.belniilit.by

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОЙ ОСНАСТКИ



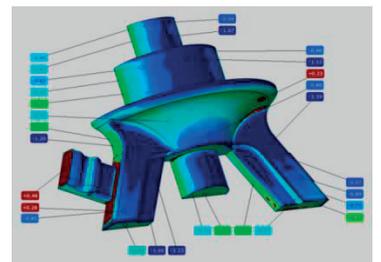
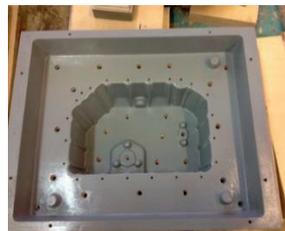
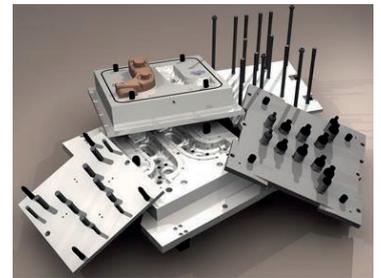
ОАО «БЕЛНИИЛИТ» проектирует и изготавливает сложнопрофильную оснастку для литейного производства с применением станков с ЧПУ.



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; marketing@belniilit.by

www.belniilit.by

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).

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.

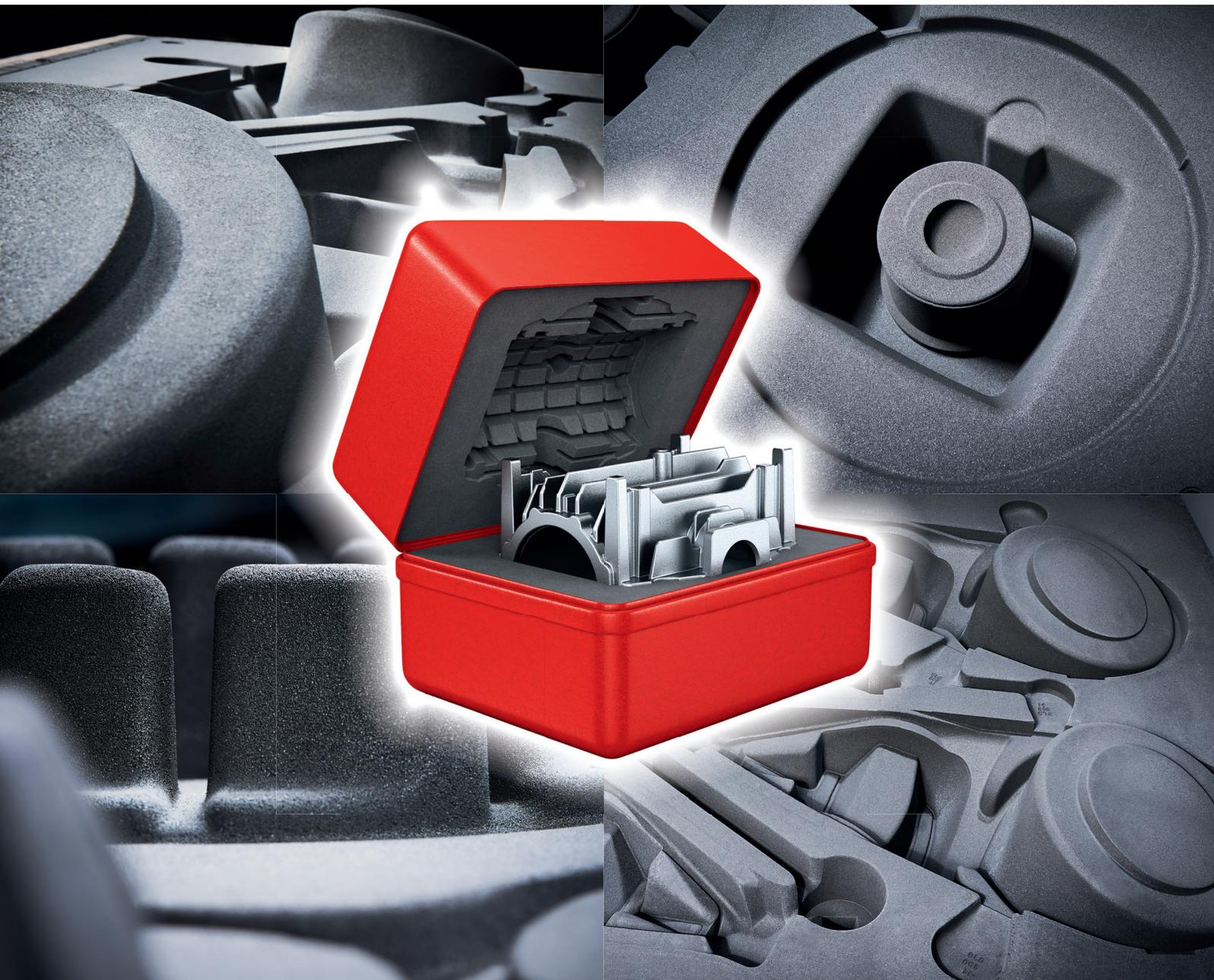
ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ МОДУЛЯМ

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.

КАЧЕСТВО В КАЖДОЙ ФОРМЕ.

Литейная техника компании HWS.



 **MADE IN GERMANY**



New Harmony »» New Solutions™



sinto FOUNDRY INTEGRATION

HEINRICH WAGNER SINTO Maschinenfabrik GmbH

SINTOKOGIO GROUP

Bahnhofstr. 101 · 57334 Bad Laasphe, Germany

Tel +49 2752/907 0 · Fax +49 2752/907 280 · www.wagner-sinto.de

www.sinto.com

Представитель в РБ/

Your contact in Belarus:

SIA "TBH Technic"

Phone/Fax: +375 17 352 50 64

Mobile: +375 44 7404805,

+375 29 6301757

Email: info@tbh-technic.com