

ЛИТЬЕ МЕТАЛЛОВ

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

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

Официальный дилер по РФ и СНГ

 **ПРОМЫШЛЕННЫЕ
РЕШЕНИЯ**



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.

Официальный дилер по РФ и СНГ

 **ПРОМЫШЛЕННЫЕ
РЕШЕНИЯ**

MUNZER

СТАНКИ ДЛЯ МЕХАНООБРАБОТКИ С ЧПУ

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

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



ЛИТЬЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

2020 г., № 4

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

УЧРЕДИТЕЛИ

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

ИЗДАТЕЛЬ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДСОВЕТА

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

ЗАМ. ПРЕДСЕДАТЕЛЯ РЕДСОВЕТА

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

РЕДСОВЕТ

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

РЕДАКЦИЯ

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

ОСНОВАТЕЛЬ ЖУРНАЛА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Марукович Е. И., главный редактор, акад. НАН Беларуси, д-р техн.
наук, проф., ГНУ ИТМ НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь
Николайчик Ю. А., зам. главного редактора по литейному произ-
водству, канд. техн. наук, доцент, БНТУ, г. Минск, Беларусь
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. Л., 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
Франшек Т., Польская ассоциация литейщиков, Польша
Хань Юйсинь, Китайская литейная ассоциация, Китай
Чандл П., Furtenbach, Австрия
Чой Ки-Йонг, проф., Республика Корея

АДРЕС РЕДАКЦИИ

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

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

Подписано в печать 00.00.2020. 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.

FOUNDRY PRODUCTION AND METALLURGY

2020, no. 3

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

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

DEPUTY CHAIRMAN OF THE EDITORIAL COUNCIL

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

EDITORIAL COUNCIL

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

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

Nikalaichyk Yu. A., Ph. D in Technical 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

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

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

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

Prusach 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 60x84%. 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

Приветственное слово ректора БНТУ С. В. Харитончика	8
Белорусский национальный технический университет – сто лет истории инженерного образования Беларуси	9
Механико-технологический факультет: к 100-летию Белорусского национального технического университета	14
Кафедра «Машины и технология литейного производства»: история основания, становления и развития	17
Кафедра «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов»	26
Кафедра «Металлургия черных и цветных сплавов»	29
Развитие научно-педагогической школы кафедры «Материаловедение в машиностроении»	36
Кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением». От основания до наших дней	41
Кафедра «Охрана труда» и ее вклад в подготовку специалистов для промышленности Республики Беларусь	45

С ЮБИЛЕЕМ

Немененок Б. М. (к 70-летию со дня рождения)	47
Слуцкий А. Г. (к 70-летию со дня рождения)	48

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Ровин С. Л., БНТУ, Ровин Л. Е., ГГТУ им. П. О. Сухого Конструктивные особенности ротационных печей	49
Марукович Е. И., Харьков В. А., Мешков Д. А., Ковалев А. М., Сазоненко И. О., ГНУ ИТМ НАН Беларуси, Комиссаров Г. В., ОАО «Могилевлифтмаш» Анализ тепловых процессов при индукционной наплавке	60
Садоха М. А., БНТУ Технологические особенности литья поршней	64
Рудницкий Ф. И., Долгий Л. П., БНТУ Особенности технологии изготовления литых инструментальных заготовок из быстрорежущей стали Р6М5	68
Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., ГНУ ИТМ НАН Беларуси, Стеценко А. В., МОУ ВО «Белорусско-Российский университет» О броуновском движении в жидкостях	75
Панасюгин А. С., Долгий Л. П., Кулинич И. Л., Герасикова А. А., Микишко А. В., БНТУ, Машерова Н. П., Цыганов А. Р., БГТУ Тенденции использования бентонитовых глин	78

МЕТАЛЛУРГИЯ

Рожкова О. В., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Исследование природы дефектов на наружной поверхности термообработанных бесшовных труб	90
Акунец Н. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Опыт проведения испытаний на торсиометре с целью определения шага свивки металлокорда	94
Корнеев С. В., Трусова И. А., БНТУ Эффективность использования альтернативных источников теплоты при электроплавке металла	99

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Урбанович Н. И., Барановский К. Э., Розенберг Е. В., Карпенкин А. А., БНТУ, Ашуйко В. А., Матыс В. Г., БГТУ, Волосюк В. Ф., ООО «Гальварекс» Анализ коррозионных свойств цинксодержащих покрытий на базе дисперсного отхода горячего цинкования	106
Анисович А. Г., Акула И. П., Ласковнев А. П., Маркевич М. И., Чекан Н. М., ГНУ ФТИ НАН Беларуси Создание и исследование антистатических углеродных покрытий на ткани 05С8-КВ, модифицированных кластерами металлов	113
Ковалько М. С., Волочко А. Т., Зизико А. В., ГНУ ФТИ НАН Беларуси, Рубаник В. В., ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси» Формирование структуры и свойств в высокопрочном чугуна при его изотермической закалке с использованием ультразвука	118

Минько Д. В., БНТУ

Анализ перспектив применения электропластического эффекта в процессах обработки металлов давлением . . . 125

Константинов В. М., Булойчик И. А., БНТУ

Влияние термодиффузионного цинкования на эксплуатационные свойства термически обработанных стальных изделий. 131

Ковальчук А. В., Пацеко Е. К., Ткаченко Г. А., Верещак Н. А., БНТУ

Повышение жаростойкости углеродистых сталей термодиффузионным насыщением и нанесением вакуумных покрытий. 139

Толстой А. В., ГНУ ОИМ НАН Беларуси

О влиянии упругих межфазовых деформаций на ширину отражений от выделяющей фазы в дисперсионно-твердеющих сплавах 148

Николайчик Ю. А., БНТУ, Куис Д. В., Свидуневич Н. А., БГТУ, Ровин С. Л., БНТУ

Общие проблемы развития и внедрения наноматериалов и нанотехнологий 152

ЭКОНОМИКА

Дамарад А. В., Щербакова В. П., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»

Оценка себестоимости продукции предприятия с возможностью моделирования позиций контракта 163

ДИСКУССИЯ

Стеценко В. Ю., ГНУ ИТМ НАН Беларуси, Стеценко А. В., МОУ ВО «Белорусско-Российский университет»

О темной материи и темной энергии 166

ПО СТРАНИЦАМ ЗАРУБЕЖНОЙ ПРЕССЫ 169

ПОЭТИЧЕСКАЯ СТРАНИЧКА 174

Патон Б. Е. 176

Александров Н. Н. 177

*Дорогие наши партнеры,
верные и добрые друзья!*

*Мы благодарим всех, с кем довелось нам сотрудничать
в течение этого года.*

*Пусть новый 2021 год станет годом добрых перемен,
мира и согласия. Желаем вам не знать кризисов и не-
удач, всегда быть на волне и богатеть не по дням, а по
часам! Пусть будут крепкими ваши семьи, в которых
живут любовь, понимание и взаимное уважение!*

*Искренне желаем Вам крепкого здоровья, оптимизма,
успехов во всех начинаниях, осуществления Ваших на-
дежд и желаний!*

*Редакция журнала
«Литье и металлургия»*



CONTENTS

Subscription 75034

Welcome speech of the rector of BNTU Kharitonchik S. V.	8
Belarusian National Technical University – one hundred years of history of engineering education in Belarus	9
Mechanics and technology faculty: 100th anniversary of the Belarusian National Technical University	14
Department “Foundry machines and technology”: history of foundation, formation and development.	17
Department “Powder metallurgy, welding and materials technology“	26
Department “Metallurgy of ferrous and non-ferrous alloys“	29
Development of the scientific and pedagogical school of the department “Materials science in mechanical engineering”	36
Department “Machines and technology of metal forming” – from the foundation to the present day	41
Department “Occupational safety” and its contribution to the training of specialists for the industry of the Republic of Belarus	45

HAPPY ANNIVERSARY

Nemenenok B. M. (on the 70 th Anniversary)	47
Slutsky A. G. (on the 70 th Anniversary)	48

FOUNDRY

Rovin S. L., BNTU, Rovin L. E., Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj Constructive features of rotary furnaces	49
Marukovich E. I., Kharkov V. A., Meshkov D. A., Kovalev A. M., Sazonenko I. O., Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus, Komissarov G. V., JSC «Mogilevliftmash» Analysis of thermal processes during induction surfacing	60
Sadokha M. A., BNTU Technological features of piston casting	64
Rudnitsky F. I., Dolgiy L. P., BNTU Features of technology for manufacturing cast toolbills from rapid-cutting steel R6M5	68
Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Stetsenko A. V., Belarusian-Russian University About brownian movement in liquids	75
Panasyugin A. S., Dolgiy L. P., Kulinich I. L., Gerasikova A. A., Mikishko A. V., BNTU, Masheroval N. P., Tsyganov A. R., Belarusian State Technological University Trends in the use of bentonite clays.	78

METALLURGY

Rozhkova O. V., OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC” Investigation of the nature of defects on the outer surface of heat-treated seamless pipes	90
Akunets N. A., OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC” Experience in conducting tests on a torsionmeter to determine the pitch of the metal cord	94
Korneev S. V., Trusova I. A., BNTU Efficiency of using alternative sources of heat in electric melting of metal	99

SCIENCE OF MATERIALS

Urbanovich N. I., Baranovsky K. E., Rozenberg E. V., Bendik T. I., Karpenkin A. A., BNTU, Ashuiko V. A., Matys V. G., Belarusian State Technological University, Volosyuk V. F., LLC “Galvarex” Analysis of corrosive properties of zinc-containing coatings based on dispersed waste hot zinc plating.	106
Anisovich A. G., Akula I. P., Laskovnev A. P., Markevich M. I., Chekan N. M., State Scientific Institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus” Creation and research of antistatic carbon coatings on fabric 05C8-KB, modified by metal clusters.	113

Kovalko M.S., Volochko A.T., Ziziko A.V., State Scientific Institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”, Rubanik V.V., The Institute of Technical Acoustics of The National Academy of Sciences of Belarus	
Structure and properties forming in ductile iron during isothermal hardening using ultrasound	118
Minko D.V., BNTU	
Analysis of the prospects of the application of the electroplastic effect in the processes of processing metals with pressure	125
Konstantinov V.M., Bulovich I.A., BNTU	
Influence of sherardizing on working properties of metal parts subjected to prior heat treatment	131
Kovalchuk A.V., Patseko E.K., Tkachenko G.A., Vereshchak N.A., BNTU	
Thermochemical treatment of steel substrates for heat-resistant ion-plasma coatings	139
Tolstoy A.V., Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus	
On the influence of elastic interphase deformations on the width of reflections from the released phase in dispersion hardening alloys	148
Nikalaichyk Yu.A., BNTU, Kuis D.V., Svidunovich N.A., Belarusian State Technological University, Rovin S.L., BNTU	
General problems of development and implementation of nanomaterials and nanotechnologies	152

ECONOMY

Damarad A.V., Shcherbakova V.P., OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”	
Estimation of the cost price of the enterprise with the possibility of modeling contract positions	163

DISCUSSION

Stetsenko V. Yu., Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Stetsenko A.V., Belarusian-Russian University	
On dark matter and dark energy	166
THROUGH THE PAGES OF THE FOREIGN PRESS	169
POETIC PAGE	174
Paton B.E.	176
Alexandrov N.N.	177

Dear partners, reliable and good friends!

*We thank everyone with whom we have had the
opportunity to work during this year.*

*Let the New Year 2021 be a year of good changes, peace
and harmony. We wish you not to know crises and
failures, always be on the wave and get rich by leaps
and bounds! May your families be strong, where love,
understanding and mutual respect live!*

*We sincerely wish you good health, optimism, success in
all your endeavors, and the fulfillment of your hopes and
desires!*

*Editorial Board of the Journal
“Foundry Production and Metallurgy”*





ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО РЕКТОРА БНТУ С.В. ХАРИТОНЧИКА

Уважаемые коллеги, дорогие друзья!

10 декабря 2020 года Белорусскому национальному техническому университету исполнилось 100 лет.

Искренне поздравляю вас с этой знаменательной датой и благодарю всех ученых и специалистов за сотрудничество с нашей альма-матер.

За годы становления и развития БНТУ достиг значительных успехов в научно-образовательной и производственно-инновационной деятельности, стал флагманом высшего технического образования Республики Беларусь, признан базовой организацией государств-участников Содружества Независимых Государств по высшему техническому образованию и входит в число лучших инженерно-технических университетов мира. БНТУ на протяжении многих лет занимает лидирующие позиции в мировых рейтингах, укрепляет международное сотрудничество.

Уверен, что наше сотрудничество будет способствовать дальнейшему развитию научно-исследовательского и инженерно-технического образования не только в Республике Беларусь, но и во всем мире!

Примите искренние поздравления с юбилеем Белорусского национального технического университета! Желаю всем здоровья, успехов и удачи во всех начинаниях!

*С уважением, ректор Белорусского
национального технического университета
С. Харитончик*

WELCOME SPEECH OF THE RECTOR OF BNTU KHARITONCHIK S.V.

Dear colleagues and friends!

On December 10, 2020 the Belarusian National Technical University (BNTU) will celebrate its centenary.

On the occasion of this significant date, I wish you happy anniversary and express my gratitude to all scientists and specialists who cooperated and cooperate with our alma mater.

During the years of establishing and development, BNTU has achieved significant success in scientific, educational, industrial and innovative activities; it has become the flagship of higher technical education of the Republic of Belarus. Our University is recognized as the basic organization of the Commonwealth of Independent States for higher technical education and it is one of the best engineering and technical universities in the world.

For many years, BNTU has been a leader in world rankings and it has also been strengthening international cooperation.

I am confident that our collaboration will contribute to the further development of research and engineering education not only in the Republic of Belarus, but throughout the world.

Please accept my sincere congratulations on the occasion of the centenary of the Belarusian National Technical University! I wish you all health, success and good luck in all your endeavors!

*Yours faithfully, S. Kharytonchyk
Rector of the Belarusian
National Technical University*



100 ЛЕТ



ХРАНИМ ТРАДИЦИИ, ЖИВЕМ НАСТОЯЩИМ, СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ

100 ЛЕТ



ХРАНИМ ТРАДИЦИИ, ЖИВЕМ НАСТОЯЩИМ, СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ – СТО ЛЕТ ИСТОРИИ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ БЕЛАРУСИ

Белорусский национальный технический университет (БНТУ) – ведущий инженерно-технический вуз Беларуси, который осуществляет подготовку высококвалифицированных специалистов для всех отраслей экономики страны. Сегодня БНТУ – это не просто классический национальный университет техники и технологий со 100-летней богатой историей, но и уникальный образовательный и научно-инновационный кластер в национальной системе высшего образования.

Предлагаем Вам совершить небольшой экскурс в прошлое, в далекий 1920 год, когда был создан БНТУ. Необходимо констатировать тот факт, что это было непростое и тяжелое время. Население Беларуси вынуждено было преодолевать последствия Первой мировой войны, советско-польской войны, в стране царили разруха, голод и лишения. А восстанавливать экономический потенциал было некому: во время войны практически все технические кадры выехали в Россию. Сама БССР представляла собой совсем небольшую территорию: шесть уездов Минской губернии с населением в 1,5 млн. человек. В этих условиях страна особо остро нуждалась в инженерных кадрах, а на всей территории БССР не было ни одного высшего технического учебного заведения, только средние специальные, среди которых Минское политехническое училище типа «Техникум».

К тому же половина его отделений имела сельскохозяйственное направление, как никак страна была аграрной. 10 декабря 1920 года по ходатайству педагогического совета «Техникума» и постановлением Военно-Революционного Комитета БССР училище было преобразовано в Белорусский государственный политехнический институт (БГПИ) или просто Политехникум.





Минский государственный политехникум после надстройки третьего этажа (фото 30-х гг. XX в.)

Целью была поставлена «подготовка инженеров с высшим образованием по главным производствам Белоруссии». За Политехникумом было «закреплено здание Коммерческого Минского училища, находящегося по Васильевскому переулку со всеми надворными постройками, землей и инвентарем». В качестве учебной базы для практических занятий студентов были выделены Минский стеклозавод и земли совхоза «Семково» Минского уезда. Недостаток оборудования некоторых кабинетов восполнялся и лесными показательными дачами. Первым директором Политехникума был назначен ученый-агроном Никанор Казимирович Ярошевич. Именно так и начинается отсчет существования первенца и флагмана инженерного образования Республики Беларусь, ведущего технического вуза страны – Белорусского национального технического университета.

Набор студентов осуществляли пять факультетов: механический, инженерно-строительный, культурно-технический, химико-технологический, электромеханический. В дальнейшем, после ряда реорганизаций 1 июля 1933 г. Совнарком Белоруссии принимает решение о восстановлении политехнического института, в котором в сентябре 1933 г. работали 120 преподавателей и 20 кафедр. В институте обучались 1200 студентов.

В начале 40-х годов XX в. БПИ стал одним из ведущих технических вузов Советского Союза. На 32 кафедрах четырех факультетов велась подготовка инженеров по семи специальностям. Количество преподавателей увеличилось до 180, включая 19 профессоров и 71 доцента. За 1933–1941 гг. было подготовлено около 2000 инженеров.

Великая Отечественная война прервала работу БПИ. 22 июня 1941 года на территорию нашей страны вероломно вторглись гитлеровские войска, жизнь каждого белоруса разделилась на «до» и «после».



30 июня 1941. Немецкие бронемашины проезжают теперешнюю площадь Якуба Коласа

Война коснулась всех. Каждый готовился встать на защиту своей Родины. Преподаватели и студенты Белорусского политехнического института не стали исключением.

24 июня 1941 года немцы обрушили на Минск десятки зажигательных и фугасных бомб, после страшных боев и попыток отстоять город, 28 июня наши войска оставили столицу Беларуси. Город начал жить в условиях жесткого оккупационного режима.

Сегодня точно известно, что в период Великой Отечественной войны сотни преподавателей, сотрудников, выпускников и студентов БПИ сражались с врагом на различных фронтах Великой Отечественной войны, в партизанских отрядах и подпольных группах, проявляя мужество, патриотизм и самоотверженность.

Работа института возобновилась в 1945 г., когда к занятиям приступило 375 студентов. В 1949 г. количество студентов выросло до 1500 человек, на 37 кафедрах работали более 160 преподавателей.

По мере возникновения новых предприятий и заводов в университете появлялись новые специализации, специальности и целые факультеты. Так, в 1946 году были выпущены первые автомобилесамосвалы МАЗ-205 на Минском автомобильном заводе, в 1947 году на Минском тракторном заводе начался серийный выпуск тракторов. А в 1951 году в БПИ начинает работу автотракторный факультет, в 1958 году на базе механического факультета создаются машиностроительный и механико-технологический факультеты.



Главный корпус института, разрушенный немецкими оккупантами в годы войны



Главный корпус БНТУ и его архитектурный стиль

Развитие оптической промышленности привело к необходимости открытия в 1976 году оптико-механического факультета, а дальнейшее расширение перечня востребованных приборостроительных специальностей – к открытию в 1978 году инженерно-физического факультета. В 1984 году оптико-механический и инженерно-физический факультеты были объединены в один – инженерно-физический, который в следующем году был переименован в приборостроительный факультет.

10 декабря 2020 года Белорусский национальный технический университет, история которого неразрывно связана с историей развития национальной промышленности, отмечает свое столетие. За годы своего существования университет подготовил более 200 тыс. специалистов и с учетом своих достижений в области научно-инновационной деятельности входит в мировую элиту высшего технического образования.

После провозглашения суверенитета Республики Беларусь в 1991 г. Белорусский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт преобразован в Белорусскую государственную политехническую академию (БГПА) (Постановление Совета Министров Белорусской ССР от 17 апреля 1991 г., № 149), а в 1997 г. Белорусская государственная политехническая академия получила статус ведущего инженерно-технического учебного заведения в национальной системе образования Республики Беларусь (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 17 января 1997 г., № 6).

1 апреля 2002 г. Указом Президента Республики Беларусь Белорусская государственная политехническая академия преобразована в Белорусский национальный технический университет (БНТУ). В 2005 г. было принято решение придать университету статус базовой организации государств-участников Содружества Независимых Государств по высшему техническому образованию. В 2014 г. в структуру БНТУ на правах филиала был переведен Минский государственный политехнический колледж. В этом же году агентство «Эксперт РА» присвоило вузу рейтинговый класс «С», означающий «высокий уровень» подготовки выпускников.

Иностранные гости, представители делегаций часто восхищаются научно-техническим потенциалом Республики Беларусь: жилые комплексы, мосты, дороги, электростанции, метро и др. – все это проектируется, строится, выпускается не иностранцами, а белорусскими специалистами, в том числе выпускниками БНТУ или при их непосредственном участии. Многие руководители ведущих приборостроительных, машиностроительных и металлургических предприятий окончили БНТУ. В их числе Виталий Вовк, генеральный директор Минского тракторного завода, Валерий Иванович, генеральный директор Минского автомобильного завода, Александр Ефимов, генеральный директор ОАО «Амкордор» и многие их предшественники.

Выпускники БНТУ работают во всемирно известных компаниях: Wargaming, Hewlett-Packard, Kaspersky Lab, EPAM Systems, Intel, Samsung, «Яндекс», ОАО «БелАЗ», ОАО «Беларуськалий», Scania и др.

БНТУ гордится тем, что лауреат Нобелевской премии Жорес Алферов когда-то выбрал именно наш университет (тогда институт) и его энергетический факультет.

Движение вперед невозможно без подготовки специалистов в поисках новых специальностей. Так, на кафедре «Машины и технология литейного производства» механико-технологического факультета открыта новая специализация «Аддитивные технологии в литейном производстве». Кроме базовых знаний в области литейного производства, она позволяет овладеть навыками моделирования и проектирования литейных процессов, освоить передовые технологии прототипирования и изготовления оснастки, такие, как стереолитография, сверхвысокочастотное и лазерное спекание, фотополимеризация, 3D-печать и др.

Сегодня БНТУ занимает ведущие позиции среди вузов Республики Беларусь в международных рейтингах, что позволяет достаточно эффективно интегрировать вуз в мировую образовательную среду. В популярном рейтинге университетов Webometrics (Webometrics of World Universities) БНТУ занимает 2540 позицию среди 28 тысяч университетов мира. Но среди технических вузов входит в топ-300 лучших университетов мира. По данным авторитетного рейтинга QS (Quacquarelli Symonds), БНТУ является 103-м университетом в регионе Восточной Европы и Центральной Азии и входит в категорию 800–1000 лучших университетов мира.

Предстоящий юбилей университета – значимое событие для всей промышленности Республики Беларусь, а одна из приоритетных задач, которую ставит Правительство в рамках подготовки к празднованию 100-летия БНТУ, – это формирование основы для дальнейшего качественного развития инженерного образования в БНТУ путем совершенствования инфраструктуры, образовательной и научно-инновационной деятельности, а также социальной сферы университета.



БНТУ сегодня

В условиях суверенного развития Беларуси университет провел большую работу как по сохранению специальностей, жизненно важных для страны, так и по открытию новых специальностей, по которым ранее в республике специалисты не готовились, в том числе «Городской электрический транспорт», «Низкотемпературная техника», «Кораблестроение и эксплуатация внутреннего водного транспорта», «Вакуумная и компрессорная техника», «Экспертиза и управление недвижимостью», «Упаковочное производство», «Атомная энергетика», «Транспортная логистика», «Технология и оборудование торфяного производства», «Компьютерная мехатроника», «Геодезия» и многие другие. Следует отметить, что только за последние 10 лет в университете были открыты 33 новые специальности.

В настоящее время БНТУ ведет подготовку по 88 специальностям и 121 специализациям. Это специальности, подготовка кадров по которым определяют позитивное динамическое развитие реального сектора экономики, решение многих социальных вопросов, повышение благосостояния нашего народа и укрепления национальной безопасности родной Беларуси. Эффективность подготовки кадров БНТУ проявляется в работе флагманов нашей промышленности – БМЗ, МТЗ, МАЗ, БелАЗ, БелОМО, «Амкодор» и др., что обеспечивает их стабильную работу и эффективное функционирование.

С уверенностью можно сказать, что сегодня университет идет в ногу со временем и трансформирует свою деятельность в соответствии с запросами новой, цифровой экономики. Этот современный этап развития БНТУ отождествляется с качественными изменениями в рамках модели «Университет 3.0», предполагающей рациональное сочетание трех главных направлений: «образование – наука – инновационная и предпринимательская деятельность» и позволяющий готовить новые поколения высококвалифицированных специалистов, обладающих не только классическим набором базовых общетехнических и специальных знаний, но и умеющих их эффективно применять на практике.

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

100 ЛЕТ



ХРАНИМ ТРАДИЦИИ, ЖИВЕМ НАСТОЯЩИМ, СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ

МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ: К 100-ЛЕТИЮ БЕЛОРУССКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



Декан МТФ БНТУ
Игорь Аркадьевич Иванов,
д-р техн. наук, профессор

10 декабря 2020 года все, кто работает или когда-либо работал, учится или окончил БПИ-БГПА-БНТУ, празднуют 100-летний юбилей нашего любимого «Политеха». И хотя механико-технологическому факультету в этом году исполнилось всего 62 года, мы – коллектив МТФ, можем смело утверждать, что история нашего факультета неразрывно связана со 100-летней историей БПИ-БГПА-БНТУ.

Об истории развития механико-технологического факультета и его структурных подразделений, о достижениях его работников в научной, производственной и образовательной сферах написано достаточно много. В этой статье мне бы хотелось остановиться только на некоторых аспектах деятельности факультета, которые можно напрямую связать со 100-летним юбилеем университета.

Факультет был создан на рубеже 50–60-х годов прошлого века. Стоит отметить, что именно в этот период произошли существенные изменения в организации системы высшего образования. Так, в апреле 1959 года был принят закон БССР «Об укреплении связи школы с жизнью и о дальнейшем развитии системы народного образования БССР».

Данный закон поставил ряд задач перед высшей школой в республике, в частности, расширение научно-исследовательских работ, совершенствование подготовки научно-педагогических кадров в вузах и др. С целью ликвидации ведомственных барьеров в руководстве учебными заведениями в этом же году было образовано Министерство высшего, среднего и профессионального образования БССР. Это позволило обеспечить планирование подготовки кадров с учетом действительных потребностей в них народного хозяйства республики. Огромный вклад в становление и развитие механико-технологического факультета внесли деканы, возглавлявшие факультет в разное время: А. М. Дмитриевич (1958–1964), В. С. Пашенко (1964–1976), Б. В. Бабушкин (1976–1985), В. М. Королев (1985–2003), Н. И. Иваницкий (2003–2013) и многие известные ученые и организаторы высшего технического образования.

К 1974 году на факультете была создана стройная система подготовки инженеров по четырем специальностям: литейное производство черных и цветных металлов; металловедение, оборудование и технология термической обработки; машины и технология литейного производства; машины и технология обработки материалов давлением.

С самого начала своего существования коллектив МТФ уделял большое внимание не только подготовке будущих инженеров, но и развитию научных исследований и их внедрению на предприятиях не только республики, но и всего СССР. Так, в 50-х годах под руководством профессора С. И. Губкина начались широкие работы по совершенствованию технологии процессов обработки металлов давлением. Результаты НИР активно внедрялись в производство, преподаватели МТФ личным участием помогали становлению и развитию отечественного машиностроения. Так, канд. техн. наук М. А. Барановский руководил базовой лабораторией по холодной штамповке на Минском тракторном заводе, канд. техн. наук Л. С. Ляхович – базовой металловедческой лабораторией на этом же заводе. В 1955 году в Белорусском политехническом институте была создана кафедра «Технология металлов», которая возглавила новое для республики направление – порошковую металлургию, основанную на безотходных, наукоемких, ресурсосберегающих технологиях получения материалов и изделий с высокими технологическими свойствами. В 1964 году при кафедре «Технология металлов» была создана проблемная вузовская лаборатория порошковой металлургии, которую возглавил доцент О. В. Роман (впоследствии академик

АН БССР). В 1972 году на базе лаборатории был создан НИИ порошковой металлургии, который впоследствии был преобразован в НПО Порошковой металлургии НАН Беларуси.

Ряд научных разработок преподавателей и научных сотрудников факультета в разные годы были отмечены государственными премиями: Государственной премией БССР (Д. Н. Худокормов, А. М. Галушко); премией Совета Министров СССР (В. И. Тутов); премией ВЛКСМ (С. Н. Леках); премией ЛКСМБ (Н. И. Бестужев, С. В. Дорожко, В. А. Розум, А. Г. Слуцкий, Л. Л. Счисленок), а также многочисленными медалями ВДНХ СССР всех достоинств. За лучшую научно-исследовательскую работу в области разработки и внедрения технологических процессов и новых видов оборудования для термической обработки д-р техн. наук, профессор Л. Г. Ворошнин (кафедра «Материаловедение в машиностроении») был дважды отмечен премией имени Н. А. Минкевича (1979 и 1983 гг.). За время работ в области разработки литейных композиционных материалов профессор Д. М. Кукуй был удостоен Государственной премии БССР (1990 г.). Ученые и специалисты факультета принимали активное участие в освоении трубопрокатного производства в условиях Белорусского металлургического завода. В рамках сотрудничества между БГПА и БМЗ в период с 1988 по 2000 г. успешно функционировала комплексная научно-производственная лаборатория «Проблемы металлургического производства» под руководством д-ра техн. наук, профессора В. И. Тимошпольского. Главным итогом работы лаборатории явилось создание в структуре механико-технологического факультета кафедры «Металлургические технологии» (зав. кафедрой д-р техн. наук, профессор В. И. Тимошпольский). Ряд работников этой кафедры в 2001–2003 гг. были награждены орденом Почета и медалью «За трудовые заслуги», отмечены премиями Национальной академии наук Беларуси и Государственной премией Республики Беларусь.

В начале 2000-х в состав факультета входило восемь кафедр, 12 научно-исследовательских лабораторий, научно-производственное унитарное предприятие «Метолит» (создано в 1992 году). В соответствии с программой реализации концепции развития вузовской науки в Республике Беларусь при поддержке Министерства образования Республики Беларусь на факультете были созданы центр трансфера технологий по переработке промышленных и бытовых ломов и отходов и центр трансфера технологий «Металлургия и заготовительное производство». С целью стимулирования творческой активности студентов и привлечения их к научно-исследовательской работе на факультете были созданы студенческая научно-исследовательская лаборатория «Информационные компьютерные технологии» и две научно-технологические лаборатории «Новые материалы и конструкции («Номакон»)» и «Художественная обработка материалов». Факультет осуществлял подготовку по двум укрупненным специальностям, включающим девять специализаций: Т02.01 – «Металлургическое производство и материалобработка» и Т02.02 – «Технология, оборудование и автоматизация обработки материалов».

В настоящее время механико-технологический факультет включает шесть кафедр с шестью филиалами на ведущих промышленных предприятиях республики, отдел информационного и технического обеспечения образовательного процесса, пять научно-исследовательских лабораторий, Инновационный производственный центр медицинского оборудования и изделий, два студенческих научно-технических бюро «Сплав» и «Материаловедение в машиностроении».

Подготовка инженерных кадров на I ступени высшего образования осуществляется по пяти специальностям: «Материаловедение в машиностроении»; «Машины и технология обработки материалов давлением»; «Оборудование и технология сварочного производства»; «Машины и технология литейного производства»; «Металлургическое производство и материалобработка». На II ступени высшего образования (магистратура) подготовка ведется по двум специальностям: 1-42 80 01 – «Инновационные технологии в металлургии» и 1-36 80 09 – «Экспертиза конструкционных материалов машиностроения, покрытий и изделий» (открыта в 2019 году).

Ряд специальностей факультета интегрирован с учебными планами средних специальных учебных заведений, что позволяет выпускникам колледжей получить высшее образование I ступени в сокращенные сроки. В текущем году факультет участвует в экспериментальной программе двухгодичного обучения иностранных граждан в магистратуре. Специальности «Машины и технология обработки материалов давлением», «Машины и технология литейного производства» и «Металлургическое производство и материалобработка» входят в перечень остро востребованных экономикой, на которые определенные категории граждан могут поступать без сдачи вступительных испытаний.

Современная подготовка инженера на факультете базируется на широком использовании информационных технологий. Обязательным является освоение специализированных пакетов прикладных программ 3D-инженерного моделирования и обработки данных. Такой подход к обучению позволил открыть

в 2020 году подготовку специалистов по специализациям 1-36 02 01-05 – «Аддитивные технологии в литейном производстве» и 1-42 01 01-01 04 – «Компьютерное проектирование литейных и металлургических процессов». Для успешной реализации программ обучения по новым специализациям на факультете проведена работа по развитию имеющейся учебно-материальной и лабораторной базы. Например, на кафедре МитЛП подготовлены три компьютерных класса, оснащенных современной вычислительной техникой, заключены договора с рядом предприятий, заинтересованных в подготовке специалистов, решены вопросы с базами практик.

Более трети студентов участвуют в научно-исследовательской работе в лабораториях при кафедрах. Ежегодно факультет получает студенческие гранты Министерства образования Республики Беларусь по наиболее актуальной тематике. Лучшие студенческие научные работы участвуют в Республиканском конкурсе студенческих научных работ. По итогам конкурсов многие студенты факультета удостоиваются 1-й, 2-й и 3-й категорий, а также становятся лауреатами. На Международном чемпионате по технологической стратегии «Metal Cup 2020. Gold season» команда факультета заняла 1-е место в номинации «Бренд года». На факультете проводятся две студенческие научно-практические конференции.

В лабораториях факультета выполняются научно-исследовательские и прикладные работы в области металлургии, литейного производства, обработки материалов давлением, разработки теории и практики сварочных процессов, разработки новых, в том числе композиционных, материалов и рециклинга отходов. Проводятся исследования, направленные на определение количественного и качественного состава вредных факторов, образующихся в процессе производства, определение их степени воздействия на атмосферу, гидросферу и здоровье работника. Ведутся работы по развитию теории сталеплавления процессов, совершенствованию устройств, технологии и режимов выплавки, внепечного рафинирования и разлива стали, разработке оборудования в области пестроения для металлургического производства. НИИЛ Сварки, родственных технологий и неразрушающего контроля выполняет работы по экспертной оценке (аттестации) технологий сварки в соответствии СТБ ISO с разработкой процедурных отчетов (WPQR) и сварочного персонала с установлением критериев допуска его к производственной деятельности на потенциально опасных объектах.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Белорусский политехнический институт / редкол.: П. И. Ящерицын [и др.]. Минск: Изд-во БГУ им. В. И. Ленина, 1974. 143 с.
2. **Иванов, И. А.** Механико-технологический факультет БНТУ / И. А. Иванов, Б. М. Немененок // Литье и металлургия. 2015. № 4 (81). С. 6–10
3. **Немененок, Б. М.** Кафедра «Металлургия черных и цветных сплавов» / Б. М. Немененок, И. А. Трусова // Литье и металлургия. 2018. № 3(92). С. 11–18.
4. История Белорусского национального технического университета / редкол.: К. И. Баландин [и др.]. Минск: БНТУ, 2006. 232 с.
5. **Иванов, И. А.** Роль механико-технологического факультета БНТУ в развитии литейно-металлургического комплекса Беларуси / И. А. Иванов, В. М. Константинов, Б. М. Немененок, И. А. Трусова, К. Е. Белявин // Металлургия и машиностроение Беларуси: итоги и перспективы научного обеспечения. Минск: Белорусская наука, 2016. С. 22–36.
6. **Жидолович, В.** Механико-технологический факультет БНТУ / В. Жидолович // Кем быть? 2017. № 7. С. 3–5.

Материал подготовил

И. А. Иванов

100 ЛЕТ



ХРАНИМ ТРАДИЦИИ, ЖИВЕМ НАСТОЯЩИМ, СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ

КАФЕДРА «МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА»: ИСТОРИЯ ОСНОВАНИЯ, СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ

История кафедры началась в далеком 1954 г., когда Коллегией Министерства высшего образования СССР было принято решение об открытии на базе механического факультета БПИ подготовки инженеров-механиков по специальности «Машины и технология литейного производства». В послевоенные годы в Беларуси наряду с восстановлением разрушенных городов и поселков быстрыми темпами начали строиться машиностроительные предприятия. Благодаря героическим усилиям советского народа уже за первые 10 послевоенных лет на территории Белорусской ССР был создан мощный промышленный комплекс: в Минске были построены МАЗ, МТЗ, МЗОО (в то время Завод санитарно-технического оборудования), МЗАЛ, восстановлен станкостроительный завод им. К. Е. Ворошилова (с 1961 г. – им. Октябрьской революции), строились новые заводы в Гомеле, Могилеве, Витебске. Практически все эти предприятия имели собственное литейное производство и остро нуждались в квалифицированных специалистах.

Инициатором создания кафедры, ее организатором и первым руководителем стал декан механического факультета, кандидат технических наук, доцент Анатолий Михайлович Дмитриевич. Кафедру пришлось создавать практически на пустом месте: не было ни преподавателей по спецдисциплинам, ни помещений, ни оборудования, ни методических пособий. Только летом 1955 г. в штате кафедры появились первые преподаватели и инженеры, а сам А. М. Дмитриевич был утвержден в должности заведующего. К сентябрю 1955 г. кафедре были выделены две аудитории во 2-м учебном корпусе, для оснащения которых А. М. Дмитриевич пригласил Валентину Антоновну Ковко, которая стала первым заведующим кафедральной лаборатории.

Валентина Антоновна проделала колоссальную работу по оснащению аудиторий наглядными пособиями, стендами, лабораторным оборудованием, материалами. Огромную помощь оказали кафедре главные металлурги минских заводов: станкостроительных им. Кирова и им. Ворошилова, автомобильного, тракторного и др.

Одновременно велась большая работа по разработке методических и учебных пособий, которой занимался первый штатный преподаватель кафедры доцент Иван Иванович Воячек. Весомую поддержку в методической работе оказали родственные кафедры ведущих технических вузов Советского Союза: МВТУ им. Баумана, Московского автомеханического института, Ленинградского и Киевского политехнических институтов.

К учебному процессу активно привлекались ведущие заводские специалисты, которые уже в скором времени влились в штат кафедры: главный металлург станкостроительного завода им. С. М. Кирова Абрам Моисеевич Милов, директор НИИАвтопрома Николай Григорьевич Интяков, ведущий инженер-конструктор МТЗ Иосиф Борисович Зайгеров, главный металлург МАЗ И. И. Гурдус, замечательные технологи и конструкторы: В. Д. Верховский, К. Т. Буцель, Н. В. Македонский, Л. И. Кабов, В. Н. Канунников, В. А. Гринберг.



Заведующий кафедрой
Сергей Леонидович Ровин,
д-р техн. наук, доцент



Дмитрович
Анатолий Михайлович
(1917-1998)

В 1958 г. произошла реорганизация механического факультета БПИ, и на его базе были созданы механико-технологический и машиностроительный факультеты. В тот же год по инициативе А. М. Дмитриевича, который, продолжая руководить кафедрой, стал первым деканом МТФ (1958–1964 гг.), специально для механико-технологического факультета началось строительство нового учебного корпуса – корпуса № 7. После ввода его в эксплуатацию в 1961 г. кафедра получила не только прекрасные помещения для лекционных и лабораторных занятий, но и настоящий опытно-экспериментальный литейный цех практически со всеми основными участками, оснащенный действующим технологическим и вспомогательным оборудованием, а студенты – возможность изучать технологию и оборудование по всем переделам литейного производства непосредственно на кафедре.

В 1959 г. состоялся первый выпуск белорусских инженеров-литейщиков, которые были востребованы не только на заводах республики, но и далеко за ее пределами.



Первый выпуск инженеров-литейщиков (1959 г.)

С 1962 г. состав кафедры начинает пополняться ее собственными выпускниками: первым из них стал Степан Сафронович Гурин (выпускник 1959 г.), в 1963 г. на кафедру распределился Л. Е. Ровин, в 1965 г. пришел А. М. Гришанович, в 1967 г. – А. А. Мурог и Н. А. Сенькин, в 1968 г. – Е. И. Шитов и В. В. Червань, в 1969 г. – Д. М. Кукуй и В. Ф. Соболев, в 1973 г. – В. А. Скворцов, в 1976 г. – А. С. Чаус и В. А. Стасюлевич, в 1983 г. – Ф. И. Рудницкий, в 1985 г. – Н. Ф. Невар, в 1988 г. – С. Л. Ровин и И. В. Рафальский, в 1992 г. – А. Н. Крутилин. Традиция привлекать к работе на кафедре ее выпускников сохраняется и сегодня.

В 60-е годы на кафедре сформировался замечательный научно-педагогический коллектив, способный готовить не только инженеров, но и специалистов высшей квалификации. В 1963 г. в БПИ был открыт прием в аспирантуру по специальности «Машины и технология литейного производства». И уже в 1966 г. под руководством А. М. Дмитриевича состоялась успешная защита первой белорусской

кандидатской диссертации по литейному производству: Г. Ф. Ковалевский «Некоторые вопросы влияния упругих колебаний на структуру и свойства серого чугуна». В 1967 г. защитились В. Д. Маронова («Исследование и разработка параметров процесса изготовления жидкостекольных стержней») и Н. А. Сви-дунович («Исследование ввода в чугун присадок на основе окиси магния с целью десульфурации чугуна и сфероидизации графита»). Всего же под руководством Анатолия Михайловича была подготовлена 21 кандидатская диссертация, трое из его учеников стали впоследствии докторами наук.

За плодотворную научную деятельность, подготовку высококвалифицированных специалистов и значительный вклад в развитие высшего технического образования в республике А. М. Дмитривичу было присвоено почетное звание «Заслуженный работник народного образования БССР», четырежды он награждался медалями Верховного Совета СССР, а в Белорусской Советской Энциклопедии он назван в числе главных организаторов подготовки инженерных кадров и научных исследований в области литейного производства.

Кафедра развивалась, увеличивался набор студентов и аспирантов, расширялся штат преподавателей, укреплялись связи с заводами, осваивались новые направления исследований, росли ее авторитет и известность. В 1972 г. на кафедре была создана первая отраслевая научно-исследовательская лаборатория «НИЛОГаз», которую организовал и возглавил выпускник кафедры, канд. техн. наук Леонид Ефимович Ровин. «НИЛОГаз» стал первой в СССР лабораторией очистки газовых выбросов в литейном производстве. Разработанные в лаборатории высокоэффективные, низкоэнергозатратные системы и аппараты мокрой очистки выбросов от плавильных агрегатов были установлены в сотнях литейных цехов по всему Советскому Союзу и до сих пор являются одними из самых востребованных при организации очистки выбросов от ваграночных установок и дуговых печей.

В 1976 г. кафедру возглавил доктор технических наук, профессор Евграф Иосифович Бельский. Будучи крупным специалистом в области материаловедения и технологии машиностроения, Е. И. Бельский значительно расширил сферу кафедральных научных интересов. Начались работы по созданию новых сплавов и технологий получения литого инструмента и технологической оснастки, разработка технологий и материалов для химико-термической обработки и других технологий, направленных на снижение стоимости и повышение стойкости инструмента и оснастки. На кафедру были приглашены известные и молодые ученые-металловеды: доктор технических наук, профессор Римма Лазаревна Тофпенек, кандидаты технических наук, доценты И. А. Рищев, Ю. В. Соколов, В. И. Краевой, М. В. Ситкевич, В. А. Стефанович.

Благодаря усилиям Е. И. Бельского была значительно обновлена лабораторная база и организовано преподавание курса «Материаловедение» для студентов всех специальностей механико-технологического факультета и других факультетов БПИ машиностроительного профиля.

В конце 70-х под руководством Е. И. Бельского силами сотрудников и студентов кафедры при активной помощи работников механико-технологического факультета и содействии ректората была проведена реконструкция опытно-экспериментального литейного цеха, в результате которой были построены новые научно-исследовательские и учебные лаборатории, оснащенные современным экспериментальным, аналитическим и испытательным оборудованием: металлографическая и рентгеноспектральная лаборатории, лаборатория литейных сплавов, лаборатория исследования и испытаний формовочных и стержневых смесей.

В 1980 г. значительный вклад Е. И. Бельского в развитие науки и образования, подготовку научных кадров, решение важнейших научно-производственных задач был отмечен присвоением ему звания «Заслуженный деятель науки и техники Белорусской ССР».

Под руководством Е. И. Бельского значительно вырос авторитет кафедры как в научных кругах, так и в среде производителей, причем не только в СССР, но и далеко за его пределами. На кафедре значительно увеличилось количество иностранных студентов, достаточно сказать, что в некоторых группах в 80-е годы количество иностранцев не уступало количеству советских студентов. Это были ребята из Польши и ГДР, Вьетнама и Венгрии, Чехословакии и Кубы, Ирака и Перу, Ирана и Нигерии и многих других стран. С учетом стремительного развития новой техники на кафедре была открыта новая



Бельский
Евграф Иосифович
(1925–2000)



Коллектив кафедры «МиТЛП» БПИ в 1980 г.

специализация «Робототехнические системы литейного производства». Неотъемлемой частью жизни кафедры стала активная студенческая научно-исследовательская работа. Студенты как советские, так и иностранные участвовали в выполнении хоздоговорных работ и бюджетных тем, становились соавторами научных статей и изобретений. В исследовательскую работу были вовлечены не только студенты дневного отделения, но и заочники, которые без отрыва от производства выполняли реальные исследовательские дипломные проекты и внедренческие работы. Результаты такой деятельности не замедлили сказаться на увеличении количества аспирантов, в том числе и зарубежных, которые успешно защищали кандидатские и докторские диссертации. Многие из них стали ведущими учеными и крупными руководителями в своих странах: Хайко Глате (Германия), Данг Мау Тьен (Вьетнам), Асдрубаль (Куба), Ннука (Нигерия) и др. К началу 90-х годов на кафедре было подготовлено уже более 40 кандидатов и 3 доктора технических наук: Давыд Михайлович Кукуй, Михаил Васильевич Ситкевич и Владимир Федорович Соболев.

Для внедрения в производство кафедральных научных разработок и более эффективного использования накопленного научно-технического потенциала в 80-е годы при кафедре были открыты две новые научно-исследовательские лаборатории «Материаловедение и литейное производство» и «Машины и технология литейного производства».

Сложив с себя в 1988 г. полномочия заведующего кафедрой, Евграф Иосифович много внимания стал уделять своему давнишнему увлечению – изготовлению литых художественных изделий. Это хобби вылилось в подготовку нового специального курса для студентов кафедры «Художественное литье» и создание участка изготовления отливок по выплавляемым моделям в кафедральной лаборатории. Сегодня в этой лаборатории проводятся учебные занятия, организован кружок художественного литья, а, кроме того, осуществляется выполнение уникальных заказов белорусских художников и скульпторов, предприятий и организаций, крупнейших научных и культурных форумов, таких, как «Славянский базар», кинофестивали, международные научно-технические конференции и выставки.

В 1988 г. на должность заведующего кафедрой был избран доктор технических наук, профессор Давыд Михайлович Кукуй.

Он был одним из лучших студентов на своем курсе, активно занимался исследовательской работой и сразу по окончании учебы в 1969 г. был распределен для работы на кафедру. Через год поступил в аспирантуру и уже в 1974 г. блестяще защитил кандидатскую диссертацию. В 1980 г. возглавил только

что созданную на кафедре отраслевую научно-исследовательскую лабораторию «Машины и технология литейного производства».

В 1987 г. Давыд Михайлович защитил докторскую диссертацию и через год стал первым «доморощенным» руководителем кафедры. Все последующие руководители кафедрой были ее выпускниками.

Конец 80-х – начало 90-х годов ознаменовались крутым «переломом» в жизни страны. Прекратил свое существование Советский Союз, произошел разрыв устоявшихся связей. Глубокий экономический и политический кризис поразил все страны СНГ, включая и нашу Беларусь. Резко упали объемы производства, прекратилось госбюджетное и хоздоговорное финансирование вузовской науки, в 2–3 раза снизились реальные зарплаты работников кафедры. Все это требовало выработки новой стратегии развития кафедры, осознания такого понятия, как «рынок» инженерных кадров, и поиска своей «ниши» на этом рынке.

В этих непростых условиях в полной мере проявились организаторские способности Давыда Михайловича Кукуя. Весь коллектив кафедры был вовлечен в разработку новых путей развития. Благодаря энергии и таланту руководителя, сплоченности и энтузиазму коллектива кафедра не только выжила, сохранила и приумножила свой потенциал, но и стала центром объединения белорусских литейщиков и металлургов: в 1991 г. была создана Белорусская ассоциация литейщиков и металлургов, объединившая более 60 организаций и свыше 2 тысяч индивидуальных членов, председателем которой был избран Д. М. Кукуй; в 1993 г. под эгидой Экономической комиссии ООН и при содействии правительства Республики Беларусь впервые в стране был организован грандиозный по тем временам Международный семинар по литейному производству и экологии «Эколит-93», положивший начало уже традиционным сегодня МНТК «Литейное производство и металлургия. Беларусь», которые ежегодно собирают в Беларусь литейщиков и металлургов со всех уголков мира; в 1998 г. начался выпуск ежеквартального журнала «Литье и металлургия», ставшего трибуной литейщиков и металлургов не только Беларуси, но и стран СНГ и дальнего зарубежья.

Продолжалась и расширялась исследовательская и внедренческая работа на кафедре и в кафедральных лабораториях, разрабатывались и совершенствовались технологии получения, термообработки и поверхностного упрочнения литого инструмента и технологической оснастки, модифицирования и микролегирования чугунов и сталей, составы формовочных и стержневых смесей, способы и приборы контроля их качества, противопопригарные краски и покрытия для литейных форм и стержней, материалы и способы модифицирования силикатных связующих, оборудование и технологические процессы для выбивки и регенерации жидкостекольных смесей. В 1990 г. за разработку и широкое внедрение в производство эффективных технологических процессов получения отливок Давыд Михайлович Кукуй был удостоен звания лауреата Государственной премии БССР.

В 1992 г. кафедра приняла активное участие в организации на механико-технологическом факультете учебного научно-производственного центра «Метолит», который был фактически первым университетским технопарком в Беларуси, а сегодня стал одной из крупнейших инновационных площадок – «Научно-технологическим парком БНТУ «Политехник». В 1993 г. по инициативе Д. М. Кукуя на базе кафедры было создано научно-производственное предприятие «Технолит», которое стало первым дочерним предприятием и первым резидентом молодого технопарка. Организация предприятия позволила значительно ускорить внедрение кафедральных разработок в производство, а созданные на предприятии производственные мощности дали возможность отрабатывать технологию изготовления и выпускать не только опытные образцы, но и промышленные партии созданных формовочных и специальных материалов для литейного производства: противопопригарных красок, разделительных покрытий, добавок в формовочные смеси, покровных флюсов и т. д.

Развитие компьютерной техники и информационных технологий в 90-е годы послужили толчком для нового направления кафедральной научной работы, которое возглавили доктор физико-математических наук, профессор Александр Николаевич Чичко и доктор технических наук, профессор Владимир Федорович Соболев: исследование и разработка прикладных программных продуктов для компьютерного моделирования процессов заполнения литейных форм и кристаллизации отливок, термических фазовых превращений в отливках и слитках в процессе их охлаждения.



Кукуй
Давыд Михайлович
(1946–2014)

Разработанные на кафедре технологии, материалы, программные продукты получили широкое внедрение на белорусских и российских, украинских и казахстанских предприятиях, были отмечены многочисленными дипломами национальных и международных выставок, неоднократно становились победителями престижных международных конкурсов, только за период с 1990 по 2010 г. сотрудники кафедры стали авторами более 70 отечественных и зарубежных патентов.

Благодаря усилиям Д. М. Кукуя на ведущих белорусских производственных предприятиях и в научных организациях отрасли были созданы шесть филиалов кафедры: на Белорусском металлургическом заводе, Гомельском литейном заводе «Центролит», в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, ОАО «БЕЛНИИЛИТ», на Минском тракторном заводе и Филиал ЗАО «Атлант» – Барановичский станкостроительный завод. Это позволило усилить взаимодействие кафедры с производством, отраслевыми и академическими институтами, укрепить связь учебного процесса с реальным производством и сохранить высокий уровень проведения производственных технологических, конструкторских и преддипломных практик, привлечь к работе со студентами ведущих специалистов в области литейного и металлургического производств. В соответствии с веяниями времени на кафедре были открыты новые специализации: «Технология, оборудование и автоматизация литейного производства» и «Международный маркетинг и менеджмент в металлургическом производстве». Несмотря на проблемы с государственным финансированием, Д. М. Кукуя благодаря привлечению спонсорской помощи удалось обновить и переоборудовать кафедральные аудитории, полностью оснастить два класса современной компьютерной техникой и прикладным программным обеспечением, что позволило ввести в учебные программы дисциплины, связанные с математическим и компьютерным моделированием процессов формирования отливок и автоматическим проектированием модельной оснастки и технологического оборудования. Большое внимание Давыд Михайлович уделял подготовке не только инженеров, но и специалистов высшей квалификации – кандидатов и докторов наук. Под его руководством было подготовлено и защищено 18 кандидатских и 3 докторских диссертаций. На кафедре сложился мощный научно-педагогический коллектив, к концу 90-х в ее составе работали 6 профессоров, докторов наук и 8 доцентов, кандидатов технических наук. Под руководством Д. М. Кукуя кафедра «Машины и технология литейного производства» многократно признавалась победителем и входила в тройку лучших выпускающих кафедр БГПА-БНТУ.

В 2014 г., после трагической гибели Д. М. Кукуя, кафедру возглавил кандидат технических наук, доцент Александр Николаевич Крутилин, выпускник кафедры 1974 г. После окончания института он год отработал в НИИ порошковой металлургии и снова вернулся в БПИ в лабораторию «Прогрессивные



Профессорско-преподавательский состав кафедры «МиТЛП» – победители соревнования среди выпускающих кафедр БГПА 1996 г.

технологии производства отливок из черных и цветных сплавов» под руководством профессора, доктора технических наук Вадима Ивановича Тутова. В 1988 г. А. Н. Крутилин защитил кандидатскую диссертацию. В 1992 г. он был избран на должность доцента кафедры «Машины и технология литейного производства» и проработал на кафедре 27 лет (до февраля 2019 г.). Несмотря на тяжелую болезнь, Александр Николаевич до последнего дня своей жизни продолжал читать лекции, заниматься исследованиями, руководить научной работой студентов и аспирантов, являясь примером беззаветной преданности своему делу и профессии.

В ноябре 2016 г. на должность заведующего кафедрой был избран кандидат технических наук, доцент Юрий Александрович Николайчик, выпускник кафедры 2006 г. Сразу после окончания университета по распределению Юрий Александрович начал работать на кафедре, закончил кафедральную магистратуру и аспирантуру, под руководством Д. М. Кукуя подготовил и в 2013 г. защитил кандидатскую диссертацию. В марте 2018 г. Юрий Александрович был назначен на должность проректора БНТУ по учебной работе, является заместителем председателя Ассоциации литейщиков и металлургов Республики Беларусь, членом редакционного совета и заместителем главного редактора журнала «Литье и металлургия».

В апреле 2018 г. кафедру возглавил кандидат технических наук, доцент Тимур Владимирович Матюшинец, выпускник 2004 г. Сразу после окончания БНТУ Тимур Владимирович поступил в кафедральную магистратуру, а затем в аспирантуру, где под руководством профессора А. Н. Чичко подготовил и в 2009 г. защитил кандидатскую диссертацию. С сентября 2019 г. Т. В. Матюшинец является заведующим кафедрой «Инженерная графика машиностроительного профиля» БНТУ.

В ноябре 2018 г. на должность заведующего кафедрой «Машины и технология литейного производства» был избран доктор технических наук, доцент Сергей Леонидович Ровин, выпускник 1988 г., который продолжает руководить кафедрой и в настоящее время.

Сегодня кафедра продолжает славные традиции своих основателей, преодолевая кризисы и экономические спады, формируются новые дисциплины, совершенствуются методы преподавания, обновляется и развивается материально-техническая база, расширяется международное сотрудничество, укрепляются научные связи с зарубежными вузами. С 2018 г. кафедра перешла на 4-летний цикл обучения инженеров и в том же году был увеличен план набора на специальность студентов дневной формы обучения с 25 до 40 человек. В 2020 г. был начат набор студентов на новую специализацию «Аддитивные технологии в литейном производстве». Сегодня на кафедре учатся более 150 студентов, 6 магистрантов и два аспиранта, 4 из которых иностранцы.

Процесс обучения на кафедре построен по системе интеграционного многоуровневого непрерывного образования «кафедра – действующее производство – кафедра». В настоящее время на ведущих предприятиях отрасли действуют четыре филиала кафедры: на ОАО «Минский тракторный завод», Филиал ЗАО «Атлант» – Барановичский станкостроительный завод, ОАО «БЕЛНИИЛИТ» и ОАО «Гомельский литейный завод «Центролит». Филиалы являются базовыми предприятиями при проведении конструкторской, технологической и преддипломной практики, а на ОАО «МТЗ» для студентов 3- и 4-х курсов организовано также проведение занятий по ряду специальных дисциплин, что позволяет использовать богатую материально-техническую базу предприятия и привлекать к обучению его ведущих специалистов. В настоящее время занятия со студентами проводят заместитель технического директора по подготовке металлургического производства – главный металлург ОАО «МТЗ» Владимир Михайлович Гацуро и начальник литейной лаборатории ОАО «МТЗ» Сергей Александрович Куликов. Функционирование филиалов позволяет повысить эффективность подготовки инженерных кадров и квалификацию профессорско-преподавательского состава, а также расширяет возможности переподготовки инженеров, работающих на производстве.

При кафедре работает научно-исследовательская лаборатория «Материаловедения и технологии литейного производства», которую возглавляет канд. техн. наук, доцент Федор Иванович Рудницкий. Научным руководителем лаборатории является академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор, лауреат Государственных премий БССР и Республики Беларусь Евгений Игнатьевич Марукович. Основными направлениями научно-исследовательской работы НИЛ «МиТЛП» являются: материаловедение литых инструментальных сталей и антифрикционных сплавов; разработка составов литейных сплавов и технологии изготовления литого инструмента и технологической оснастки, включая легирование и модифицирование ультрадисперсными добавками; разработка связующих и вспомогательных материалов для литейного производства (противопригарных добавок и красок) с использованием нанотехнологий и наноматериалов.

В тесном сотрудничестве и постоянном взаимодействии с кафедрой работает созданное на ее базе научно-производственное республиканское унитарное предприятие «Технолит», которое возглавляет выпускник 1988 г. Игорь Антонович Нелюб. УП «Технолит» обладает лицензиями Госпромнадзора и Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь на право конструирования оборудования и проектирования литейных цехов и занимается разработкой плавильного оборудования, систем рекуперации ВЭР, аспирации и пылегазоочистки дымовых газов, разработкой деклараций безопасности литейных и металлургических производств, проектированием и модернизацией литейных цехов, разработкой и изготовлением модельной оснастки, выпуском вспомогательных материалов для литейного и штампового производства.

На кафедре сегодня работают 18 человек: 5 инженеров и 13 преподавателей (8 штатных и 5 совместителей), в том числе 2 доктора и 7 кандидатов технических наук: д-р техн. наук, профессор И. А. Иванов (декан МТФ), д-р техн. наук, доцент С. Л. Ровин, канд. техн. наук, доцент В. А. Скворцов, канд. техн. наук, доцент В. Ф. Одинокко, канд. техн. наук, доцент Ф. И. Рудницкий, канд. техн. наук, доцент М. А. Садоха, канд. техн. наук, доцент Ю. А. Николайчик (проректор БНТУ по учебной работе), канд. техн. наук, доцент В. А. Калиниченко, канд. техн. наук, доцент В. А. Стасюлевич, старший преподаватель Ю. Ю. Гуминский, ассистенты С. В. Коренюгин и И. С. Насевич, преподаватель-стажер А. А. Скворцов, заведующий кафедральной лабораторией В. И. Стельмах, ведущие инженеры С. В. Лавышко и А. Р. Варакса, инженеры 1-й категории И. М. Хвалюк и Т. А. Майорова.



Сотрудники кафедры «МиТЛП» в 2020 г.

Основными направлениями научных исследований и прикладных работ на кафедре в настоящее время являются:

- синтез сплавов и разработка новых технологий получения литого инструмента;
- синтез новых формовочных и специальных литейных материалов (связующих, специальных добавок в формовочные смеси, противопригарных красок, антиадгезионных разделительных покрытий, экзотермических смесей и др.) в том числе с использованием наноструктурированных добавок;
- исследование и поиск путей повышения стойкости технологической оснастки для горячего и холодного формообразования металлических изделий, в том числе методами модифицирования, микролегирования, поверхностного упрочнения и др.;
- разработка оборудования и технологий для малотоннажного рециклинга дисперсных отходов черных и цветных металлов;
- разработка и проектирование систем рекуперации и утилизации ВЭР;
- разработка и проектирование низкоэнергетических систем аспирации и пылегазоочистки выбросов от плавильных агрегатов.

Преподавателями и сотрудниками кафедры опубликовано 26 монографий и учебников, свыше 1000 учебно-методических пособий, научных статей и тезисов, получено более 100 авторских свидетельств на изобретения и патентов, в том числе 12 зарубежных.

Главное достояние кафедры – ее ученики. За 65 лет на кафедре подготовлено около 3000 инженеров, многие из которых стали известными специалистами, формирующими техническую политику в литейном и металлургическом производствах не только в Беларуси, но и за ее пределами. Среди выпускников кафедры «Машины и технология литейного производства» два академика Национальной академии наук Беларуси – лауреат Государственных премий БССР и Республики Беларусь д-р техн. наук, профессор Марукович Евгений Игнатьевич и Заслуженный энергетик Республики Беларусь, д-р техн. наук, профессор Михалевич Александр Александрович, 16 докторов и более 100 кандидатов технических наук, лауреаты Государственных премий, Заслуженные металлурги, Заслуженные работники образования, промышленности, науки и техники, директора заводов и руководители научных организаций, общественные и государственные деятели Беларуси, России, Украины и других стран: Заслуженный деятель науки и техники Республики Беларусь, д-р техн. наук, профессор Свидунович Николай Александрович; Заслуженный деятель науки Российской Федерации, Почетный работник высшей школы России, д-р техн. наук, профессор Ри Хосен; Заслуженный деятель науки и техники Украины, д-р техн. наук, профессор Волчок Иван Петрович; Заслуженный работник образования Республики Беларусь, директор филиала БНТУ «ИПКипК», д-р техн. наук, профессор Реут Олег Павлович; Лауреат Премии Ленинского комсомола БССР, профессор Миссурийского университета (США), д-р техн. наук, профессор Леках Семен Наумович; действительный член Нью-Йоркской академии наук, д-р техн. наук, профессор Комаров Олег Сидорович; заведующий кафедрой «Охрана труда», д-р техн. наук, профессор Лазаренков Александр Михайлович; профессор Словацкого технического университета, д-р техн. наук, профессор Чаус Александр Станиславович; директор Института нанотехнологий (INT) в г. Хо Ши Мин, советник Премьер-Министра Вьетнама, доктор наук, профессор Данг Мау Тьен; д-р техн. наук, профессор Гурин Степан Сафронович; д-р техн. наук, профессор Соболев Владимир Федорович; профессор Белорусского государственного технологического университета, д-р техн. наук, профессор Калиниченко Александр Сергеевич; лауреат Государственной премии БССР, с 1993 по 2017 г. – директор ОАО «БЕЛНИИЛИТ», канд. техн. наук Мельников Алексей Петрович; Заслуженный металлург Республики Беларусь, с 1995 по 2002 г. – директор Гомельского литейного завода «Центролит», с 2002 по 2009 г. – генеральный директор Белорусского металлургического завода, канд. техн. наук Андрианов Николай Викторович; Заслуженный работник промышленности Республики Беларусь, с 2000 по 2012 г. – директор производства – первый заместитель Генерального директора ПО «МТЗ» Астапенко Виктор Андреевич; лауреат Государственной премии БССР, главный конструктор НИИЛитавтопрома Лебедев Юрий Васильевич; лауреат Государственной премии Республики Беларусь, канд. техн. наук Бевза Владимир Федорович; лауреат Государственной премии БССР, с 1978 по 1985 г. – директор НИИЛитавтопрома Афанасюк Иван Николаевич; лауреат Государственной премии СССР, с 1971 по 1982 г. – директор Минского завода шестерен, с 1982 по 1993 г. – генеральный директор Минского тракторного завода Кулешов Иван Иванович; директор завода «Литмаш» с 1984 по 1996 г., канд. техн. наук Потапнев Иван Андреевич; директор Минского завода отопительного оборудования с 1998 по 2009 г. Лукашевич Сергей Федорович; председатель правления ОАО «Липаяс металлургс» (Латвия, 1997–2013 гг.) Захарьин Сергей Алексеевич; директор завода «GOETZ» (г. Золинген, Германия) Хайко Глатэ; директор СООО «Алюмин ТЕХНО» Советников Сергей Иванович; председатель правления компании «ИЛМАКС», канд. техн. наук Иодо Анатолий Евгеньевич; директор ООО «АЛЮТЕХ воротные системы» Коголенок Сергей Михайлович; зам. генерального директора ОАО «МТЗ» Осадник Михаил Викторович; генеральный директор ООО «Дор-электромаш» Тумаха Юрий Сильвестрович; директор Филиала холдинга «МИНСКИЙ МОТОРНЫЙ ЗАВОД» в г. Столбцы Малиновский Леонид Николаевич; член совета директоров компании BAVCOCK & WILCOX COMPANY (Огайо, США), канд. техн. наук Мурач (Свидунович) Маргарита Николаевна; главный металлург холдинга «МИНСКИЙ МОТОРНЫЙ ЗАВОД» Колчин Руслан Леонидович; главный металлург холдинга «БЕЛОМО» Чечуха Владимир Иванович; главный металлург ОАО «Минский тракторный завод» Гацуро Владимир Михайлович; зам. генерального директора ГО «БЕЛВТОРМЕТ» Ковалевский Владимир Васильевич и многие, многие другие.

*Материал подготовил
С.Л. Ровин*

100 ЛЕТ



ХРАНИМ ТРАДИЦИИ, ЖИВЕМ НАСТОЯЩИМ, СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ

КАФЕДРА «ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ, СВАРКА И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ»



Заведующий кафедрой
Федор Иванович Пантелеев,
чл.-корр. НАН Беларуси,
д-р техн. наук, профессор

В послевоенные годы бурное развитие промышленности Беларуси опиралось на достижения науки и техники. Организованная в 1955 году в Белорусском политехническом институте (БПИ) кафедра «Технология металлов», которая явилась родоначальником кафедры «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» («ПМС и ТМ»), возглавила новое для республики направление – порошковую металлургию, основанную на безотходных, наукоемких, ресурсосберегающих технологиях получения материалов и изделий с высокими технологическими свойствами.

Первым заведующим кафедрой стал д-р техн. наук, профессор Роман О. В., который в течение 20 лет руководил кафедрой «Технология металлов», а затем с 1976 по 1989 год кафедрой «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов».

Открытие кафедры «Технология металлов» относится к ноябрю 1955 года. Задачами кафедры в то время являлись:

- подготовка инженеров широкого профиля по общетехническим дисциплинам «Технология конструкционных материалов», «Материаловедение и технология металлов», «Материаловедение и обработка материалов»;
- развитие педагогических направлений в области совершенствования преподавания технических дисциплин в вузах;
- развитие научных направлений в области порошковой металлургии и формировании структур литых заготовок, разработка композиционных материалов и покрытий.

Для подготовки инженерных кадров республики в 1976 году из состава кафедры «Технология металлов» была выделена выпускающая кафедра «Порошковая металлургия» (приказ Министерства образования БССР № 357 от 15.07.77 г.). В этом же году на кафедре начата подготовка инженеров-металлургов по специализации «Композиционные и порошковые материалы, покрытия», которая в 1977 году получила статус специальности. Заведующим кафедрой стал профессор Роман О. В. В состав кафедры входили преподаватели: Афанасьев А. Н., Богданов А. П., Витязь П. А., Дорошкевич Е. А., Горобцов В. Г., Ивашин В. В., Керженцева Л. Ф., Заяш И. В., Габриелов И. П., Хренов О. В.

В этом же году (1976) кафедру «Технология металлов» возглавил д-р техн. наук, профессор Беляев В. И., начался выпуск инженеров-металлургов по специальности «Защита металлов от коррозии». Состав кафедры: Ковалевский В. Н., Комаров О. С., Слабодкин В. Ю., Соколовский А. В., Логинов П. И., Назаров Н. С., Кучерявый А. Г., Дьяконов О. М., Ходосевич В. Г., Рапопорт Л. А.

В 1989 году происходит объединение кафедр «Порошковая металлургия» и «Технология металлов» с образованием кафедры «Порошковая металлургия и технология материалов» («ПМ и ТМ»). Объединенную кафедру возглавил профессор Роман О. В. Одновременно с руководством кафедрой он являлся директором НИИ порошковой металлургии, а позднее – генеральным директором Белорусского государственного научно-производственного концерна порошковой металлургии (БГНПК ПМ).

С 1990 года заведующим кафедрой «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» становится профессор Ковалевский В. Н., а профессор Роман О. В. полностью переключается на работу в БГНПК ПМ. В этом же году открывается филиал кафедры на базе БГНПК ПМ (заведующий филиалом – Ильюшенко А. Ф.).

В 1992 году открыта специальность «Оборудование и технология сварочного производства» по выпуску инженеров-сварщиков, а в 1999 году – заочное отделение по этой специальности. В этот период осуществляется подготовка инженерных кадров в области порошковой металлургии и сварочного производства по специализациям:

- Т 02.01.05 – «Композиционные и порошковые материалы, покрытия».
- Т 02.02.03 – «Технология, оборудование и автоматизация сварочного производства».

В 2003 году кафедра получает новое название «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» («ПМС и ТМ») и открывает свой филиал на базе ПО «Минский тракторный завод» (заведующий филиалом – Дьяченко В. И.) для подготовки инженеров-сварщиков по специальности «Оборудование и технология сварочного производства». В 2006 году открыта лаборатория качества сварных соединений и конструкций «Сварка, родственные технологии и неразрушающий контроль» (заведующий НИЛ – Писарев В. А.).

В этот период и по настоящее время кафедра «ПМС и ТМ» совместно с филиалами в БГНПК ПМ и ОАО «Минский тракторный завод» осуществляет выпуск инженеров по двум специальностям:

- 1-36 01 06 – «Оборудование и технология сварочного производства».
- 1-42 01 02 – «Порошковая металлургия, композиционные материалы, покрытия».

За годы с момента образования кафедры «ПМС и ТМ», а это более 40 лет, для отраслей народного хозяйства Белоруссии в областях порошковой металлургии и сварочного производства выпущено более 700 инженеров-металлургов и более 500 инженеров-механиков сварщиков, из которых более 80 инженеров получили дипломы с отличием, 7 – стали докторами наук, более 20 – кандидатами наук.

Вот только не полный список выпускников, имеющих диплом с отличием по кафедре «ПМС и ТМ», окончивших БНТУ в разные годы:

Балаш С. А., Болтуть Л. Ю., Бордовская Ж. М., Булыга Н. Н., Быкова Е. В., Владыко М. Е., Волчек Е. В., Дедюля Н. С., Елховенко И. В., Калачева Т. В., Касперович Л. А., Кисель Е. Н., Козлов А. А., Короткая С. А., Краснокутская А. Н., Куксо Н. А., Лапик А. А., Левандовская Л. В., Локотко П. Р., Лужковская Л. В., Митлин М. Е., Новикова О. В., Парфененко И. А. Прежина Т. Е., Пинчук Г. Ю., Романенкова Т. Е., Романовский А. О., Старовойтова Т. П., Сморгы О. Л., Скокевич А. И., Скрылева О. В., Талако Т. Л., Тумилович М. В., Туровская Е. С., Усманова Е. В., Филозопович И. В., Хоменко Г. И., Хоптина В. А., Цыпоркина Э. Л., Шанова Н. Г., Шидловская С. И. и др.

В 2013 году открыта подготовка специалистов по второй ступени образования (магистратуры) по специальности 1-36 80 04 – «Обработка конструкционных материалов в машиностроении» (дневная форма получения образования в соответствии с ОКРБ 011–2009) и специальности практико-ориентированной магистратуры 1-36 81 03 – «Сварочные и родственные технологии в промышленности» (заочная форма получения образования). За небольшой период времени подготовлено свыше 20 специалистов, получивших квалификацию магистр технических наук.

В течение многих лет кафедра осуществляет подготовку специалистов высшей квалификации через аспирантуру и докторантуру по специальностям 05.03.06 – «Технология и машины сварочного производства» и 05.16.06 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы». За период существования кафедры 10 сотрудников защитили докторские диссертации, свыше 120 аспирантов и соискателей получили степени кандидатов технических наук.

С 2015 года по настоящее время кафедра готовит специалистов квалификации «инженер» в области сварочного производства для предприятий РБ по специальности 1-36 01 06 – «Оборудование и технология сварочного производства» очной (5 лет) и заочной (сокращенной до 4 лет) форме получения высшего образования, интегрированного со средним специальным образованием.

За период обучения будущие инженеры получают знания в сферах, необходимых для осуществления своей профессиональной деятельности – разработка технологических процессов сварки и проектирование оборудования. Это специальные дисциплины: «Теория сварочных процессов», «Технология сварки плавлением и термической резки», «Технология и оборудование сварки давлением», «Автоматизация сварочного производства», «САПР сварочного производства», «Проектирование и производство сварных конструкций» и др.

В современных компьютерных классах выполняются работы по проектированию технологических процессов сварки, оборудования, сварных конструкций и приспособлений. Осваиваются автоматизированные системы управления сварочными комплексами, составляющие основу сварочного производства современного промышленного предприятия. При прохождении производственных практик на ведущих

промышленных предприятиях республики приобретает необходимый производственный опыт. Глубокая практическая подготовка также проводится в лабораториях кафедры, оснащенных современным оборудованием, где будущие инженеры привлекаются к научным исследованиям.

После окончания учебы дипломированные инженеры смогут продолжить обучение в магистратуре и далее в аспирантуре по своей родственной специальности с последующей защитой диссертации по одному из новых направлений в области теории и технологии сварки.

Выпускники кафедры работают во всех отраслях реального сектора экономики Республики Беларусь как в государственных, так и в частных компаниях с перспективами карьерного роста. Это инженер-технолог по разработке технологических процессов сварки с применением компьютерной техники, начальник технологического бюро сварки или начальник конструкторского бюро; заместитель главного технолога и др.

Острый дефицит промышленности Республики Беларусь в квалифицированных инженерах-сварщиках в последнее время не покрывается количеством выпускаемых инженеров-сварщиков. Поэтому при распределении кадров отсутствует проблема с трудоустройством. Распределение осуществляется на ведущие предприятия республики, такие, как ОАО «БелАЗ», Белтрансгаз, «ЦентроЭнергоМонтаж», ОАО «Амкодор», ОАО «МАЗ», ОАО «МТЗ», Минский завод холодильников, НПРУП «КБТЭМ-ОМО», ОАО «МЗКТ», ОАО «Промтехмонтаж», ОАО «Белкоммунмаш» и др. Здесь знания и умения, инициатива и интеллект будущих инженеров будут востребованы в деле успешного развития народного хозяйства Республики Беларусь.

В настоящий момент на кафедре трудятся 13 преподавателей, среди которых три доктора и восемь кандидатов наук, один член-корреспондент НАН Беларуси. Кафедру возглавляет член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси (2004), доктор технических наук (1992), профессор, Заслуженный деятель науки РБ (2011) Пантелеенко Федор Иванович.

Кафедрой осуществляется успешное международное сотрудничество с научными учреждениями и промышленными предприятиями Республики Беларусь, Российской Федерации, Украины, Китая, Финляндии, Швеции, Индии и других стран.

Научно-технические разработки сотрудников кафедры отмечены Государственными премиями БССР и РБ, премиями Совета Министров СССР и РБ, ВЛКСМ, ЛКСМБ, медалями и дипломами ВДНХ СССР и других международных выставок.

*Материал подготовили
Ф. И. Пантелеенко, Е. Б. Демченко*

100 ЛЕТ



ХРАНИМ ТРАДИЦИИ, ЖИВЕМ НАСТОЯЩИМ, СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ

КАФЕДРА «МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ»

Деятельность кафедры начинается с 1 апреля 1969 г., когда была организована кафедра «Литейное производство черных и цветных металлов» для подготовки инженеров-металлургов по одноименной специальности. 1 февраля 1993 г. кафедра получила название «Металлургия литейных сплавов», а с 30 июня 2017 г. в связи с объединением с кафедрой «Металлургические технологии» кафедра называется «Металлургия черных и цветных сплавов».

Основателем кафедры «Литейное производство черных и цветных металлов» является доктор технических наук, профессор Худокормов Дмитрий Николаевич, который возглавлял кафедру до 1993 г. Одновременно с ним на кафедру перешли его бывшие аспиранты, ассистенты кафедры «Технология металлов» Валентин Михайлович Королев и Анатолий Маркович Галушко, успешно защитившие кандидатские диссертации и избранные на должности. Для работы на кафедре была приглашена кандидат технических наук, доцент Корякова Ольга Филипповна, проработавшая до 1973 г.

В дальнейшем после окончания аспирантуры в преподавательскую работу включились Бахмат Владимир Афанасьевич (1969 г.), получивший опыт практической работы на Минском моторном заводе и в Минском филиале НИИТАвтопрома; Винокуров Валерий Константинович (1971 г.) после работы в Минском филиале НИИТАвтопрома и Мартынюк Михаил Николаевич (1970 г.), прошедший инженерную закалку Минского автомобильного завода и проработавший на кафедре до 2000 г. Первый выпуск специалистов состоялся в 1971 году.

В 1972 году на кафедру с научно-исследовательской группой переходит кандидат технических наук Тутов Вадим Иванович, создавший и развивший новое направление в области специальных методов литья – непрерывное литье фасонных заготовок, и вскоре защитивший докторскую диссертацию. Перспективность данного направления в дальнейшем привела к созданию научно-исследовательской лаборатории «Прогрессивные технологические процессы производства отливок из черных и цветных сплавов».

С первых дней своего существования кафедра ориентировалась на развитие исследований по специальности с привлечением для этих целей студентов 3–5-х курсов. В рамках научного направления в 70-е годы при кафедре создаются две отраслевые научно-исследовательские лаборатории по перспективным металлургическим направлениям литейного производства. Одну из них – ОНИЛ «Прогрессивных процессов плавки высокопрочного чугуна» возглавил кандидат технических наук Леках Семен Наумович, другую – ОНИЛ «Очистки газовых выбросов литейных цехов» – кандидат технических наук Ровин Леонид Ефимович (в настоящее время доцент кафедры «Металлургия и технология обработки материалов» Гомельского ГТУ им. П. О. Сухого).

В 70–80-е годы к преподавательской работе привлекаются выпускники кафедры Иван Владимирович Дорожко (1973 г.), Болеслав Мечеславович Немененок (1980 г.), Геннадий Витольдович Довнар (1982 г.), Александр Миронович Михальцов (1983 г.), что приводит к активизации научных исследований по модифицированию алюминиевых сплавов и совершенствованию технологии литья под высоким давлением.

В 1993 году кафедру возглавляет профессор В. М. Королев и она реорганизуется в кафедру «Металлургия литейных сплавов». Усиливается подготовка студентов в области переработки различных отходов машиностроительного производства, экологии, гибких технологий в металлургическом переделе. При кафедре открывается четвертая НИЛ «Ресурсосберегающие технологии» (заведующий – доктор технических наук С. Н. Леках).



Заведующий кафедрой
Болеслав Мечеславович
Немененок,
д-р техн. наук, профессор

В 1999 году на должность заведующего кафедрой избирается доцент Б.М. Немененок, который в декабре этого же года успешно защищает докторскую диссертацию и при кафедре открывается пятая НИЛ «Металлургия сплавов и литейные материалы» (заведующий – кандидат технических наук Анатолий Григорьевич Слуцкий). Для педагогической работы привлекаются молодые кандидаты технических наук – Александр Павлович Бежок и Сергей Петрович Задруцкий, окончившие кафедру с отличием и оставленные при ней в аспирантуру. Одновременно открывается набор студентов на специализацию «Охрана окружающей среды в металлургическом производстве» и завязываются более тесные контакты с Белорусским металлургическим заводом.

В 2000 году создается учебно-научно-производственное объединение БГПА – БМЗ и открывается подготовка инженеров-металлургов по специализации «Электрометаллургия черных и цветных металлов». В это время для работы на кафедре приглашается кандидат технических наук, доцент Игорь Владимирович Рафальский, специализирующийся в области САПР и информатики. В декабре 2000 года за выдающийся вклад в развитие высшего образования Президентом Республики Беларусь установлены персональные надбавки заведующему кафедрой Б.М. Немененку и доценту И.В. Рафальскому.

Из проведенных исследований на кафедре наиболее широко известен технологический процесс получения отливок из алюминиевых сплавов с использованием в шихте вторичных силуминов, внедренный на Минском моторном заводе и Мелитопольском заводе «Автоцветлит». Основные разработчики данной темы – Д.Н. Худокормов, А.М. Галушко, С.Н. Леках, Б.М. Немененок, Г.В. Довнар, М.И. Стриженков. В 1978 году работа была отмечена Государственной премией БССР. Внедрение разработки на ММЗ дало возможность использовать в шихте при выплавке сплава АЛ4 (АК9ч) до 30 % вторичного сплава АК9, что позволило получить экономический эффект более 400 тыс. руб. (в ценах 1980 г.). В дальнейшем разработка была внедрена и на других предприятиях сельхозмашиностроения. Несмотря на более чем 40-летний срок, данный технологический процесс используется и в настоящее время, при этом интерес к его применению постоянно растет из-за высокой стоимости шихтовых материалов. Кафедрой выполнены также исследования по снижению металлоемкости отливок из алюминиевых сплавов, повышению их эксплуатационной надежности и использованию вторичных силуминов взамен деформируемых алюминиевых сплавов в линейных шаговых двигателях. Учитывая, что качественное литье из силуминов невозможно получить без рафинирования, были разработаны и предложены новые низкотоксичные составы для дегазации алюминиевых сплавов, разработаны технические условия и экологические паспорта Республики Беларусь и Российской Федерации, которые позволили использовать новые рафинирующие препараты на 28 заводах стран СНГ, включая АвтоВАЗ, АМО ЗИЛ и другие крупные предприятия (разработчики – Б.М. Немененок, С.П. Задруцкий, Г.А. Румянцева, С.П. Королев, Н.И. Бестужев). В настоящее время данные составы дегазаторов и модификаторов производятся ОДО «Эвтектика» и ОДО «Политег-Мет». Продукция поставляется на предприятия Республики Беларусь, Российской Федерации, Украины, Словении.

В области литья под высоким давлением кандидатами технических наук В.А. Бахматом, А.М. Михальцовым и инженером В.А. Алешко разработаны водоэмульсионные смазки для пресс-форм, исключаящие образование налета на отливках и улучшающие санитарно-гигиенические условия труда, а также предложены мероприятия по повышению плотности отливок, включающие допрессовку и вентиляцию пресс-форм. В настоящее время работы в данном направлении проводятся под руководством канд. техн. наук, доцента А.М. Михальцова. Запатентованный им, совместно с А.А. Пивоварчиком и В.А. Розумом, состав разделительного покрытия широко используется при литье под высоким давлением на многих предприятиях СНГ.

Группа исследователей под руководством доктора технических наук В.И. Тутова разработала новый способ получения машиностроительных заготовок методом непрерывного литья с использованием песчаных стержней, который был отмечен премией Совета Министров СССР. Данная разработка широко внедрена на предприятиях Беларуси, Украины и Казахстана при производстве отливок из легированного чугуна, бронзы, нержавеющей стали.

Старейшая научно-исследовательская лаборатория кафедры НИЛОгаз занималась разработкой высокоэффективных систем очистки пылегазовых выбросов от вагранок открытого типа, электродуговых печей, гальванических отделений, пескострельных автоматов для изготовления стержней по горячей оснастке. Малоэнергоёмкие аппараты очистки легко компонуются с действующим оборудованием, а конструкция мокрого пылеуловителя для вагранок с использованием пневмогидравлических форсунок на втором ярусе орошения ваграночных газов позволила обеспечить остаточную запыленность в пределах

100–150 мг/м³. Разработки лаборатории используются на многих предприятиях Беларуси, Украины, Российской Федерации. Предложен ряд касетных фильтров с использованием ионообменных волокон, хорошо зарекомендовавших себя на цветнолитейных и гальванических участках. В лаборатории также были выполнены исследования по локализации и обезвреживанию газовых выбросов при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке с использованием вакуумирования. Для широких диапазонов колебаний режимов обезвреживания многокомпонентных газовых потоков в лаборатории разработана абсорбционно-биологическая система улавливания и обезвреживания органических соединений при производстве стержней в нагреваемой оснастке. Освоенная на Барановичском станкостроительном заводе ЗАО «Атлант» система показала высокую степень очистки от фенола, формальдегида, аммиака, метанола с последующим обезвреживанием сточных вод биологическим методом. В настоящее время данное направление развивается на УП «Промышленные экологические системы» (директор – выпускник кафедры Ю. П. Шаповалов).

Сотрудниками лаборатории НИЛлит разработаны и внедрены в производство технологические процессы получения высокопрочного чугуна взамен литой стали, проката, серого и ковкого чугунов для отливок массой от 0,5 до 6000 кг, что практически охватывает весь диапазон развеса машиностроительного литья (разработчики – С. Н. Леках, В. М. Королев, Н. И. Бестужев, В. А. Розум, И. В. Хорошко, С. П. Королев, В. М. Михайловский). Разработанные технологии получения ЧШГ и ЧВГ внедрены на ПО «Чебоксарский завод промышленных тракторов», Купянском литейном заводе, Назаровском заводе сельскохозяйственного машиностроения, Павлодарском тракторном заводе, Барановичском станкостроительном заводе и других предприятиях. Для модифицирования серого чугуна при получении отливок в кокиль и разовых литейных формах разработаны составы легкоплавких модификаторов и освоено производство гранулированного модификатора МИГ (разработчики – С. Н. Леках, Н. И. Бестужев, А. Г. Слуцкий, В. А. Шейнерт) и быстроохлажденных ленточных модификаторов («Чипс»-процесс) (разработчики – Д. Н. Худокормов, С. Н. Леках, А. С. Калиниченко, Н. П. Жвавый, В. А. Шейнерт). Разработана также технология внутриформенного инокулирующего модифицирования с помощью литых легкоплавких вставок из сплава на основе системы Al – Si – PЗМ – Fe, обеспечивающая за счет конструктивных параметров равномерную степень обработки расплава (разработчики – Д. Н. Худокормов, С. Н. Леках, Г. Ф. Андреев). Применение данной технологии дало возможность проводить выборочное модифицирование отдельных отливок и получать различные марки чугуна на основе одного расплава.

Физико-химический анализ процессов легирования чугунов и сталей через шлаковую фазу, выполненный С. Н. Лекахом, М. Н. Мартынюком, А. Г. Слуцким и В. Л. Трибушевским, позволил использовать в качестве носителей легирующих элементов (Mo, V, Ni, Co, W) отходы и полупродукты смежных производств. Разработанные новые технологии легирования через шлаковую фазу обеспечили снижение затрат на легирующие присадки в 2–5 раз. Выплавка экономнолегированных чугунов с использованием разработанных лабораторией технологий реализована на Саранском заводе «Центролит», ОАО «Минский тракторный завод», Алма-Атинском заводе «Поршень», Белорусском автомобильном, Ульяновском, Заволжском и Алтайском моторных заводах.

В дальнейшем исследования в этом направлении были продолжены профессором О. С. Комаровым, канд. техн. наук, доцентом И. Б. Проворовой, канд. техн. наук Р. Э. Трубицким. И. Б. Проворова и Р. Э. Трубицкий по данной тематике защитили кандидатские диссертации.

Для очистки расплавов литейных сплавов от неметаллических включений сотрудниками лаборатории НИЛлит разработаны тканевые фильтровальные сетки, пропитанные специальным составом, что позволяет устанавливать их непосредственно в литейной форме для наиболее браконосных отливок. Основные разработчики данной технологии – М. М. Бондарев и И. А. Храмченков.

Работы по рециклингу цветных металлов получили свое дальнейшее развитие применительно к алюминиевым шлакам и стружке. Сотрудники лаборатории «Ресурсосберегающих технологий» (С. Н. Леках, В. А. Шейнерт, А. Г. Слуцкий, В. Л. Трибушевский, С. Л. Римошевский) разработали и внедрили технологию плавки вторичных алюминиевых сплавов и окисленных шлаков и стружки в роторной печи методом динамической адсорбции. Разработанный метод плавки и созданная для его реализации специальная роторная печь позволяют с высоким металлургическим выходом годного при минимальных энергетических затратах получать вторичные алюминиевые сплавы из дешевых отходов производства.

В настоящее время применительно к данной печи Л. В. Трибушевским разработана безотходная технология переработки окисленных отходов алюминиевых сплавов, алюминиевой стружки и шлаков с получением раскислителя АВ87 в виде чушек и пирамидок, а также раскислительной смеси (АРС)

для обработки рафинировочных шлаков на установке «печь-ковш». Предложена технология получения разжижителей рафинировочных шлаков на основе вторичных алюминиевых шлаков, что позволяет отказаться от использования для этих целей плавикового шпата.

Следует отметить, что усилия сотрудников кафедры и лабораторий направлены не только на разработку новых высокоэффективных и экологически чистых технологий, но и на создание приборов и методик, позволяющих контролировать эти технологии.

Для Назаровского завода сельскохозяйственного машиностроения при участии С. Н. Лекаха и В. А. Розума разработана и внедрена методика прогнозирования формы включений графита по активности кислорода в расплаве чугуна и остаточному содержанию магния, что позволило исключить образование брака по несоответствию структуры. С. В. Киселевым создана гамма микропроцессорных приборов и устройств для контроля эффективности процесса модифицирования силуминов по величине переохлаждения при эвтектической кристаллизации; экспресс-анализатор содержания кремния и углерода в чугунах (СЕ-метр); устройство калориметрирования сплавов по собственному жидкому состоянию; установка «Термозонд» для контроля процесса затвердевания отливок и работы литниковых систем; устройство компьютерной металлографии, позволяющее считывать информацию со шлифа и проводить количественный анализ параметров структуры.

С использованием данных термического анализа канд. техн. наук, доцентом И. В. Рафальским, канд. техн. наук А. В. Арабей, канд. техн. наук П. Е. Лушиком разработана методика определения объема твердой фазы в процессе кристаллизации модифицированного силумина и его теплофизических характеристик. Такая информация позволяет более оперативно и точно реализовывать компьютерное моделирование технологического процесса получения отливок из модифицированных силуминов.

Канд. техн. наук, доцентом И. В. Рафальским совместно с кандидатами техн. наук А. В. Арабей и П. Е. Лушиком разработана технология получения износостойких литейных композиционных сплавов на основе алюминия с использованием отходов алюминия и кварц- и карбидсодержащих материалов.

В связи с уходом на пенсию Д. Н. Худокормова, В. А. Бахмата, А. М. Галушко, В. К. Винокурова, переходом на другую работу В. И. Дорожко, выездом в США С. Н. Лекаха и смертью В. И. Тутова, М. Н. Мартынюка, В. М. Королева к преподавательской работе привлекаются выпускники кафедры кандидаты технических наук А. Г. Слуцкий, А. А. Андриц, В. А. Розум, К. Э. Барановский.

С целью совершенствования процесса обучения будущих специалистов в области литейного и металлургического производств в 2008 году на базе УП «Белцветмет» организован филиал кафедры «Металлургия литейных сплавов».

С 1971 по 2020 год на кафедре подготовлены четыре доктора технических наук (В. И. Тутов, Р. И. Хосен, С. Н. Леках, Б. М. Немененок), три доктора философии (Гоппи Махендранат, Чон Зон Нам, Син Ен Чер), 45 кандидатов технических наук, 1829 инженеров (в том числе 39 специалистов для 11 иностранных государств).

Научно-технические разработки сотрудников кафедры и лаборатории отмечены:

- Государственной премией БССР (д-р техн. наук, проф. Худокормов Д. Н., канд. техн. наук, доцент Галушко А. М.);
- Премией Совета Министров СССР (д-р техн. наук, проф. Тутов В. И.);
- Премией ВЛКСМ (канд. техн. наук Леках С. Н.);
- Премией ЛКСМБ (кандидаты техн. наук Бестужев Н. И., Дорожко С. В., Розум В. А., Слуцкий А. Г., Трибушевский В. Л., Счисленок Л. Л.);
- 9 медалями ВДНХ СССР и многочисленными дипломами и медалями международных выставок, почетными грамотами НАН Беларуси и Министерства образования.

С целью дальнейшего развития металлургической отрасли страны, совершенствования системы подготовки инженерных кадров для промышленного комплекса Республики Беларусь и укрепления научно-технических связей науки с производством в мае 2000 года была создана кафедра «Металлургические технологии» в рамках учебно-научно-производственного объединения «БГПА - РУП «БМЗ». Фундаментом кафедры явились достижения Комплексной научно-производственной лаборатории «Проблемы металлургического производства», созданной в 1988 году совместным приказом Министерства черной металлургии СССР, Академии наук БССР и Белорусского политехнического института. Возглавил кафедру д-р техн. наук, профессор В. И. Тимошпольский, а первыми преподавателями стали канд. техн. наук, доцент И. А. Трусова, С. М. Кабишов, Г. А. Климович и специалисты БМЗ (д-р техн. наук А. Б. Стеблов, канд. техн. наук В. В. Филиппов).

За время существования кафедры ею руководили:

- д-р техн. наук, проф. В. И. Тимошпольский (2000–2008 гг.), который является создателем нового научного направления «Ресурсо- и энергосберегающие теплотехнологические процессы в металлургии»;
- д-р техн. наук, проф. И. А. Трусова (2008–2017 гг.).

Основное направление научно-исследовательской деятельности ученых и специалистов кафедры и лаборатории – модернизация металлургического и машиностроительного комплекса, разработка ресурсо- и энергосберегающих металлургических технологий, теория и технология металлургических процессов (выплавка и внепечная обработка стали в агрегатах высшего технического уровня; кристаллизация, затвердевание и охлаждение слитков и заготовок; технология нагрева и термообработки стали в печах различного конструктивного оформления в линиях прокатных станов; оптимизация теплотехнологических процессов; экспериментальные исследования высокотемпературных теплотехнологических процессов в металлургии; математическое моделирование высокотемпературных металлургических процессов).

К основным разработкам специалистов кафедры и лаборатории «Теории и техники металлургических процессов» можно отнести:

- освоение производства импортозамещающих наукоемких марок сталей в условиях ОАО «БМЗ» (ШХ15, ШХ15СГ с использованием непрерывной разливки, 50ХГФА, высокоуглеродистых марок сталей 80К-90К и др.);
- создание концепции энергосберегающих совмещенных теплотехнологических процессов в металлургических теплотехнологиях;
- формулирование основных положений концепции модернизации парка нагревательных печей металлургических и машиностроительных предприятий;
- разработку комплексной методологии исследования процессов разливки слитков и заготовок, включающую методики проведения промышленных экспериментов и математические модели процессов формирования слитков и непрерывнолитых заготовок с учетом термических напряжений, явлений сегрегации, воздействия электромагнитного перемешивания и других факторов;
- разработку комплексных математических моделей процесса выплавки в сверхмощных дуговых печах при наличии остатка жидкого металла и шлака;
- разработку комплекса математических моделей процессов нагрева в печах различного конструктивного оформления;
- разработку ряда методик расчета процессов затвердевания, охлаждения и нагрева, базирующихся на использовании приближенных методов;
- разработку методики энергоэкологических исследований высокотемпературных процессов и агрегатов;
- разработку проекта газовой нагревательной полуметодической печи (ОАО «МПЗ»);
- осуществление модернизации электропечей сопротивления СШЦМ 6.12–9,5, Ц-105 (ОАО «Могилевхимволокно», ОАО «БЗТДиА»);
- осуществление модернизации закально-отпускных агрегатов ОАО «МАЗ», термических печей ООО «Маштехсервис», обжиговой печи Т-240 ОАО «Мотовело».

Для промышленного комплекса страны кафедрой «Металлургические технологии» подготовлено более 600 специалистов, 25 магистров.

Деятельность лаборатории, а впоследствии и кафедры, всегда была тесно связана с производством. В 1988 году за освоение первой очереди БМЗ В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, Д. Г. Седяко совместно со специалистами БМЗ были удостоены звания лауреатов премии Ленинского комсомола БССР за работу «Системный анализ высокотемпературных металлургических процессов и его применение для освоения первой очереди Белорусского металлургического завода». В 2001 году за многолетний плодотворный труд, большой вклад в обеспечение досрочного пуска в эксплуатацию и освоение проектных мощностей мелкосортно-проволочного стана 150 РУП «БМЗ» В. И. Тимошпольский был награжден орденом Почета, И. А. Трусова – медалью «За трудовые заслуги».

Деятельность кафедры не ограничивается только прикладными исследованиями, а включает ряд фундаментальных теоретических работ. В 1998 году авторскому коллективу (В. И. Тимошпольскому, И. А. Трусовой и др.) присуждена Государственная премия Республики Беларусь в области науки и техники за цикл научных работ «Теория высокотемпературных энерго- и ресурсосберегающих технологических процессов в машиностроении и металлургии».

За высокий научный уровень материалов, обобщающих многолетний опыт исследований в области создания энерго- и ресурсосберегающих технологий, в 2001 году В.И. Тимошпольскому была присуждена премия Национальной академии наук Беларуси за лучшую научную работу.

В 2003 году за опубликованные монографии в области промышленных теплотехнологий, включающих металлургические теплотехнологии, в соответствии с совместным Постановлением Президиума отделения естественных наук РАН и Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности В.И. Тимошпольскому была присуждена Золотая медаль им. М.В. Ломоносова.

В 2004 году заведующему кафедрой В.И. Тимошпольскому присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Республики Беларусь», а в 2007 году почетное звание «Заслуженный деятель науки Республики Беларусь» было присвоено профессору И.А. Трусовой.

В сентябре 2005 года за фундаментальные исследования в области теории теплопроводности в составе международного коллектива авторов В.И. Тимошпольскому и И.А. Трусовой была присуждена Премия Национальной академии наук Беларуси им. академика А.В. Лыкова.

В настоящее время на кафедре «Металлургия черных и цветных сплавов» работают два д-ра техн. наук, профессора (Б.М. Немененок, И.А. Трусова) и 10 канд. техн. наук, доцентов (К.Э. Барановский, А.П. Бежок, Г.В. Довнар, С.В. Корнеев, П.Е. Лущик, А.М. Михальцов, И.В. Рафальский, П.Э. Ратников, Г.А. Румянцева, А.Г. Слуцкий) и один ассистент Е.В. Розенберг. Это одна из немногих кафедр университета, где более 97% преподавателей имеют ученые степени и звания.

Подготовка инженерных кадров осуществляется по специальности 1-42 01 01 – «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)» по специализациям:

1-42 01 01-01 01 – «Литейное производство черных и цветных металлов»;

1-42 01 01-01 02 – «Электрометаллургия черных и цветных металлов»;

1-42 01 01-01 04 – «Компьютерное проектирование литейных и металлургических процессов»;

1-42 01 01-02 02 – «Металлургическая теплотехника и печи»;

1-42 01 01-02 03 – «Организация металлургического производства»

и по направлению специальности 1-42 01 01-03 – «Промышленная безопасность».

Для выпускников колледжей обучение организовано по учебным планам, интегрированным со средними специальными учреждениями образования и составляют 3 года для дневной и 4 года для заочной форм обучения.

На второй ступени получения высшего образования в магистратуре кафедра реализует образовательный процесс по специальности 1-42 80 01 – «Инновационные технологии в металлургии».

Подготовка научных кадров высшей квалификации осуществляется через аспирантуру и докторантуру по двум специальностям:

05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»;

05.16.04 – «Литейное производство».

При кафедре функционирует научно-исследовательская лаборатория «Литейные технологии» (зав. лабораторией канд. техн. наук Л.П. Долгий), в состав которой входит студенческое научно-исследовательское бюро «Сплав».

Гордостью кафедры являются ее выпускники-руководители предприятий:

Коршак В.И. – директор станкостроительного завода «Вистан»;

Трубицкий Р.Э. – канд. техн. наук, директор ОАО «Лидский литейно-механический завод»;

Цыцень М.Г. – директор ПУП «УНИВЕРСАЛ-Лит»;

Ричко Н.А. – директор ОАО «Белоозерский энергомеханический завод»;

Михайловский А.З. – директор ОАО «Барановичский завод станкопринадлежностей»;

Луценко В.П. – зам. директора ОАО «Белцветмет»;

Кашлей В.Р. – зам. директора ОАО «Лидский литейно-механический завод»;

Римошевский С.Л. – канд. техн. наук, директор ОАО «БЕЛНИИЛИТ»;

Лущик П.Е. – канд. техн. наук, заместитель Генерального директора РИУП «Политехник»;

Королев С.П. – канд. техн. наук, директор ОДО «Эвтектика»;

Задруцкий С.П. – канд. техн. наук, директор ОДО «Политег-Мет»;

Трибушевский Л.В. – канд. техн. наук, директор ООО «НПФ «Металлон»;

Овсянников С.Э. – главный инженер ОАО «Лидский литейно-механический завод»;

Андриц А.А. – канд. техн. наук, главный инженер ОАО «Терра Моторс»;

Као Ван Тхи – канд. техн. наук, заместитель директора ООО «Завод 27» в Республике Вьетнам»;

Степанюк А. Н. – зам. главного инженера ОАО «Белцветмет».

Главные металлурги и начальники цехов:

Комиссаров Г. В. – главный металлург Могилевского лифтостроительного завода;

Сергиеня Н. Н. – начальник литейного цеха Барановичского станкостроительного завода ЗАО «Атлант»;

Русак В. М. – главный металлург ЗАО «Амкодор-Лит»;

Фатеев А. В. – главный металлург ОАО «Терра Моторс»;

Гайкевич В. С. – главный металлург ОАО «Белоозерский энергомеханический завод»;

Наливайко О. Г. – начальник цеха ОАО «Белцветмет»;

Сошенко А. А. – начальник цеха ОАО «Белцветмет»;

Савицкий В. А. – начальник цеха ПУП «Цветмет»;

Червинский С. В. – начальник литейного цеха ОАО «Красный Октябрь».

Сотни выпускников кафедры честно трудятся мастерами, технологами, конструкторами, начальниками отделов на различных предприятиях СНГ и в странах дальнего зарубежья, работают преподавателями в университетах, колледжах, занимаются научными исследованиями, находятся на государственной службе.

К сожалению, рано ушли из жизни известные специалисты литейного производства – выпускники кафедры – Демин М. И., Скибарь А. М., Шварц Е. Г., Турок А. И., Шишкин А. Е., Стриженков М. И., Силко Н. Н.

На кафедре имеются все условия для активной научно-исследовательской работы, обучения в магистратуре и аспирантуре. Преподаватели и студенты проводят свои исследования по грантам Министерства образования Республики Беларусь, участвуют в выполнении заданий государственных научно-технических программ. Сотрудники кафедры принимают активное участие в подготовке к изданию ежегодного сборника научных трудов «Металлургия» и материалов республиканской студенческой научно-технической конференции «Новые материалы и технологии их обработки».

На IV Республиканском конкурсе профессионального мастерства «WorldSkills Belarus 2020» студент кафедры Бобров Александр занял первое место и награжден золотой медалью в компетенции «Инженерный дизайн САД». Ему предоставлена возможность участия в мировом конкурсе в г. Шанхай.

Успехи студентов кафедры в научно-исследовательской работе ежегодно отмечаются дипломами Республиканских конкурсов научных работ.

Сотрудники кафедры и лабораторий поддерживают связи с научными организациями и промышленными предприятиями Республики Беларусь, Российской Федерации, Украины, Казахстана, Узбекистана, Индии, Словакии, Египта, Китая, США.

Кафедра совместно с научно-исследовательской лабораторией и филиалом кафедры представляет собой крупное научно-педагогическое подразделение, способное на современном уровне готовить высококвалифицированных инженеров и магистров, решать научно-практические задачи в области металлургии и литейного производства.

*Материал подготовили
Б. М. Немененок, И. А. Трусова*

100 ЛЕТ



ХРАНИМ ТРАДИЦИИ, ЖИВЕМ НАСТОЯЩИМ, СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ

РАЗВИТИЕ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ШКОЛЫ КАФЕДРЫ «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ»



Заведующий кафедрой
Валерий Михайлович
Константинов,
д-р техн. наук, профессор

С момента своего создания в 1953 году кафедра «Металловедение» (1953–1963), «Металловедение и термическая обработка металлов» (1963–1990), «Материаловедение в машиностроении» (1990 г. по н.в.) наряду с подготовкой инженерных и научно-педагогических кадров активно занималась проблемами повышения долговечности разнообразных металлических изделий. В различные исторические периоды развития отечественной промышленности кафедра решала различные, актуальные на тот период научно-технические и учебно-методические проблемы [1].

В период становления белорусского машиностроения (заведующие кафедрой проф. Н. Ф. Маргорин, проф. Л. С. Ляхович), кафедра много внимания уделяла вопросам подготовки остродефицитных инженерных кадров и актуальным проблемам термической и химико-термической обработки различных сталей для молодых белорусских предприятий. В этот период была открыта новая специальность «Металловедение, оборудование и технология термической обработки» и кафедра получила новое название «Металловедение и термическая обработка металлов» (1963 г.). Проф. Л. С. Ляхович развернул активную научно-педагогическую работу по организации научной школы металловедов. Много внимания уделялось металловедению специальных сталей, перспективным направлениям поверхностного упрочнения [2–4 и др.].

К началу 70-х годов XX века кафедра стала авторитетным научно-педагогическим центром металловедения и термической обработки в Советском Союзе. Детально были изучены некоторые процессы промежуточного превращения в сталях (В. В. Сурков), хладноломкость ряда конструкционных сталей (И. А. Рицев), уточнены закономерности структурообразования ряда железоуглеродистых сплавов (Р. Н. Худокормова), а также другие актуальные на тот момент проблемы металловедения.

Активное развитие машиностроительного комплекса страны настоятельно требовало эффективных упрочняющих технологий. Поэтому ведущее место в научно-технических работах кафедры на долгие годы заняли процессы химико-термической обработки. Исследования, проводимые преподавателями, аспирантами кафедры, научными сотрудниками научно-исследовательских лабораторий при кафедре координировались Л. С. Ляховичем и Л. Г. Ворошниним. Под их научным руководством были разработаны различные технологические процессы ХТО. Были разработаны процессы борирования, силицирования, хромирования и др., а также процессы многокомпонентного насыщения. Полученные научно-технические результаты позволили разработать широкую гамму процессов ХТО для повышения износостойкости, жаростойкости, коррозионной стойкости конструкционных и инструментальных сталей, жаропрочных сталей и сплавов, тугоплавких металлов, металлокерамических сплавов (Э. П. Пучков, Г. Г. Панич, Э. Д. Щербаков, Ф. В. Долманов, Г. Ф. Протасевич, Г. В. Борисенок, Ю. В. Туров, М. Г. Крукович, Б. С. Кухарев, Н. Г. Девойно, Е. А. Куликовский, Н. И. Иваницкий, Г. М. Левченко, В. Г. Борисов, М. Н. Мартынюк, Н. Г. Кухарева и др.). Пришедшие несколько позже на кафедру проф. В. М. Ситкевич, Ю. В. Соколов, доц. В. А. Стефанович, В. В. Мельниченко привнесли ряд новых направлений и усилили кадровый состав кафедры. Особое место в работах кафедры занимали процессы получения борсодержащих термодиффузионных слоев. Уже в первых работах этого направления сформировался фирменный стиль научной школы кафедры – глубокий физико-химический анализ процессов структурообразования и эффективная практическая реализация термодиффузионного упрочнения широкого спектра металлоизделий [4].

Личный листок по учёту кадров

Фамилия Ляхович Имя Лев Отчество Витальевич

Дата, место и м-ч рождения 15.05.1919г. г.г.г.г.г.г.

Дата рождения пог. Терис

Национальность русский в. Соц. происхождения лишени?

Партийность чл. КСР партбилет № 01076096

Состоит ли членом ВЛКСМ, с какого времени и № билета с 1939 по 1946гг.

Образование высшее

Наименование учебного заведения и его местонахождение	Фамилия и имя	Год поступления	Год окончания	Среднее образование	Среднее специальное образование	Среднее высшее образование
<u>Минский политехнический институт</u>	<u>Ляхович Лев Витальевич</u>	<u>1947</u>	<u>1954</u>	<u>да</u>	<u>да</u>	<u>да</u>

Фрагмент личного листка по учёту кадров Л. С. Ляховича.

13 мая 1959 г.

Выписка из приказа по Белорусскому политехническому институту

иск. № 608 21 марта 1966 г.

§ I.

Ст. преподавателя кафедры "Металловедение" **ВОРОШНИНУ Леониду Григорьевичу**, в связи с присуждением ученой степени кандидата технических наук, установить оклад 250 руб. в месяц, с 22 января с.г.

Основание: Копия диплома кандидата наук МТН № 019465, выданного ВАКом 22.I.66 г.

Ректор института — П. ЯШЕРИЦЫН.

выписка верна Сле

Фрагмент личного дела Л. Г. Ворошнина

21 марта 1966 г.

Значительный вклад в развитие белорусской научной школы ХТО внес проф. Л. Г. Ворошнин [5]. Под его руководством в 1990 году кафедра начала подготовку инженеров по перспективной специальности «Материаловедение в машиностроении» и получила новое название «Материаловедение в машиностроении». В свое время кандидатская диссертация Л. Г. Ворошнина, посвященная электролизному борированию стали, положила начало большому циклу работ по созданию защитных диффузионных покрытий на металлах и сплавах широкого функционального назначения (износостойких, жаростойких, коррозионностойких, кавитационностойких), которые принесли известность кафедре не только в Советском Союзе, но и за рубежом. Был издан первый производственный справочник по борированию различных сталей и чугунов [6]. Выполнен пионерный цикл работ по теории и технологии химико-термической обработки металлов и сплавов. Разработана детальная методология исследования процессов химико-термической обработки. Разработано более 100 новых диффузионных покрытий как многоцелевого, так и специального назначения. Необходимо отметить активное исследование металлотермических насыщающих сред и разработку промышленных технологий ХТО на их основе (в том числе и внепечным методом). Широко известен справочник «Химико-термическая обработка металлов и сплавов» (изданный в 1981 году коллективом кафедры под редакцией Л. С. Ляховича, а в 1985 году переизданный в Токио на японском языке) [7]. Авторским коллективом разработан ГОСТ 28428-90 «Термодиффузионное упрочнение металлических изделий» (1990 г.). Следует подчеркнуть развитие в этот период новейших на то время направлений ХТО: многокомпонентное термодиффузионное насыщение, оптимизационное планирование экспериментов и математическое моделирование процессов массопереноса при ХТО. Профессор Л. Г. Ворошнин, обладая высокой квалификацией металловеда уральской школы, широким научным кругозором и нетривиальным научным мышлением, придавал большое значение теории и математическому моделированию в материаловедении еще задолго до того, как направление Computational Materials Science оформилось в самостоятельную науку [8]. Многолетний опыт исследований и преподавания на кафедре позволил авторскому коллективу под руководством проф. Л. Г. Ворошнина написать первый в Беларуси учебник «Теория и технология химико-термической обработки» [9]. Учебник был издан уже после смерти Л. Г. Ворошнина благодаря усилиям доц. О. Л. Менделеевой. Спектр научных интересов кафедры в этот период был весьма широк – от разработки броневых и инструментальных сталей до упрочнения твердых сплавов.

Социально-экономические, политические изменения начала XXI века не могли не отразиться на кафедре. Новой Беларуси были нужны новые решения в подготовке материаловедов. Научно-педагогический коллектив кафедры активно начал развивать магистратуру. Современные тенденции развития материаловедения настоятельно потребовали расширения глубины понимания магистрантами физико-химической природы процессов получения новых материалов, особенно диффузионных процессов. Для этого были разработаны интерактивные курсы [10]. Наряду с подготовкой научно-педагогических кадров для системы высшего образования и научных учреждений на кафедре была организована подготовка научно-технических кадров для нужд белорусского машиностроения. Следует отметить, что в современных условиях роль и значение научно-технической инициативы и квалификации в решении производственных задач, в частности металлургических задач, существенно возросли [11]. Как правило, тематика

магистерской диссертации тесно связана с профессиональной деятельностью обучающегося (инженера) и направлена на индивидуальную подготовку специалиста в плане совершенствования действующих и разработки новых энерго-, ресурсосберегающих металлургических технологий. Основной упор был сделан на индивидуальную работу руководителя с магистрантом. В 2010–2017 годах не менее 10–12 человек в год обучались в магистратуре кафедры. За последние годы таким образом повысили свою квалификацию специалисты многих ведущих машиностроительных и металлургических предприятий. Развитие этой магистратуры привело к пониманию того, что наиболее эффективной для производственника является заочная форма обсуждаемой магистратуры. Среди магистрантов были не только молодые специалисты, но и начальники отделов, цехов, главные специалисты предприятий. За последние годы более 40 специалистов успешно защитили магистерские диссертации на кафедре. Ряд из них уже занимают руководящие должности на металлургических и машиностроительных предприятиях Беларуси. Несколько человек последних лет выпуска успешно трудятся за рубежом. Дальнейшим развитием магистерского направления кафедры стало открытие в 2019 году совместно с Научно-практическим центром Государственного комитета судебных экспертиз РБ перспективной специальности магистратуры 1–36 80 09 «Экспертиза материалов машиностроения, покрытий и изделий».

Острота проблемы научно-педагогических кадров стала причиной активизации работ в этом направлении. За последние годы создана определенная система подбора и подготовки талантливой, профпригодной молодежи для работы на кафедре и научной лаборатории (см. рисунок). Большинство молодых сотрудников кафедры являются ее выпускниками.



Структура подготовки научно-педагогических и научно-производственных кадров на кафедре и НИЛ упрочнения стальных изделий в 2006–2020 гг.

В научном плане коллектив кафедры активно работает в магистральном направлении развития теории и технологий диффузионного легирования для повышения долговечности металлических изделий. Защищены докторская диссертация (2008 г.), а также кандидатские диссертации сотрудников и выпускников кафедры: Л.А. Астреко (2006 г.), В.Г. Дашкевич (2009 г.), Г.А. Ткаченко (2011 г.), А.Н. Григорчик (2016 г.), А.В. Ковальчук (2020 г.).

В начале XXI века был выполнен комплекс исследований, позволивший впервые создать новый методологический и технологический подход к получению специальных сплавов для защитных покрытий и технологии их производства диффузионным легированием, в основе которого лежит научно обоснованное проектирование и изготовление востребованных высокоэффективных сплавов для конкретных производственных условий из доступного отечественного сырья, включая отходы металлообработки. Комплекс выполненных исследований стал базой для широкого промышленного внедрения гаммы

новых, отечественных наплавочных сплавов и ресурсосберегающих технологий упрочнения быстроизнашиваемых деталей машиностроения, сельскохозяйственной, мелиоративной и строительной техники, соответствующих современному мировому уровню. Результаты выполненного комплекса работ защищены 30 патентами Республики Беларусь и Российской Федерации. В результате промышленного внедрения научных исследований разработаны пять технических условий на научно-техническую продукцию, четыре технологических регламента на получение сплавов для защитных покрытий, более 20 технологических процессов упрочнения и восстановления деталей машин [12].

В последние годы кафедра активно совершенствует и развивает перспективные направления поверхностного и объемного упрочнения деталей машин и механизмов. Созданы эффективные искробезопасные термодиффузионные слои на конструкционных и инструментальных сталях [13]. Проводится совершенствование традиционных боридных слоев в направлении снижения хрупкости и повышения износостойкости за счет изменения морфологии слоя и дополнительного легирования [14]. Ведутся пионерные работы по термодиффузионному легированию медных сплавов. Разработана оригинальная технология формирования термодиффузионных жаростойких слоев на медных холодильниках производства стекловолна [15].

Интенсификация диффузионного легирования макро- и микрообъектов при ХТО являлась актуальной всегда. На заре развития кафедры проводились подобные исследования [3]. К настоящему времени получены новые научные данные по влиянию псевдосжижения и скоростного термоциклирования на протекание диффузионных процессов в сталях. Установлены и реализованы в производственной технологии особенности структурообразования нитроцементованных диффузионных слоев и сердцевины деталей из доэвтектидных конструкционных сталей при локальном воздействии индукционного циклического нагрева. В результате многократных структурных превращений, фазового наклепа и рекристаллизационных процессов происходит интенсификация твердофазной диффузии, что сопровождается существенным увеличением толщины слоя с формированием высокодисперсной структуры. Разработана и запатентована технология повышения конструкционной прочности почвообрабатывающих элементов за счет комплексного упрочнения поверхности и сердцевины с макрогетерогенным распределением структур по сечению изделия [16].

Создана аддитивная технология формирования термодиффузионных слоев с дополнительным нанесением вакуумных нитридных покрытий. Установлена эффективность применения термодиффузионного борирования для разработки аддитивных технологий поверхностного упрочнения прецизионных стальных деталей с нанесением твердых вакуумных ионно-плазменных покрытий на примере PVD покрытия TiAlN. Экспериментально показано, что применение борирования стальных подложек для нанесения покрытий TiAlN позволяет дополнительно повысить микротвердость и износостойкость. Экспериментально показан и теоретически обоснован факт формирования на стальной поверхности нового микрокомпозиционного материала, который образуется в результате последовательных операций термодиффузионного борирования и вакуумного парового осаждения и который обладает свойствами, недостижимыми материалами подложки и вакуумного покрытия в отдельности. Так, установлено, что для образцов с покрытием TiAlN на подложках из сталей У8А и 9ХС с компактным двухфазным боридным слоем значения фактически измеренной микротвердости поверхности могут достигать 34–35 ГПа. Полученные результаты позволяют эффективно использовать борирование совместно с нанесением твердых ионно-плазменных покрытий для упрочнения широкого класса деталей и сделать научно обоснованным снижение толщины покрытий типа TiAlN и аналогичных твердых покрытий на стальных подложках с боридным слоем без потери в свойствах упрочняемой поверхности, а также могут быть использованы при разработке новых способов комплексного поверхностного упрочнения [17, 18].

Антикоррозионное термодиффузионное цинкование стальных изделий является предметом пристального внимания сотрудников кафедры в течение длительного времени [7, 19]. В последние годы проведен комплекс новых исследований, в результате которого разработана энергосберегающая технология термической обработки и термодиффузионного цинкования упругих стальных элементов. Теоретически обоснованно и практически реализованно энергосберегающее совмещение процессов термодиффузионного цинкования с отпусканием обрабатываемых стальных изделий после закалки. Установлены особенности структурообразования при распаде мартенсита конструкционных пружинных сталей в процессе диффузионного насыщения цинком и среднего отпуска [20].

В нынешнее не простое время кафедра по-прежнему является признанным и динамично развивающимся научно-педагогическим центром металловедения и химико-термической обработки в Беларуси и ближнем зарубежье.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иваницкий Н.И., Константинов В.М., Пучков Э.П.** Кафедра «Материаловедение в машиностроении» БНТУ – традиции и современность // Литье и металлургия. 2016. № 4. С. 156–161.
2. **Ляхович Л.С., Гончар В.Н.** Высокопрочная цементуемая сталь 20ХГНР. М., 1959. 12 с.
3. **Ляхович Л.С., Беляев В.И.** Азотирование стали нагревом токами высокой частоты. Мн.: Изд-во высш., сред. спец. проф. образования БССР, 1961. 45 с.
4. **Ляхович Л.С., Ворошнин Л.Г.** Борирование стали. Мн.: Металлургия, 1967. 119 с.
5. **Иваницкий Н.И., Константинов В.М.** Ворошнин Л.Г. – основатель белорусской научной школы химико-термической обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 1. С. 3–4.
6. **Ворошнин Л.Г.** Борирование промышленных сталей и чугунов. Мн.: Беларусь, 1981. 205 с.
7. **Борисенок Г.В., Васильев Л.А., Ворошнин Л.Г. и др.** Химико-термическая обработка металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1981. 421 с.
8. **Хина Б.Б., Хусид Б.М.** Математическое моделирование синтеза покрытий и материалов: от твердофазной диффузии к механизмам фазообразования (по материалам работ проф. Л.Г. Ворошнина) // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 1. С. 8–14.
9. **Ворошнин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А.** Теория и технология химико-термической обработки. М.: Новое знание; Минск, 2010. 304 с.
10. **Хина Б.Б., Константинов В.М.** Опыт повышения научной квалификации магистрантов и аспирантов-материаловедов в вопросах диффузионных процессов и дислокационных взаимодействий в металлах и сплавах // Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2015. Вып. 36. С. 300–310.
11. **Константинов В.М.** Опыт и перспективы магистерской подготовки инженерных кадров в области металловедения // Литье и металлургия. 2016. № 2. С. 119–124.
12. **Константинов В.М.** Теоретические и технологические аспекты создания экономнолегированных защитных слоев из диффузионно-легированных сплавов // Вестн. БНТУ. 2007. № 2. С. 29–37.
13. **Капцевич В.М., Лисай Н.К., Константинов В.М. и др.** Искрогасители для сельскохозяйственной техники. Минск: БГАТУ, 2017. 156 с.
14. **Дашкевич В.Г.** Использование полупроницаемых слоев для термодиффузионного борирования // Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2017. Вып. 38. С. 152–156.
15. **Дашкевич В.Г., Щербаков В.Г.** Повышение эксплуатационных свойств теплоотводящих элементов холодильника стеклового производства // Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2016. Вып. 37. С. 141–145.
16. **Константинов В.М.** Упрочнение быстроизнашиваемых деталей почвообрабатывающих плугов нитроцементацией с локальным циклическим индукционным нагревом / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 2. С. 44–50.
17. **Константинов В.М.** Свойства двухслойных износостойких покрытий «Термодиффузионный слой – TiAlN» на сталях / В.М. Константинов, А.В. Ковальчук, В.Г. Дашкевич // Журнал физики и инженерии поверхности, 2016. Т. 1. № 2. С. 213–224.
18. **Komarov F.F.** The effect of steel substrate pre-hardening on structural, mechanical, and tribological properties of magnetron sputtered TiN and TiAlN coatings / F.F. Komarov [and oth.] // Wear. 2016. Vol. 352–353. P. 92–101.
19. **Константинов В.М., Иваницкий Н.И., Астрейко Л.А.** Антикоррозионные цинковые покрытия на стальных изделиях: перспективы термодиффузионных покрытий // Литье и металлургия. 2013. № 4. С. 107–110.
20. **Булойчик И.А.** Термодиффузионное цинкование улучшаемых и пружинных сталей // Литье и металлургия. 2013. № 4. С. 121–124.

*Материал подготовил
В.М. Константинов*

100 ЛЕТ



ХРАНИМ ТРАДИЦИИ, ЖИВЕМ НАСТОЯЩИМ, СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ

КАФЕДРА «МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ». ОТ ОСНОВАНИЯ ДО НАШИХ ДНЕЙ

История кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением» (МиТОМД) тесно связана с историей восстановления народного хозяйства Белоруссии, разрушенного войной, становления республики как крупнейшего индустриального региона Советского Союза. В первые послевоенные годы практически на пустом месте создавались целые новые отрасли машиностроительной и металлообрабатывающей промышленности, строились десятки новых промышленных предприятий. Для реализации этих грандиозных планов требовались свои квалифицированные специалисты и серьезные научные исследования практически по всем техническим направлениям.

Именно в этом русле острого «социального заказа» того времени в 1947 году в Белоруссию из Москвы был приглашен видный представитель отечественной металлургической науки, профессор, доктор химических наук Сергей Иванович Губкин. Именно С. И. Губкину и обязана кафедра своим возникновением. Приказ заместителя министра высшего образования СССР гласит «...с 15 ноября 1948 г. перевести действительного члена АН БССР профессора С. И. Губкина из Московского института цветных металлов и золота на штатную работу в БПИ в качестве заведующего кафедрой «Обработка металлов давлением». Следует отметить, что до 1953 года он продолжал одновременно руководить и отделом обработки металлов давлением Института металлургии АН СССР, что позволило ему не только координировать общую научную работу в области ОМД в Советском Союзе, но и точно направлять текущие научные исследования в Белоруссии в этой области.

К этим годам надо отнести и зарождение механико-технологического факультета. Именно в мае 1949 года в рамках тогдашнего механического факультета БПИ был произведен первый выпуск инженеров-давленцев. И пусть их было всего пять человек, отобранных С. И. Губкиным на специальности «Технология машиностроения», но именно от этого выпуска и начала функционировать кафедра. В декабре того же года отряд белорусских специалистов в области ОМД пополнился еще 17 выпускниками. Начало было положено, дальнейшие выпуски специалистов шли по нарастающей. В 1958 году из состава механического факультета выделился механико-технологический факультет (МТФ). Кафедра МиТОМД к этому времени существенно окрепла (в период ее зарождения на ней, кроме С. И. Губкина, работали Александр Васильевич Юшков, Анатолий Михайлович Дмитрович). Трудом С. И. Губкина были заложены основы белорусской школы инженеров кузнечно-штамповочного производства. Им была создана инженерная теория течения металла, положенная в основу разработки и совершенствования технологий ОМД. Под его руководством разработаны математические методы исследования процессов формообразования при прокатке, волочении, ковке и штамповке. Он ввел понятие о механических схемах деформации, создал научно обоснованную классификацию видов обработки металлов давлением. Возглавляемый С. И. Губкиным коллектив был ориентирован на решение актуальных проблем в области теории и технологии обработки металлов давлением.



Заведующий кафедрой
Вячеслав Анатольевич Томило,
д-р техн. наук, профессор



Сергей Иванович Губкин

Это позволило заложить мощный научный фундамент, отраженный в его многочисленных трудах, а также в трудах его учеников и последователей. Более 70 человек защитили кандидатские и докторские диссертации под руководством С. И. Губкина.

Среди них Барановский Михаил Адамович, ставший впоследствии доктором технических наук, профессором, Казаченок Владимир Исидорович, работавший на кафедре в 1952–1956 годах, затем возглавлявший родственную кафедру в Ижевском механическом институте, где и защитил докторскую диссертацию и стал профессором, Башеев Сергей Михайлович – доцент кафедры МиТОМД (1955–1963 гг.), затем заведующий кафедрой «Детали машин» БПИ до 1968 года, Бельский Евграф Иосифович – доцент кафедры (1953–1959 гг.), впоследствии доктор технических наук, профессор, возглавлявший затем кафедру «МиТЛП», и Молосаев Иван Петрович – ассистент, затем доцент нашей кафедры, а с июля 1961 г. доцент кафедры «Сопротивление материалов» БПИ.

Уже после смерти С. И. Губкина защищают кандидатские диссертации Макушок Евгений Маркелович (студент механического факультета 1945–1950 гг., аспирант, ассистент, а затем и доцент кафедры) и Чайка Владимир Антонович, начинавший на кафедре ассистентом, в 1961–1963 гг. исполнявший обязанности заведующего кафедрой «Машины и технология сварочного производства» БПИ, а после ее реорганизации вернувшийся снова в родной коллектив, в котором он и проработал до своего полного ухода на пенсию в 1992 г. В 1966–1976 годах В. А. Чайка возглавлял одновременно инженерно-экономический факультет БПИ.

Евгений Маркелович Макушок в 1956–1957 годах являлся заместителем декана механического факультета, а в 1960 году ушел в лабораторию пластичности ФТИ АН БССР, где первым из плеяды выпускников кафедры защитил докторскую диссертацию. Одним из первых он получил и Государственную премию БССР.

С. И. Губкин оставил огромное научное наследие. Ему принадлежит более 170 научных работ – монографий, учебников, учебных пособий и научных статей. Последняя обобщающая монография, 3-томная «Пластическая деформация металлов», начатая Сергеем Ивановичем еще в 1946 г., является итогом его многолетнего труда в области теории пластичности и практики пластического деформирования. С. И. Губкин закончил рукопись своего обширного труда в августе 1955 года, а через месяц его уже не стало... Окончательную доработку рукописи он сделать не успел. Всю эту кропотливую, емкую работу выполнили его ученики: Барановский М. А., Башеев С. М., Бельский Е. И., Булах В. Н., Коренько Н. Ф., Костюкович С. С., Мицкевич Н. И., Молосаев И. П., Молочков А. В., Томилин Р. И., Чайка В. А., Юрштович Н. А. и ряд других. Выпущенная в свет после его смерти в 1961 году, она подвела итоги всей его жизни в науке и поставила ряд новых задач для дальнейших исследований.



Василий Петрович
Северденко

С августа 1957 по июль 1970 г. кафедрой заведовал академик АН БССР, доктор технических наук, профессор Северденко Василий Петрович (1904–1978). В эти годы кафедра МиТОМД существенно увеличила выпуск специалистов для предприятий страны, значительно вырос и выход ее питомцев высшего звена. Кандидаты и доктора наук, подготовленные в этот период, работали на многих кафедрах БНТУ, других вузов города, республики и зарубежья.

Вместе со своими учениками В. П. Северденко провел большой объем исследований в различных областях обработки металлов давлением. Теоретически исследовано формообразование в очаге деформации, выявлены закономерности и особенности процесса пластической деформации в зависимости от условий на контактной поверхности. Изучены силовые параметры основных процессов обработки металлов давлением, исследованы закономерности образования рельефа и структуры поверхностного слоя, а также кинетика формирования дислокационной структуры металлов. Предложен ряд новых способов обработки металлов да-

влением с применением ультразвуковых и низкочастотных колебаний, разработаны высокоэффективные способы изготовления деталей машин и режущего инструмента пластическим деформированием, созданы новые материалы и др.

Результаты многих исследований, проведенных В. П. Северденко, внедрены в промышленность, отражены в учебниках, учебных пособиях и справочниках. Некоторые работы опубликованы в зарубежных журналах, несколько монографий переведены на иностранные языки и изданы за рубежом. Василий

Петрович Северденко лично и в соавторстве опубликовал свыше тысячи работ, среди них 29 монографий, 2 учебника и 5 учебных пособий для высших учебных заведений.

В своей работе В.П. Северденко уделял большое внимание подготовке высококвалифицированных научных кадров. Под его руководством выполнено свыше 150 докторских и кандидатских диссертаций. Под руководством Василия Петровича Северденко белорусская школа обработки металлов давлением получила мощное и стремительное развитие.

В то время кафедру пополнили Мехед Иван Нестерович (1927–1988 гг.), начавший на кафедре ассистентом в 1958 г. и проработавший на ней доцентом (с 1962 г.) до своего ухода из жизни, Пащенко Владимир Семенович (1920–1983 гг.) – старший преподаватель, а затем доцент кафедры с 1962 г., Леус Иван Степанович. Пащенко В.С. в начале 60-х годов был секретарем парткома БПИ, с 1964 по 1976 г. – деканом МТФ, с 1970 по 1975 г. – заведующим кафедрой МиТОМД.

Следует отметить, что в плане научного руководства кафедре везло на всем протяжении ее уже 50-летнего пути.

Традиции своих предшественников С.И. Губкина и В.П. Северденко подхватил профессор Александр Васильевич Степаненко, заведовавший кафедрой в 1975–1990 годах. Рос коллектив, рос и его руководитель, ставший академиком Национальной академии наук БССР, лауреатом Государственной премии и Заслуженным деятелем науки и техники БССР, проректором БПИ по учебной, а затем и научной работе, вице-президентом АН БССР.

Подобное сочетание сил и возможностей позволяет кафедре использовать для подготовки специалистов и потенциал Физико-технического института Национальной академии, при котором она имеет свой филиал. В нем в разное время работали многие высококвалифицированные специалисты, в том числе академик В.Н. Чачин (1930–1994) – ректор БГПА в 1983–1994 годах.

Одним из наиболее известных направлений исследований А.В. Степаненко стали процессы периодической прокатки. Наибольший экономический эффект от использования переменных периодических профилей в автомобилестроении получен при внедрении новых технологий изготовления малолистовых рессор. На кафедре МиТОМД под руководством академика А.В. Степаненко был разработан принципиально новый способ получения профилей переменного сечения, используемых в качестве упругих элементов рессорной подвески автомобилей семейства МАЗ, отличающийся тем, что окончательный профиль заготовки малолистовой рессоры получают с одного нагрева путем прокатки нагретой заготовки на перемещающейся при помощи силового механизма профильной оправке через неприводные валки с постоянным межвалковым зазором. Данная технология применяется в настоящее время на Минском рессорном заводе, где установлена и действует промышленная автоматическая линия для изготовления заготовок малолистовых рессор и направляющих опор пневмоподвески.

Созданные в БНТУ технологии и оборудование периодической прокатки (в общей сложности восемь прокатных станов) позволяют изготавливать значительную часть периодических профилей, применяемых на промышленных предприятиях Беларуси.

В настоящее время научные исследования, проводимые на кафедре, значительно расширяются. В промышленности Беларуси наблюдается острая потребность в использовании новых высокоэффективных, ресурсосберегающих технологий ОМД. В БНТУ ведутся работы в данном направлении. Поскольку «классические технологии» ОМД практически уже исчерпали себя, то проблемы интенсификации и удешевления производства могут быть решены лишь за счет разработки комбинированных операций ОМД в рамках одного технологического процесса, фасонирования исходных заготовок, оптимизации энерго-силовых параметров, использования дифференциального нагрева, безоблойной и точной штамповки, комбинаций методов ОМД и методов высокоэнергетического, в том числе импульсного, воздействия, совершенствования и интенсификации методов пластического формообразования. Восстановление способности деформированных сталей и сплавов к дальнейшей пластической деформации предполагает снятие внутренних напряжений. Поэтому необходимо отчетливое представление о механизме пластической деформации при режимах, реализуемых в производственных условиях на высокоэффективных промышленных агрегатах с большими скоростями деформации и очень кратковременным пребыванием



Александр Васильевич
Степаненко

металла в зоне деформации. Для этого предполагается использовать представления о закономерности разработанных в последние десятилетия теории больших пластических деформаций, физической мегомеханики, а также физики твердого тела, неравновесной термодинамики.

В рамках данного направления будет осуществляться развитие теоретических основ совместимости схем напряженно-деформированного состояния с динамикой пластического формообразования на базе классической теории обработки металлов давлением с применением компьютерного моделирования, механики сплошных сред, современных представлений о контактном взаимодействии и разрушении жестко пластических тел. Эти исследования являются научной основой дальнейшего развития производства изделий методом пластического формообразования, его совершенствования и интенсификации, создания новых наукоемких технологических процессов, в том числе комбинированных, и высокопроизводительного современного оборудования для их реализации.

Оглядывая прошедший кафедрой путь, вспоминая всех ее 4056 выпускников, хочется особо подчеркнуть многогранность и в то же время универсальность нашей специальности, потенциал и умение ее представителей на базе полученных знаний с успехом адаптироваться как в производственных условиях, так и в научных, и учебных коллективах. О качестве подготовки специалистов говорят следующие цифры: два академика НАН Беларуси, два член-корреспондента НАН Беларуси, 25 докторов технических наук, четыре лауреата Государственной премии СССР, девять лауреатов Государственной премии Республики Беларусь.

Хочется особо подчеркнуть, что «отцы-основатели» кафедры С.И. Губкин, В.П. Северденко, А.В. Степаненко заложили такие принципы деятельности, которые позволили кафедре «Машины и технология обработки металлов давлением» до настоящего времени оставаться одной из ведущих кафедр по этой специальности на всем постсоветском пространстве.

*Материал подготовил
В.А. Томило*

100 ЛЕТ



ХРАНИМ ТРАДИЦИИ, ЖИВЕМ НАСТОЯЩИМ, СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ

КАФЕДРА «ОХРАНА ТРУДА» И ЕЕ ВКЛАД В ПОДГОТОВКУ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Кафедра «Охрана труда» является одним из ведущих структурных подразделений Белорусского национального технического университета и Республики Беларусь, осуществляющим образовательную и научную деятельность в области охраны труда.

История кафедры начинается с 12 февраля 1963 года, с момента создания кафедры «Техника безопасности и противопожарная техника». С сентября 1965 года переименована в кафедру «Охрана труда». Первым заведующим стал кандидат технических наук, доцент Ф.А. Богданович, внесший огромный вклад в создание кафедры и формирование морально-психологического климата. В дальнейшем кафедру возглавляли доцент Н.М. Рыков (с 1979 по 1984 г.), кандидат технических наук, доцент И.В. Заяш (с 1984 по 1999 г.). С 1999 г. заведующим кафедрой является доктор технических наук, профессор А.М. Лазаренков.

В настоящее время на кафедре работает высококвалифицированный, творческий коллектив, представленный профессорско-преподавательским составом и учебно-вспомогательным персоналом. Из 14 преподавателей, работающих на кафедре, один доктор технических наук, шесть кандидатов технических наук. Характерной особенностью работы кафедры является совмещение педагогической, научной и практической деятельности. Преподаватели кафедры имеют не только большую теоретическую базу знаний, но и опыт работы в различных секторах экономики. Большинство из них получили базовое образование в Белорусском политехническом институте по специальности: инженер-механик, инженер-электрик, инженер-строитель.

На кафедре большое внимание уделяется постоянному совершенствованию профессионального уровня. Преподаватели повышают свою квалификацию на курсах Республиканского института инновационных технологий и ГУО «Республиканский институт высшей школы». Осуществляется тесное взаимодействие с различными государственными органами и организациями Республики Беларусь: Департаментом Государственной инспекции труда, управлениями охраны труда Министерства труда и социальной защиты труда и Министерства энергетики, отделами охраны труда ведущих предприятий.

Преподаватели кафедры приглашаются для чтения лекций слушателям Института повышения квалификации и переподготовки руководителей и специалистов промышленности «Кадры индустрии», преподавателям дисциплины «Охрана труда» техникумов (РИИТ), студентам других вузов, инженерно-техническим работникам предприятий и организаций Республики Беларусь.

Основной задачей кафедры является обеспечение подготовки студентов всех факультетов университета, обучающихся на очной и заочной формах первой ступени обучения, по циклу общеобразовательных дисциплин: «Охрана труда», «Пожарная безопасность», «Безопасность жизнедеятельности человека».

На кафедре создана необходимая учебно-методическая база для успешного осуществления учебного процесса. Разработаны и утверждены четыре типовые учебные программы по дисциплине «Охрана труда» для строительных, энергетических, машиностроительных, металлургических специальностей. За последние 20 лет подготовлены и изданы 7 учебников и 11 учебных пособий по дисциплине «Охрана труда» для большинства специальностей БНТУ с грифом Министерства образования Республики Беларусь, в которых учтены положения действующих в настоящее время нормативных, законодательных и других документов. Кроме того, подготовлены и изданы учебно-методические пособия для студентов-заочников, студентов-дипломников различных специальностей (с учетом их специфики),



Заведующий кафедрой
Александр Михайлович
Лазаренков,
д-р техн. наук, профессор

среди них зарегистрированный в НИРУП «Институт прикладных программных систем» электронный учебно-методический комплекс по учебной дисциплине «Охрана труда» для специальностей 1-36 01 01 – «Технология машиностроения», 1-36 01 02 – «Материаловедение в машиностроении», 1-36 01 03 – «Технологическое оборудование машиностроительного производства», 1-36 01 05 – «Машины и технология обработки металлов давлением», 1-36 01 06 – «Оборудование и технология сварочного производства», 1-36 02 01 – «Машины и технология литейного производства», 1-42 01 01 – «Металлургическое производство и металлообработка», 1-53 01 01 – «Автоматизация технологических процессов» механико-технологического и машиностроительного факультетов; пособие для выполнения раздела «Охрана труда» в дипломных проектах студентов МТФ; электронное учебно-методическое пособие для студентов заочной формы обучения специальностей МТФ при выполнении контрольной работы по дисциплине «Охрана труда».

В учебном процессе коллектив кафедры сочетает традиционные формы академического преподавания с внедрением инновационных технологий и приемов, среди которых информационно-компьютерные технологии.

Учебная база кафедры «Охрана труда» представлена шестью оборудованными лабораториями, в которых ежегодно проходят обучение около 5 тыс. студентов при выполнении лабораторных работ, проведении практических занятий и около 3500 человек при консультировании раздела «Охрана труда» дипломных проектов.

На кафедре в течение 20 лет функционировала испытательная лаборатория, которая проводила исследования и инструментальные замеры факторов производственной среды для аттестации рабочих мест по условиям труда. Лаборатория была аккредитована на независимость и техническую компетентность в системе аккредитации Республики Беларусь в соответствии с требованиями СТБ ИСО/МЭК 17025. Работы выполнялись на предприятиях и в организациях Республики Беларусь.

Научно-исследовательская работа – неотъемлемая часть деятельности кафедры. Коллектив кафедры принимает активное участие в ежегодных международных и республиканских научных конференциях, проводимых другими факультетами и вузами, в том числе зарубежными. По результатам научных исследований за период 2000–2020 гг. опубликованы одна монография и более 140 научных статей. Проводимая научно-исследовательская деятельность способствует росту эффективности технологии обучения, позволяет на практике показать студентам подходы к постановке и решению научных проблем, привлечь наиболее способных из них к выполнению научных исследований, использовать полученные результаты в образовательном процессе при чтении лекций, проведении практических и лабораторных занятий.

С целью раскрытия научного потенциала студентов осуществляется их активное вовлечение в научно-исследовательскую работу кафедры. Основными формами работы со студентами в рамках научно-исследовательской деятельности являются участие в выполнении НИР, индивидуальная работа с научными руководителями, подготовка научных работ на республиканский конкурс, участие в конференциях. Ежегодно на СНТК студентами по результатам исследований делается более 30 докладов, а тезисы докладов публикуются в сборниках.

*Материал подготовили
А. М. Лазаренков, Т. П. Кот, Ю. Н. Фасевич*

С юбилеем!

Болеслав Мечеславович НЕМЕНЕНОК

(к 70-летию со дня рождения)



5 ноября 2020 года исполнилось 70 лет со дня рождения заведующему кафедрой «Металлургия черных и цветных сплавов» БНТУ, доктору технических наук, профессору **Болеславу Мечеславовичу Немененку**.

Болеслав Мечеславович Немененок родился в д. Повятые Миорского района Витебской области. После окончания в 1967 году средней школы с золотой медалью поступил в Белорусский политехнический институт на специальность «Литейное производство черных и цветных металлов». С третьего курса начал заниматься научно-исследовательской работой, результатом которой стал исследовательский дипломный проект. По распределению в 1972 году был направлен в распоряжение Министерства обороны СССР. Два года служил командиром усиленного танкового взвода в группе советских войск в Германии. Успехи в воинской службе отмечены четырьмя грамотами командования полка и досрочным воинским званием. После увольнения в запас в 1974 году Б.М. Немененок вернулся на родную кафедру, где начал трудовую деятельность инженером научно-исследовательского сектора. В ноябре 1975 года поступил в очную аспирантуру, а в феврале 1979 года успешно защитил кандидатскую диссертацию по специальности 05.16.04 – «Литейное производство».

На преподавательскую работу в должности ассистента перешел с 1 ноября 1980 года. Ученое звание доцента присвоено в феврале 1986 года. С сентября 1992 по апрель 2002 года Б.М. Немененок по совместительству работал заместителем декана МТФ. В декабре 1999 года защитил докторскую диссертацию и в апреле 2000 года ему присуждена ученая степень доктора технических наук. С 28 января 2000 года и по настоящее время Б.М. Немененок работает заведующим кафедрой «Металлургия черных и цветных сплавов». Ученое звание профессора присвоено ему в 2005 году. Болеслав Мечеславович является членом редакционно-издательского совета журнала «Литейное производство» (Россия), членом редакционной коллегии журнала «Литье и металлургия» (Беларусь), заместителем главного редактора Республиканского межведомственного сборника научных трудов «Металлургия».

За 45-летний период работы по специальности Б.М. Немененок проявил себя грамотным специалистом в области алюминиевого литья, способным ставить и решать сложные научно-технические задачи. За это время им опубликованы более 80 статей в научно-технических журналах (включая «Литейное производство», «Литейщик России», «Aluminium») и сборниках, получено 45 авторских свидетельств и патентов. Разработал пять образовательных стандартов для I и II ступени получения высшего образования по металлургическим специальностям.

За добросовестную работу Болеслав Мечеславович Немененок награжден пятью Почетными грамотами БНТУ, нагрудным знаком «Выдатнік адукацыі Рэспублікі Беларусь» (2000 г.), двумя Почетными грамотами Министерства образования Республики Беларусь (2015, 2018 г.), Почетной грамотой Национальной академии наук Беларуси (2011 г.), отмечен персональной надбавкой Президента Республики Беларусь за выдающийся вклад в развитие высшего образования (2000 г.).

Сфера научных интересов Болеслава Мечеславовича – рафинирование сплавов черных и цветных металлов; безотходные и малоотходные технологии переработки отходов сплавов цветных металлов; экологически чистые технологии модифицирования алюминиевых сплавов; совершенствование технологий внепечной обработки сплавов.

Любовь к научному поиску, настойчивость, чуткость и отзывчивость в отношении с людьми снискали уважение к нему всех, кто с ним работает и общается.

От всей души желаем Болеславу Мечеславовичу крепкого здоровья, благополучия и долгих лет плодотворной творческой деятельности!

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

С юбилеем!

Анатолий Григорьевич СЛУЦКИЙ

(к 70-летию со дня рождения)



22 ноября исполнилось 70 лет **Анатолию Григорьевичу Слущкому** – кандидату технических наук, доценту кафедры «Металлургия черных и цветных сплавов» Белорусского национального технического университета.

А. Г. Слущкий родился в д. Казаковцы Мостовского района Гродненской области. С 1966 по 1970 г. учился в Минском автомеханическом техникуме, после окончания которого поступил в Белорусский политехнический институт на специальность «Литейное производство черных и цветных металлов». С третьего курса активно занимался научно-исследовательской работой. После окончания с отличием БПИ в 1975 г. был направлен на работу в отраслевую научно-исследовательскую лабораторию «Очистка газовых выбросов литейных цехов» (ОНИЛОГАЗ), где работал инженером, младшим научным и старшим научным сотрудником.

В 1979 г. поступил в заочную аспирантуру по специальности 05.16.04 – «Литейное производство» и в 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка экономичной технологии плавки низколегированных серых чугунов для ответственных автотракторных отливок». В 1984 г. за создание эффективных технологических процессов массового производства автотракторных отливок повышенной эксплуатационной надежности в составе авторского коллектива был удостоен премии Ленинского комсомола Белоруссии. В 1986 г. А. Г. Слущкому присвоено ученое звание старшего научного сотрудника.

За период работы с 1980 по 1987 год награжден золотой, серебрянной и бронзовой медалями ВДНХ СССР, а в 1987 г. признан лучшим изобретателем Минской области.

С 1988 по 1992 год работал заведующим сектором ОНИЛОГАЗ, потом старшим и ведущим научным сотрудником отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Прогрессивные процессы плавки высокопрочного чугуна». С 1995 по 2016 год являлся заместителем декана механико-технологического факультета по научной работе и в 1999 г. возглавил научно-исследовательскую лабораторию «Металлургия сплавов и литейные технологии».

С 2001 года работает доцентом кафедры. Научные интересы А. Г. Слущкого связаны с разработкой составов, технологий получения экономнолегированных литейных сплавов, где в качестве легирующих материалов используются отходы производства. По результатам исследований им опубликовано более 180 научных работ, в том числе одна монография, получено 55 авторских свидетельств и патентов, 5 из которых внедрены в производство.

На протяжении пяти лет являлся председателем профбюро факультета. В настоящее время А. Г. Слущкий проводит занятия по учебным дисциплинам «Теория металлургических процессов», «Производство отливок из сплавов на основе железа», «Специальные процессы электроплавки», «Технология литейного производства», руководит дипломным проектированием и производственными практиками, является куратором учебных групп. Основную педагогическую работу совмещает с активной научно-исследовательской деятельностью, руководит хозяйственными договорами, является руководителем и исполнителем ряда заданий ГПНИ, научным руководителем соискателя, подготовил более 10 магистров.

В 2018 г. студенческому научно-исследовательскому бюро «Сплав», возглавляемому доцентом А. Г. Слущким и завоевавшему общественное признание перспективными разработками, по решению Президента Республики Беларусь была оказана финансовая поддержка для приобретения научно-исследовательского оборудования.

За добросовестную работу А. Г. Слущкий награжден несколькими Почетными грамотами БНТУ и Почетной грамотой профсоюзного комитета БНТУ.

Редакция журнала «Литье и металлургия» от всей души поздравляет Анатолия Григорьевича с юбилеем и желает крепкого здоровья, счастья, долгих лет жизни и новых успехов в подготовке специалистов для литейного и металлургического производств!



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-49-59>
УДК 621.745

Поступила 11.11.2020
Received 11.11.2020

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РОТАЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ

С. Л.РОВИН, Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: rovinl@mail.ru

Л. Е.РОВИН, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого,

г. Гомель, Беларусь, пр. Октября, 48. E-mail: lerovin@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы конструирования ротационных наклоняющихся плавильных печей (РНП), моделирования работы и расчета наиболее нагруженных узлов и элементов конструкции этих агрегатов. Представлены результаты разработки и анализ опыта эксплуатации РНП, используемых для переработки различных дисперсных материалов. Даны рекомендации по выбору оптимальных конструктивных решений для ротационных печей, предназначенных для рециклинга дисперсных металлоотходов.

Ключевые слова. Ротационные печи, конструкции, эксплуатация, прочность, надежность, дисперсные материалы, рециклинг, металлоотходы.

Для цитирования. Ровин, С. Л. Конструктивные особенности ротационных печей / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 49–59. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-49-59>.

CONSTRUCTIVE FEATURES OF ROTARY FURNACES

S. L. ROVIN, Belarusian National Technical University,

Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti Ave. E-mail: rovinl@mail.ru

L. E. ROVIN, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj,

Gomel, Belarus, 48, Ochyabrya Ave. E-mail: lerovin@mail.ru

The article deals with the design of rotary tilted melting furnaces (RTF), modeling of operation and calculation of the most loaded components and structural elements of these units. The results of the development and analysis of the operating experience of RTF used for processing various dispersed materials are presented. Recommendations for choosing optimal design solutions for rotary furnaces for recycling dispersed metal waste are given.

Keywords. Rotary furnaces, construction, operation, strength, reliability, dispersed materials, recycling, metal wastes.

For citation. Rovin S. L., Rovin L. E. Constructive features of rotary furnaces. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 49–59. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-49-59>.

Введение

Вращающиеся (ротационные) печи широко используются для сушки и термической обработки сыпучих дисперсных материалов в самых различных отраслях промышленности. Их популярность объясняется относительно невысокой стоимостью и низкой чувствительностью к размерам частиц обрабатываемого сырья. Хотя расход топлива в них на единицу готового продукта обычно выше, чем в шахтных печах или печах с псевдоожиженным слоем, но в отличие от указанных установок вращающиеся печи позволяют обрабатывать не только кусковые или монодисперсные, но и полидисперсные материалы с разбросом в размерах элементов в 2 порядка и более.

В конструктивном отношении традиционные вращающиеся печи отличаются, в основном, только размерами и устройством систем загрузки и выгрузки материалов. Основными элементами таких печей являются корпус, приводной механизм, опорные катки, а также загрузочная и разгрузочная камеры. Корпус, как правило, представляет собой сварной металлический цилиндр диаметром от 1 до 5 м и длиной до 200 м, футерованный изнутри огнеупорным теплоизолирующим материалом. Емкость печей составляет от сотен килограмм до десятков тонн. Горячие газы (продукты сжигания топлива) в таких агрегатах движутся линейно вдоль оси печи [1].

Для перемещения материала в печах непрерывного действия корпус обычно наклонен к горизонту под углом в 2–3°. Привод печи, с помощью которого она вращается со скоростью 1–10 об/мин, состоит

из электродвигателя, редуктора и зубчатой, цевьевой или цепной передачи. Причем крутящий момент передается непосредственно на корпус или на ось печи (в установках емкостью до 20 т).

Одно из важных направлений использования вращающихся печей – переработка дисперсных техногенных отходов, в том числе металлоотходов, что помимо нагрева предполагает и плавку материала.

Первые попытки применения вращающихся печей для плавки предпринимались еще в начале прошлого века. Для чего использовались так называемые короткобарабанные печи (КБП), имеющие относительно небольшую длину корпуса и отношение длины к диаметру (рис. 1). Наряду с возможностью ведения плавки на дисперсных и разнокусковых шихтовых материалах короткобарабанные печи имеют и ряд существенных недостатков: малое время контакта теплоносителя с шихтой и, как следствие, невысокий КПД (около 10–15 %); достаточно значительный унос высодисперсных фракций; неподвижная ось вращения и небольшой диаметр загрузочной горловины и соответственно трудности в загрузке шихты, скачивании шлака и выпуске металла. Причем указанные недостатки становятся тем заметнее, чем больше емкость печи и чем выше требуемые температуры плавления. В связи с этим область применения КБП ограничивалась, в основном, переплавкой вторичных медных, алюминиевых и более легкоплавких цветных сплавов.

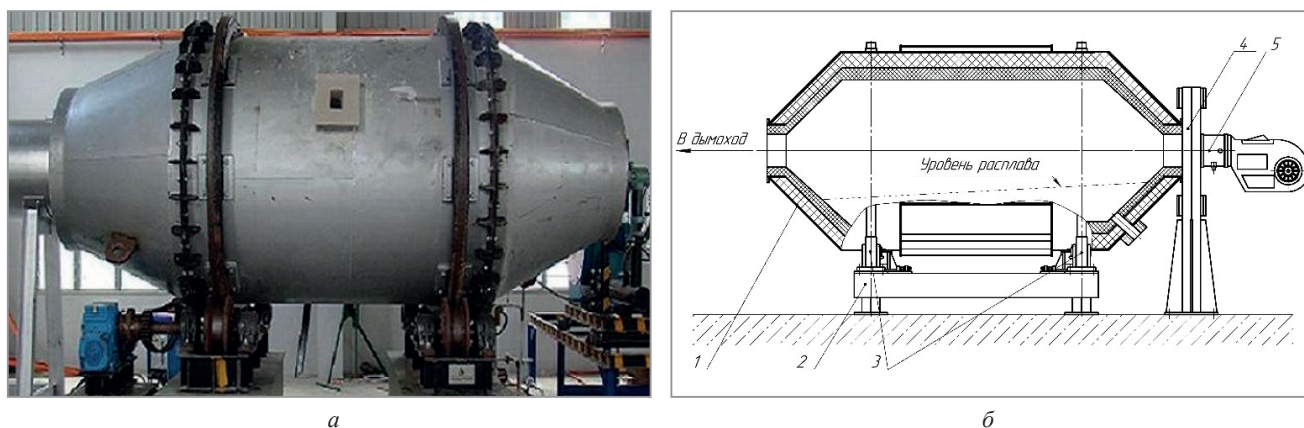


Рис. 1. Общий вид (а) и схема (б) вращающейся короткобарабанной печи:

1 – футерованный корпус; 2 – рама опорная; 3 – катки приводные; 4 – поворотная стойка; 5 – горелка

Такое положение сохранялось до конца века, пока не были разработаны ротационные наклоняющиеся печи (РНП) с петлеобразным движением газов, в которых ввод продуктов сжигания топлива и отвод газов из печи производится с одного и того же торца. В таких печах проблемы с загрузкой и сливом были сняты, теплоэффективность возросла вдвое, а при обогащении дутья кислородом появилась возможность плавить черные сплавы (рис. 2).

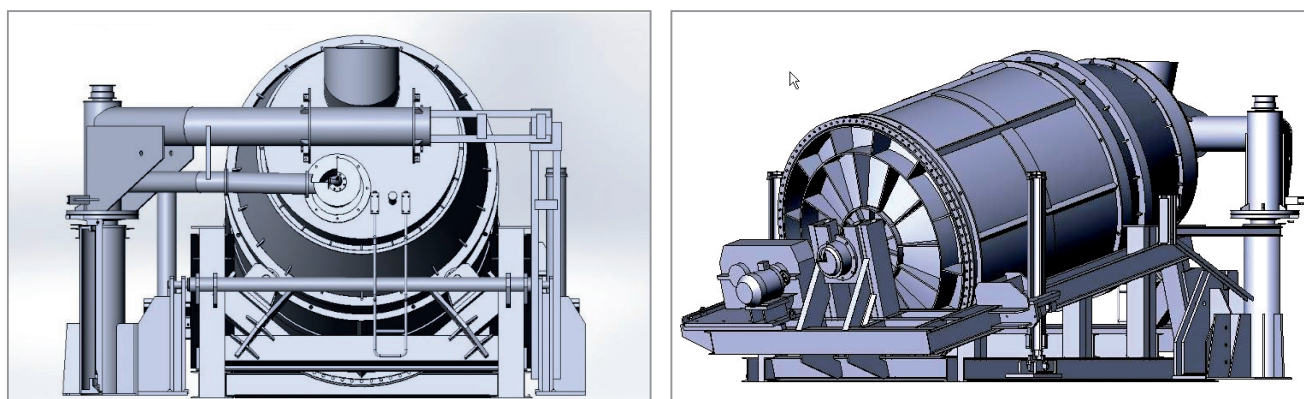


Рис. 2. Общий вид РНП полезной емкостью 3,75 м³

Для печей большой емкости может использоваться вариант с заменой привода вращения на привод качания, состоящий из двух электро- или гидроприводов, соединенных навстречу (рис. 3). Корпус печи при этом осуществляет 1–3 качания в минуту с поворотом на 180–210° – до максимального подъема загруженного дисперсного материала и соответственно предельного момента сопротивления повороту печи. Затем происходит переключение двигателей и изменение направления вращения приводит

к смещению слоя в противоположном направлении, обрушению и интенсивному перемешиванию материала. При качании активно используются силы инерции. Такая схема движения интенсифицирует перемешивание и позволяет снизить удельное энергопотребление на нагрев и расплавление материалов [2].

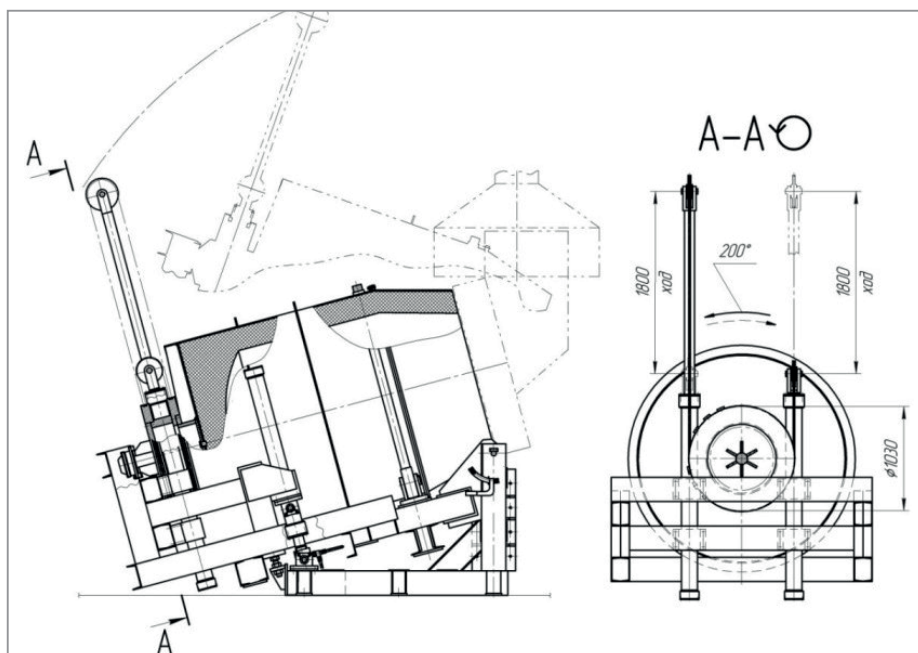


Рис. 3. Качающаяся наклоняющаяся печь (КНП)

Однако широкому распространению печей нового типа, имеющих принципиальные отличия от традиционных, препятствовала недостаточная изученность тепломассообменных процессов в рабочем пространстве РНП, практически полное отсутствие научно обоснованных рекомендаций по конструированию и расчету таких печей, как и рекомендаций по технологическим режимам ведения высокотемпературных процессов плавки черных сплавов.

Одними из первых в СНГ к разработке такого типа печей с начала века приступили белорусские специалисты – ученые БНТУ и ГГТУ им. П. О. Сухого.

Результаты расчетов, моделирования и апробации

Оптимальные конструкции РНП обеспечивают существенные преимущества по сравнению с традиционными КБП: 2–3-кратное увеличение КПД и снижение удельного расхода топлива; сокращение в 1,5–2,0 раза трудоемкости и временных затрат на загрузку печи, удаление шлака и слив расплава и почти такое же увеличение производительности; ~ 2-кратная экономия флюсов и рафинирующих добавок при плавке алюминиевых сплавов [3]; значительное уменьшение уноса высокодисперсных фракций и выбросов пыли, соответственно снижение нагрузки на пылегазоочистные системы.

Движение газов в РНП характеризуется сложным петлеобразным циркуляционным режимом, что увеличивает время их пребывания в печи в 5–10 раз относительно КБП. Циркуляционные скорости газового потока и соответственно его скорости в зоне контакта с материалом в 5 раз и более превышают линейные скорости газов в КБП. Это обеспечивает значительную интенсификацию процессов тепломассообмена.

Конструкция РНП с рабочим положением корпуса под углом 15–20 ° к горизонту обеспечивает увеличение полезной емкости печи на 20–25 % и активное перемешивание шихты и расплава как в поперечном, так и в продольном сечении. Кроме того, такое положение корпуса позволяет существенно увеличить горловину печи, что, в свою очередь, обеспечивает минимальную трудоемкость и высокий темп завалки шихты, а возможность поворота печи горловиной вниз (на 20–30 °) – быстрый слив металла и шлака [4].

В РНП шлак перегрет и имеет высокую активность. Удельное количество энергии (плотность теплового потока), усваиваемое шихтой во время нагрева и расплавления, в РНП существенно выше, чем в индукционных и камерных стационарных печах отражательного типа. РНП позволяют вести интенсивное перемешивание, десульфурацию, дефосфорацию расплава, окислительные и восстановительные

процессы, а в случае необходимости – провести доводку сплава и его рафинирование перед разливкой. Хотя наш опыт свидетельствует, что наиболее рационально все-таки вести доводку расплава по схеме дуплекс-процесса: РНП – канальная индукционная печь.

Ротационные печи могут работать на жидком и газообразном топливе, в том числе отходах, например, отработанном масле. В качестве восстановителей могут использоваться любые углеродсодержащие материалы, в том числе отходы вплоть до лигнина. Для переработки железосодержащих отходов печи оборудуются газокислородными горелками или системой обогащения дутья кислородом до 27–30 % O₂.

РНП наилучшим образом отвечают задаче переработки дисперсных влажных, загрязненных маслами и случайными неметаллическими примесями металлоотходов, причем позволяют осуществлять рециклинг таких отходов без их предварительной подготовки: очистки от влаги и масел, сушки, окомковывания, брикетирования и т. д.

Одним из наиболее нагруженных узлов РНП является привод, особенно в печах большой емкости (10 т и более). Наиболее рациональная схема привода РНП, как показала практика, состоит из двух контуров: электромеханического для вращения корпуса печи и гидравлического для наклона корпуса и поворота крышки.

При вращении правильно собранной и отбалансированной ротационной печи мощность привода (N) расходуется на подъем материала до определенного уровня, на преодоление сил трения при перемещении материала, а также на преодоление так называемых «вредных» сопротивлений передачи: трение скольжения цапф опорных роликов и вкладышей подшипников, трение качения бандажей по опорным роликам, трение в приводном механизме, трение торца печи о крышку.

Обрабатываемый материал (шихта) при вращении ротационной печи смещается в сторону вращения и вызывает постоянно действующий в противоположном направлении момент силы веса G (рис. 4). Плечом этой силы является расстояние a от центра тяжести материала до вертикальной плоскости, проходящей через ось вращения корпуса печи. Соответственно мощность, необходимая для подъема материала, равна:

$$N_1 = \frac{1000GV}{102}, \text{ кВт},$$

где V – окружная скорость центра тяжести площади сечения материала, м/с.

В свою очередь, $V = k(wa)$, где k – коэффициент, учитывающий внешнее трение на границе «материал – футеровка» и внутреннее трение в слое; w – угловая скорость вращения печи, с⁻¹.

Смещение массы материала при вращении требует учета перераспределения нагрузки при расчете опорных роликов. В предельном случае масса материала полностью может лечь на один из роликов G_k .

При неправильно выбранном расстоянии между роликами, значительном внешнем и внутреннем трении в слое и завышенной скорости вращения корпус печи может оторваться от одного из роликов и «повернуться» вокруг оси нагруженного ролика в сторону, противоположную направлению вращения на угол ϵ , что может привести к сходу корпуса с опор (рис. 4). Чтобы этого не произошло, желательно устанавливать опорные ролики под центральным углом не менее 120°, хотя это увеличивает горизонтальную нагрузку на опорную часть ролика и требует периодической регулировки.

Для предотвращения продольного смещения корпуса печи при наклоне для слива металла и скачивания шлака необходимо предусматривать установку упоров или роликов-ловителей. Причем между боковой поверхностью обода и ловителями для предотвращения заклинивания должен оставаться зазор, компенсирующий тепловое расширение корпуса. Ловители рассчитываются на массу печи с полной загрузкой.

Важнейшее значение имеет правильное взаимное расположение опорных роликов и задней опоры печи. Перекосы и неравномерный износ неизбежно влекут за собой увеличение изгибающих моментов и напряжений в корпусе, износ подшипников и элементов привода и, как следствие, остановку печи.

Для повышения срока службы опорных станций и печи в целом все больше внимания уделяется

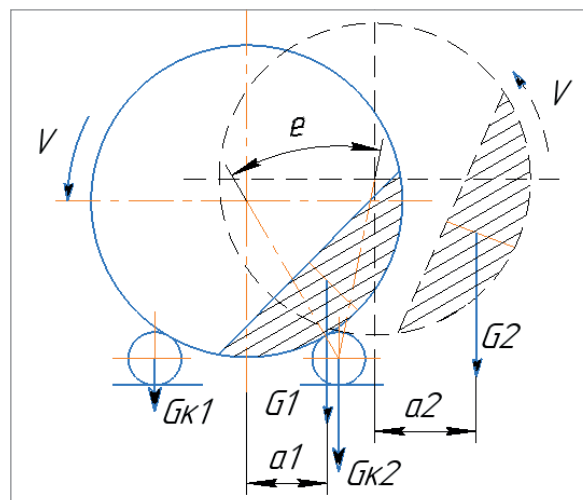


Рис. 4. Схема смещения центра тяжести слоя материала при вращении печи

разработке конструкций с контролируемой и регулируемой нагрузками на опорных роликах (рис. 5). Регулировка и компенсация нагрузки может осуществляться, например, с помощью регулируемых рессор-амортизаторов 2, на которые устанавливается рама 1 печи (рис. 5, а). Контроль нагрузки может быть реализован при помощи тензометрических датчиков 3, устанавливаемых между опорным роликом и рамой (рис. 5, б). Для регулировки нагрузки, воспринимаемой опорной станцией, в некоторых конструкциях опорные ролики устанавливают на направляющие, что позволяет приближать их друг к другу или раздвигать перемещением упорных гаек, расположенных на тягах 4 (рис. 5, в). В печах большой емкости некоторые фирмы изменяют конструкцию рамы и устанавливают опорные ролики по нормали к оси нагрузки (рис. 5, г).

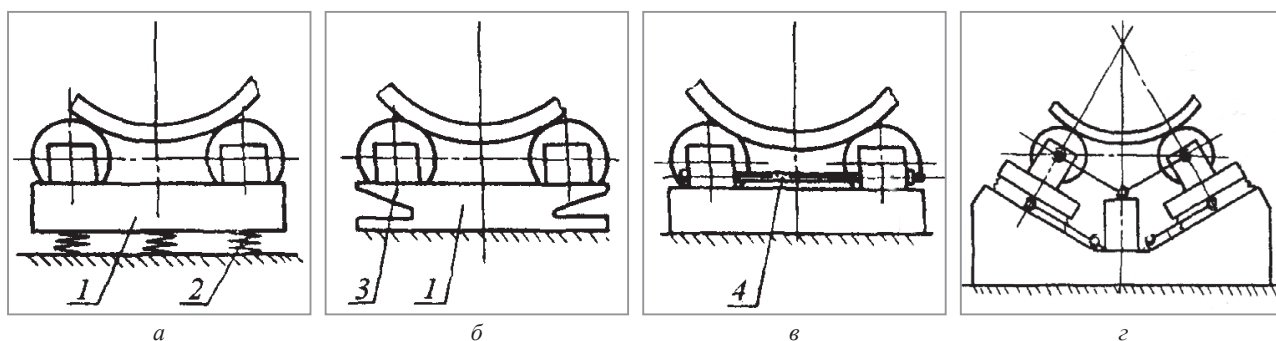


Рис. 5. Схемы установки опорных роликов в ротационных печах

При выполнении расчета мощности привода РНП необходимо учитывать начальные характеристики загружаемых в печь материалов (насыпную плотность, адгезию по отношению к футеровке, угол естественного откоса и внутреннее трение, связанные с дисперсностью, однородностью, формой частиц, влажностью и загрязненностью материала маслами и СОЖ), скорость вращения корпуса, коэффициент заполнения печи материалом. Коэффициент заполнения, или отношение полезного объема к полному объему рабочего пространства печи, в РНП связан с углом ее наклона к горизонту: при наклоне, равном 12° , коэффициент заполнения составляет 0,28; при наклоне 15° – 0,32. Насыпная плотность чугуновой стружки – $\sim 1,6\text{--}1,8 \text{ т/м}^3$, стальной – $\sim 1,3\text{--}1,5$, мелкого скрапа – $\sim 2,0\text{--}2,4$, окалины – $\sim 2,0 \text{ т/м}^3$. Угол естественного откоса в исходном состоянии для окалины и чугуновой стружки составляет около $38\text{--}43^\circ$. С углом естественного откоса и угловой скоростью печи связан угол подъема материала φ в процессе вращения (отклонение центра тяжести слоя от вертикальной оси): при вращении футерованной шамотом печи со скоростью 2–3 об/мин угол подъема окалины и чугуновой стружки составляет $50\text{--}55^\circ$. По мере нагрева адгезионные свойства материала и его внутреннее трение уменьшаются, что сопровождается уменьшением угла подъема и дисбаланса в работе печи [2].

Величина КПД привода установки зависит от типа и конструкции приводного механизма, правильности его монтажа и эксплуатации: для механизма закрытого типа КПД привода может быть принят равным 0,9; для смешанного типа – 0,85; для открытого – 0,8, что учитывается путем введения поправочного коэффициента при расчете мощности [1].

Работа вращающихся плавильных печей сопровождается значительными пульсациями динамических нагрузок как в процессе нагрева шихтовых материалов при обрушении неоднородного слоя, так и после расплавления при возникновении волн жидкого металла. Поэтому не будет ошибкой при выборе привода предусмотреть двукратный запас мощности.

Так же как привод, корпус ротационной печи испытывает значительные знакопеременные динамические нагрузки, продольные и поперечные изгибающие моменты, деформации сжатия и растяжения, а также нагрузки, вызванные тепловыми расширениями. Наряду с опорными роликами наиболее нагруженным узлом РНП является задняя осевая опора корпуса. Деформирование корпуса или днища печи ведет к резкому возрастанию нагрузки на заднюю ось и привод при осевом расположении ведущей шестерни вплоть до заклинивания и остановки. В связи с этим при конструировании особое внимание необходимо уделять обеспечению требуемой жесткости корпуса и днища печи: усиление цилиндрической части и днища ребрами жесткости, переход от плоского днища к днищу в виде усеченного конуса, от сварного к литому. Для печей емкостью более 2 т целесообразно от осевого привода переходить к приводу с подводом усилия непосредственно на обод печи с помощью цепной, цевьевой или зубчатой передачи.

Насколько актуальным является данное условие, можно судить по степени износа опорной оси (рис. 6). Деталь снята после месяца эксплуатации с 15-тонной печи. Износ вызван неточностями монтажа – нарушением соосности установки корпуса и задней опоры, что привело к биениям опорного подшипника, разрушению оси и остановке печи.

Для печей большого объема (15–20 т и более) можно рекомендовать применение двух идентичных спаренных приводов, работающих на одну шестерню, установленную на ободе печи. За счет взаимного сглаживания пульсаций они способствуют плавности хода и предотвращают возникновение автоколебаний (рис. 7).

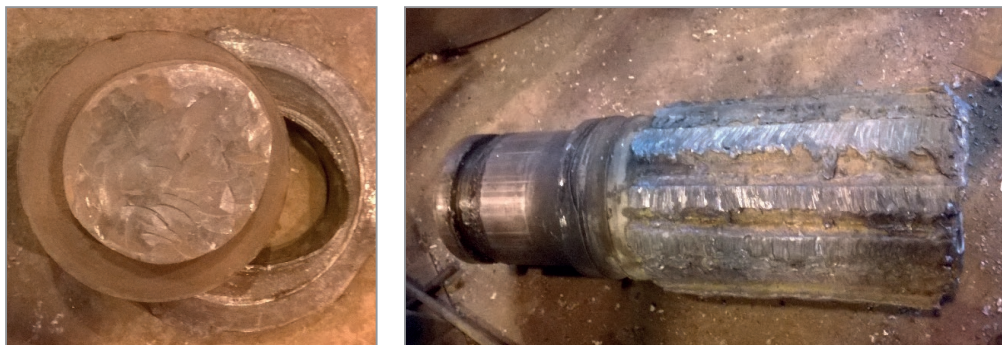


Рис. 6. Разрушение опорной оси 15-тонной РНП из-за несоосности корпуса и задней опоры

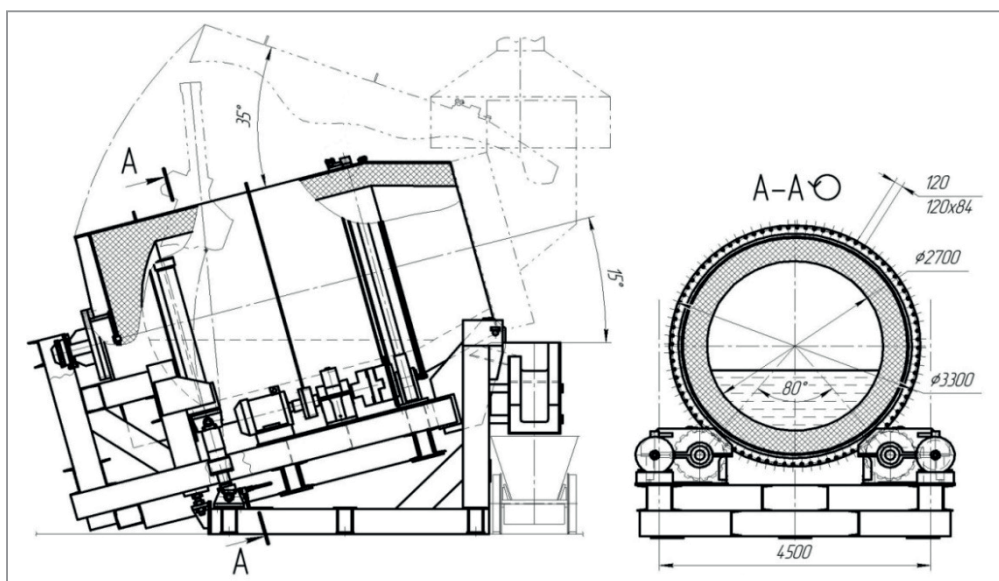


Рис. 7. РНП полезной емкостью 6,5 м³, оснащенная двумя приводами вращения

Учитывая, что толщина стенки корпуса ротационных печей значительно меньше 1/20 радиуса кривизны его сечения, при расчете на прочность применима гипотеза двухосного напряженного состояния. При этом приведенные нормальные напряжения могут быть найдены по уравнению:

$$\sigma_{\text{пр}} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2},$$

где σ_1 – нормальные кольцевые напряжения, вызываемые продольно направленными моментами; σ_2 – нормальные меридиональные напряжения, возникающие под действием поперечно направленных изгибающих моментов.

Из-за вращения корпуса нормальные напряжения в его сечениях меняются по симметричному циклу, поэтому за основную механическую характеристику металла при расчете конструкции корпуса целесообразно принимать предел выносливости – способность противостоять циклическим напряжениям. За предел выносливости принимают наибольшее (предельное) напряжение цикла, при котором не происходит усталостного разрушения образца после произвольно большого числа циклических нагружений. Для углеродистых сталей, применяемых для изготовления корпусов вращающихся печей, связь между пределом выносливости (σ_{-1}) и пределом прочности (временным сопротивлением $\sigma_{B.P.}$)

может быть представлена отношением: $\sigma_{\perp} \approx (0,4-0,5) \cdot \sigma_{В.Р.}$. Временное сопротивление углеродистых сталей находится в пределах 3600–4600 кгс/см². Следовательно, предел выносливости, принимаемый к расчету, будет находиться в диапазоне 1450–1850 кгс/см².

При расчете корпуса ротационных печей, в том числе РНП, особенно большой емкости, следует принимать во внимание следующее [1]:

- действительное распределение нагрузок на отдельных участках корпуса из-за неточностей, допускаемых при его сборке, а также из-за неравномерного износа сопряженных деталей печи при ее эксплуатации, не может совпадать с их идеализированным распределением, определенным при расчете;
- при работе корпус печи находится под действием не только механических усилий, но и тепловых воздействий, меняющихся по своей интенсивности;
- в практических условиях недостижима точная центральная посадка зубчатого венца на корпус печи, поэтому вращение корпуса не протекает плавно, а сопровождается вибрациями (биениями), то же касается случая, когда используется цевьева передача;
- основная внешняя нагрузка, испытываемая корпусом, складывается из его собственной массы, массы футеровки и загруженного в печь материала;
- при работе печи находящийся в ней материал смещается в сторону вращения печи, поэтому и равнодействующая нагрузок на корпус смещена от вертикали, проходящей через ось вращения, что вносит динамическую составляющую в испытываемые корпусом нагрузки. Смещение центра тяжести слоя материала пропорционально адгезионным силам, которые уменьшаются в процессе нагрева, а после расплавления шихты снижаются почти до нуля;
- наибольшую нагрузку в ротационных наклоняющихся печах испытывает задняя опора, а наибольший изгибающий момент возникает в сечении, опирающемся на опорные ролики и в сечении перехода от цилиндрической к конической части корпуса.

Учитывая эти особенности, коэффициент запаса прочности при расчете корпуса не должен выбираться меньше 4.

Актуальной проблемой при эксплуатации наклоняющихся печей является уплотнение и герметизация щели между неподвижной крышкой и вращающимся корпусом печи. Выбивание газов определяется плотностью прилегания и точностью регулировки крепления крышки на торце печи. Однако при эксплуатации печи эта зона подвергается интенсивной продувке высокотемпературными газами, в щель попадают капли металла и шлака, возникают термические деформации. Все это приводит к нарушению плотности стыков и выбросу вредных газов (рис. 8).



Рис.8. Выбросы газов из РНП при неплотном прилегании крышки

Крышка РНП – это достаточно тяжелый узел, который, кроме собственной массы металлоконструкций и футеровки, несет горелку, трубопроводы, контрольную аппаратуру, кислородное копье, узлы крепления и регулировки. Неоднократно разработчиками предпринимались попытки создать надежную универсальную конструкцию уплотнения, однако практически проблема до сих пор не решена.

Одним из вариантов решения этой задачи может служить устройство (пневмозамок), разработанное для пилотной 1,5-тонной РНП (рис. 9). Крышка по контуру оборудуется воздушным коллектором и подвижным фланцем, прилегающим к фланцу корпуса печи. Фланец крышки при первоначальной установке поджимается к фланцу печи с помощью регулируемых пружин. Воздух под давлением, превышающим

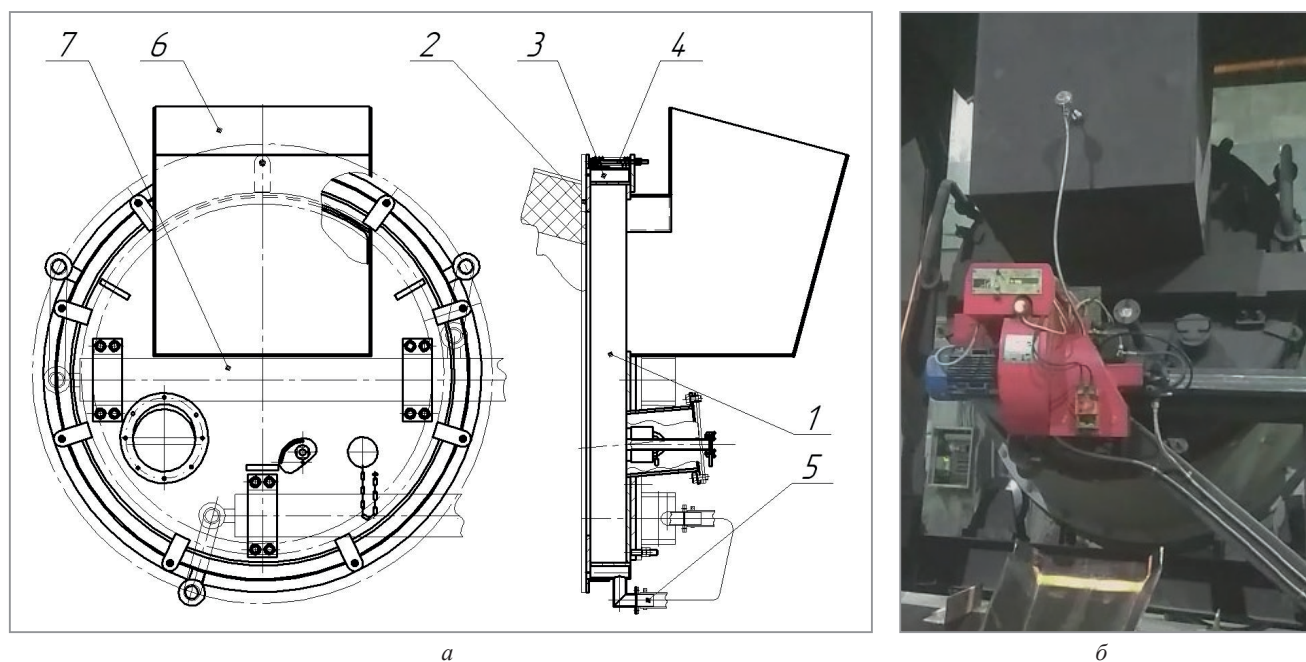


Рис. 9. Конструкция крышки, оснащенной пневмозамком (а), и пилотная РНП во время горячих испытаний (б):

1 – крышка; 2 – фланец корпуса печи; 3 – воздушный коллектор; 4 – поджимные пружины;

5 – подводящий патрубок; 6 – дымоход; 7 – консоль поворотной крышки

давление газов в печи, подается от вентилятора, установленного на колонне крышки, по полым консолям крепления в воздушный коллектор. Выходя из коллектора, воздух перекрывает зазор между фланцами и создает воздушную завесу на пути дымовых газов, стремящихся выйти из печи между крышкой и корпусом.

В печах большой емкости (10–15 т и более) значительные нагрузки испытывает также опорная стойка поворотной крышки. Масса поворотных частей крышки в таких печах превышает 3,0–3,5 т, а плечо центра тяжести относительно оси поворота составляет не менее 2,5–3,0 м. Помимо массы крышки и моментов, определяемых консольной конструкцией, стойка испытывает трудно прогнозируемые нагрузки от инерционных сил, толчков и неравномерного нагрева, что при сохранении традиционной конструкции может привести к ее перекосу и разрыву, несмотря на принятый 2-кратный запас прочности. Традиционная конструкция поворотной стойки показана на рис. 10.

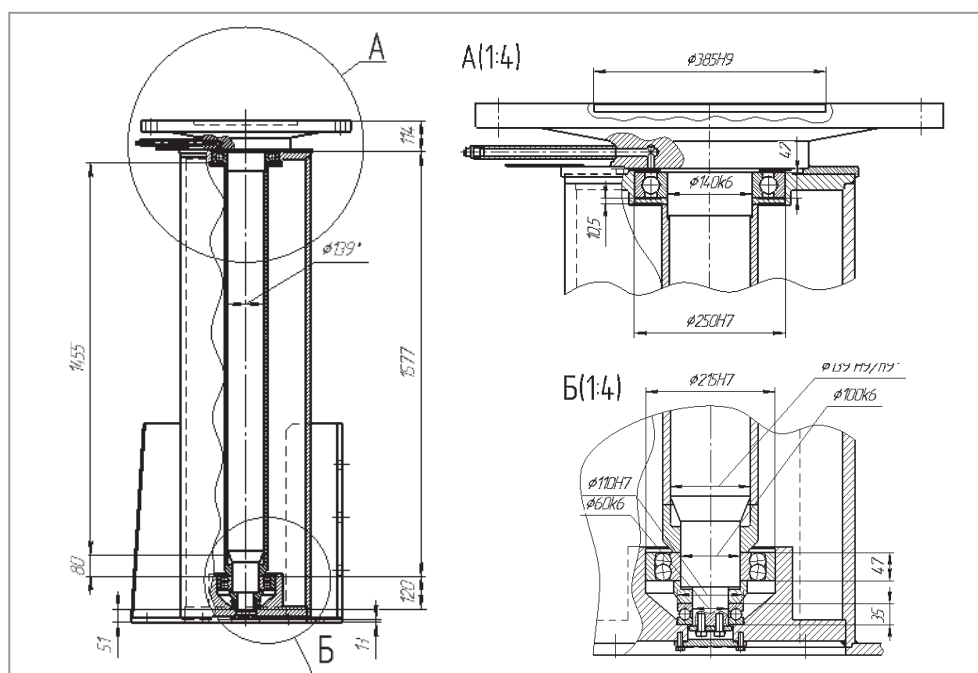


Рис. 10. Традиционная конструкция стойки крышки РНП

Для проверки конструкции на прочность и поиска оптимальных решений использовали модуль инженерного анализа Simulation известного программного комплекса SolidWorks Premium 2016, позволяющий моделировать сложнапряженное состояние деталей, сборочных узлов и механизмов, строить эпюры напряжений и деформаций, оценивать их надежность и запас прочности [5]. Исследование проводили путем h -адаптивного метода с целевой точностью 99%.

При компьютерном моделировании было установлено, что основные нагрузки воспринимает верхний подшипниковый узел, который не считался ранее самым нагруженным (рис. 11).

Поиск оптимальных решений позволил разработать узел, который при сохранении общей металлоемкости конструкции обеспечил снижение напряжений в наиболее нагруженных точках в 5–10 раз (рис. 12).

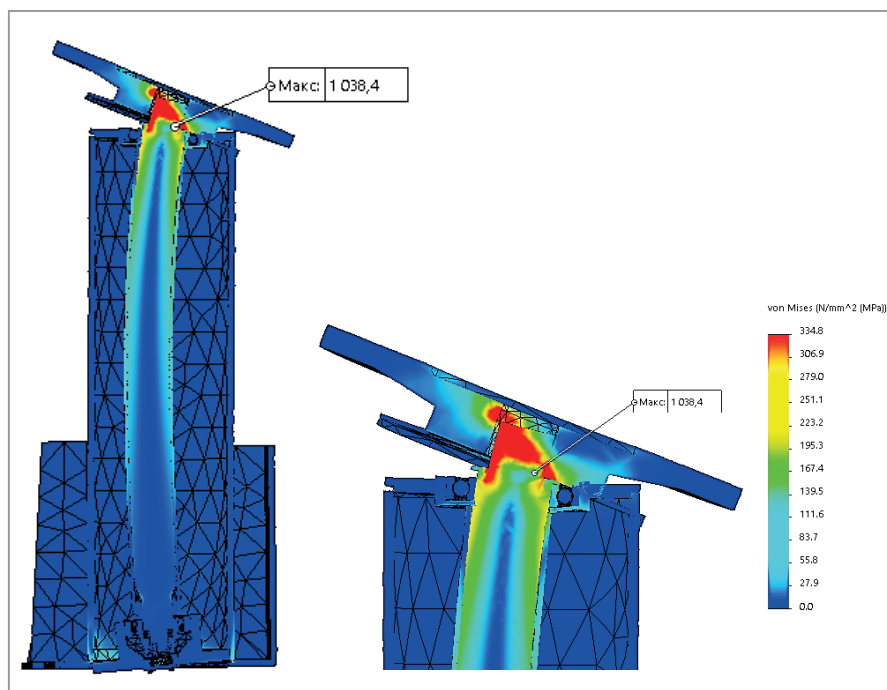


Рис. 11. Эпюры напряжений в стойке крышки традиционной конструкции

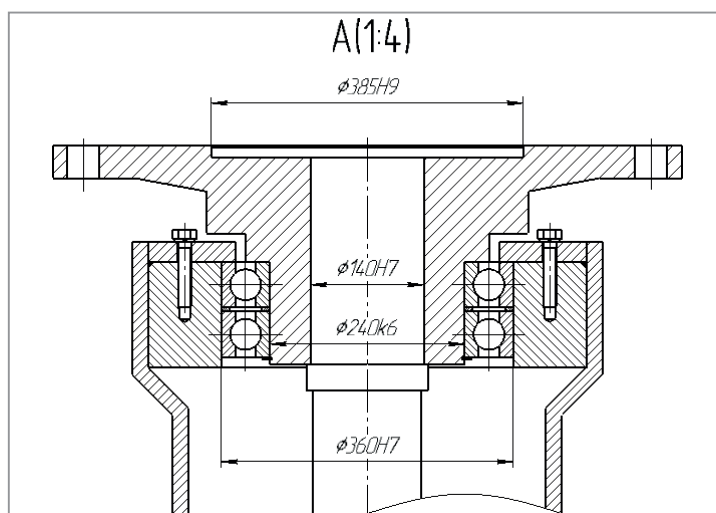


Рис. 12. Новая конструкция опорной части стойки крышки РНП

При использовании инновационной конструкции стойки крышки напряжения по критерию Мизеса уменьшаются в 4,4 раза по сравнению с первоначальной конструкцией, а минимальный запас прочности возрастает на порядок (рис. 13). Полученные результаты полностью удовлетворяют требованиям эксплуатации РНП. Разработанная на их основе конструкция была изготовлена и успешно внедрена на производстве в составе 15-тонной РНП для получения черного свинца из аккумуляторного лома на предприятии «КПВР «Сплав» (г. Рязань, РФ).

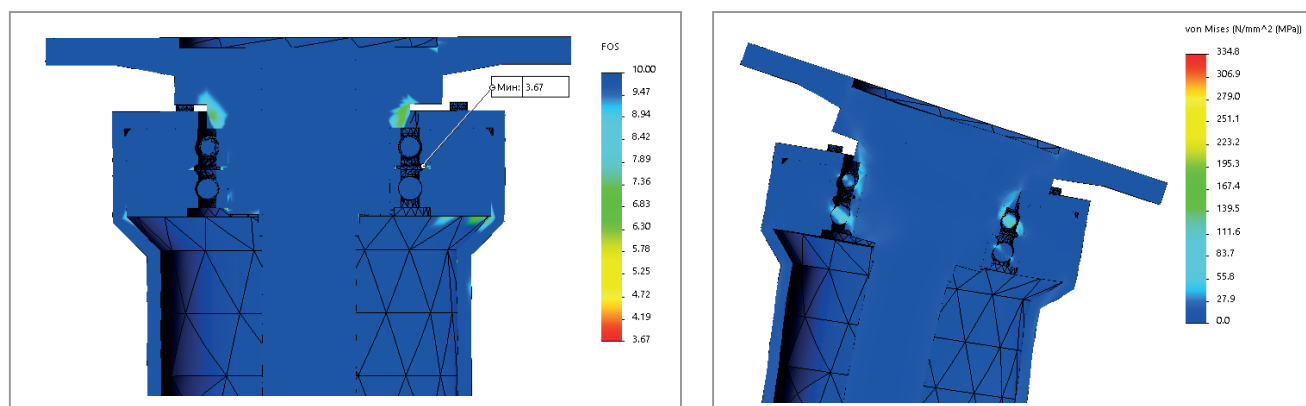


Рис.13. Эпюры напряжений в стойке крышки повышенной прочности.

Важнейшим элементом, обеспечивающим эффективную работу печи, является, конечно, горелочное устройство. РНП оснащаются жидкотопливными, газозвушными и газокислородными горелками, инжекционными, двухпроводными и блочными. Выбор горелки определяется требуемой емкостью, производительностью и назначением печи. На печи большой емкости, как правило, устанавливаются двухпроводные или блочные горелки. Ротационные печи для плавки черных сплавов или рециклинга железосодержащих отходов должны быть оборудованы газокислородными горелками или системой обогащения воздушного дутья. Как показывает практика, если речь идет о рециклинге оксидных и многокомпонентных отходов, то наиболее рациональным решением является подача кислорода непосредственно в рабочее пространство печи (под факел), что расширяет технологические возможности при восстановительных плавках.

Уже первые промышленные испытания, а затем и компьютерное моделирование показали, что ротационные наклоняющиеся печи в отличие от обычных вращающихся печей с линейной траекторией движения газов являются агрегатами, позволяющими активно управлять вектором газового потока и движением дисперсного материала в рабочем пространстве печи, что обеспечивает возможность изменять интенсивность тепло- и массообменных процессов, обеспечивая гибкость технологии плавки и рециклинга в целом.

Характер движения газов в печах РНП значительно отличается от традиционных представлений. Течение газов носит сложный циркуляционный, вихревой характер и определение «петлеобразное» движение далеко не исчерпывает его особенностей. Газовый поток в рабочем пространстве РНП совершает вращение со скоростью, превышающей его поступательную скорость в 5–6 раз (до 30 м/с) и зависящей от входной скорости газов, температуры и начального направления (вектора) факела продуктов сжигания топлива. Кроме того, формирование потока зависит также от скорости вращения и конфигурации динамического слоя материала в печи. Циркуляции газового потока происходят и в вертикальной, и в горизонтальной плоскостях, причем при определенных режимах может происходить смена направления вращения [6].

Важное значение имеет не только выбор тепловой мощности горелки, но и длина факела, место ее расположения и угол атаки (угол наклона оси горелки относительно поверхности материала при вращении печи).

Оптимальным местом расположения горелки служит нижняя четверть крышки, противоположная направлению вращения корпуса. Для крупных печей (емкостью более 15 т) эффективным вариантом является установка двух горелок вместо одной, имеющей суммарную мощность. Пламя от двух горелок охватывает большую площадь поверхности шихты, чем во всех других вариантах, соответственно обеспечивается передача большего количества тепла и равномерное распределение температурных полей по поверхности материала, что в совокупности с постоянным перемешиванием слоя вызывает более высокий темп его прогрева. Наиболее эффективный нагрев поверхности материала (настильность пламени) происходит, если угол атаки составляет 7–9 °.

РНП, предназначенные для переработки оксидных металлоотходов, должны быть оснащены газогорелочными устройствами с возможностью регулирования коэффициента соотношения «газ-воздух» (α) в пределах от 1,05–1,15 при разогреве печи и шихтовых материалов до 0,6–0,7 при проведении восстановительных процессов.

Высокие скорости вращения газового потока в РНП создают циклонный эффект, благодаря которому вынос из печи высокодисперсных материалов снижается более чем в 2 раза, что значительно расширяет возможности их использования относительно традиционных КБП.

Выводы

Разработанные технологии и оборудование прошли успешную апробацию на ряде машиностроительных и металлургических предприятий в Беларуси и России. РНП открывают реальную возможность создания экологичного, безотходного оборота металлов в промышленности. Только в масштабах Беларуси рециклинг образующихся металлоотходов позволит ежегодно возвращать в производство до 150–200 тыс. т чугуна и стали. Расчетная рентабельность производственных участков по переработке собственных дисперсных металлосодержащих отходов составляет не менее 50 %, а возврат инвестиций – не более 12–18 месяцев. Производственная мощность таких участков может варьироваться от 0,5–1,0 до 50–100 тыс. т ежегодно перерабатываемых отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лисиенко, В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгичев М. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление, экология / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. М.: Теплотехник, 2004. 554 с.
2. Ровин, С. Л. Рециклинг металлоотходов в ротационных печах / С. Л. Ровин. Минск: БНТУ, 2015. 382 с.
3. Новичков, С. Б. Теория и практика переработки отходов алюминия в роторных наклонных печах: дис. ... д-ра техн. наук. Иркутск, 2008. 348 с.
4. Шмитц, К. Рециклинг алюминия: основы технологий, механическая подготовка, металлургические процессы, проектирование завода / К. Шмитц, Й. Домагала, П. Хааг. М.: Алусил МВнТ, 2008. 509 с.
5. SolidWorks Simulation Premium. Расчет на прочность конструкций (деталей и сборок) в упругой зоне; расчет конструкции на устойчивость, усталостные расчёты. – Режим доступа: www.3ds.com. Дата обращения: 15 октября 2018.
6. Ровин, С. Л. Движение газов в ротационных наклоняющихся печах / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, В. А. Жаранов // Литье и металлургия. 2016. № 3. С. 11–19.

REFERENCES

1. Lisienko V.G., Shhelokov Ja. M., Ladygichev M.G. *Vrashhajushhiesja pechi: teplotehnika, upravlenie, jekologija* [Rotary kilns: heat engineering, control, ecology Moscow, Teplotehnik Publ., 2004, 554 p.
2. Rovin S.L. *Recikling metalloothodov v rotacionnyh pechah* [Recycling of metal waste in rotary kilns]. Minsk, BNTU Publ., 2015, 382 p.
3. Novichkov S.B. *Teorija i praktika pererabotki othodov aljuminija v rotornyh naklonnyh pechah* [Theory and practice of processing aluminum waste in rotary inclined furnaces. Dr.techn.sci.diss]. Irkutsk, 2008, 348 p.
4. Shmitc K., Domagala J., Haag P. *Recikling aljuminija: osnovy tehnologij, mehanicheskaja podgotovka, metallurgicheskie processy, proektirovanie zavoda* [Aluminum recycling: technology fundamentals, mechanical preparation, metallurgical processes, plant design]. Moscow, Aljusil MViT Publ., 2008, 509 p.
5. SolidWorks Simulation Premium [Strength analysis of structures (parts and assemblies) in the elastic zone; structural analysis for stability, fatigue calculations]. www.3ds.com.
6. Rovin S.L., Rovin L.E., Zharanov V.A. *Dvizhenie gazov v rotacionnyh naklonjajushhihsja pechah* [Gas movement in rotary tilt ovens], *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2016, no. 3, pp. 11–19.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-60-63>
УДК 621.74.047

Поступила 30.09.2020
Received 30.09.2020

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКЕ

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. А. ХАРЬКОВ, Д. А. МЕШКОВ, А. М. КОВАЛЕВ, И. О. САЗОНЕНКО,
Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11.
E-mail: maruko46@mail.ru
Г. В. КОМИССАРОВ, ОАО «Могилевлифтмаш», г. Могилев, Беларусь

Рассмотрены аспекты тепловых явлений, сопутствующих процессу производства биметаллических заготовок в условиях малых глубин проникновения вихревых токов, по сравнению с размером нагреваемого тела. Смоделированы различные условия распределения тепла в нагреваемом слое и его отвода с применением дифференцированного теплового сопротивления. На основе анализа распределения температур в различных вариантах определены перспективные пути совершенствования данной технологии.

Ключевые слова. Индукционный нагрев, наплавка, биметалл, тепловые процессы.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Анализ тепловых процессов при индукционной наплавке / Е. И. Марукович, В. А. Харьков, Д. А. Мешков, А. М. Ковалев, И. О. Сазоненко, Г. В. Комиссаров // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 60–63. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-60-63>.

ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES DURING INDUCTION SURFACING

E. I. MARUKOVICH, V. A. KHARKOV, D. A. MESHKOV, A. M. KOVALEV, I. O. SAZONENKO,
Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus,
11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: maruko46@mail.ru
G. V. KOMISSAROV, OJSC «Mogilevliftmash», Mogilev, Belarus

Aspects of thermal phenomena associated with the production process of bimetallic billets in conditions of small penetration depths of eddy currents compared to the size of the heated body are considered. Various conditions of heat distribution in the heated layer and its removal are modeled using differentiated thermal resistance. Based on the analysis of the temperature distribution in various situational variants, promising ways to improve this technology are identified.

Keywords. Induction heating, surfacing, bimetall, thermal processes.

For citation. Marukovich E. I., Kharkov V. A., Meshkov D. A., Kovalev A. M., Sazonenko I. O., Komissarov G. V. Analysis of thermal processes during induction surfacing. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 60–63. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-60-63>.

Индукционный нагрев широко используют в промышленности при плавке металлов, термообработке, пайке, термической правке [1]. Созданы десятки способов и технологических процессов для индукционной обработки различных материалов. Применение индукционного нагрева по сравнению с другими видами нагрева позволяет организовывать компактные производства, не требующие значительных производственных площадей, а также получить экономию топливно-энергетических ресурсов. Вместе с тем, условия постоянного повышения стоимости энергоресурсов создают предпосылки для развития современных энергоэффективных технологий, использующих данное направление [2].

В ИТМ НАН Беларуси разрабатывается технология получения биметаллических заготовок с использованием принципа индукционного нагрева [3]. Биметаллическая заготовка предназначена для изготовления торцового диска пластинчатого насоса (рис. 1).

Заготовка представляет собой стальное основание с наплавленным на него бронзовым слоем (рис. 2). Основание изготавливается из стали 20 ГОСТ 1050–88 диаметром 156 мм и высотой 41 мм. На верхнем торце имеется полость диаметром 146 мм, глубиной 15 мм, на поверхность которой наплавляется алюминиевая бронза БрАЖ 9–1,5 по ГОСТ 18175–78.

Используемая для наплавки алюминиевая бронза характеризуется повышенной по сравнению с оловянными бронзами усадкой и дает в процессе затвердевания концентрированную усадочную раковину [4].



Рис. 1. Торцовая крышка
пластинчатого насоса



Рис. 2. Биметаллическая
заготовка

В большинстве случаев в биметаллической заготовке торцового диска при толщине бронзового слоя, не превышающем 10 мм, наблюдается не одна концентрированная усадочная раковина, а несколько. На рис. 3 показана биметаллическая отливка с частично удаленным (на глубину 8 мм) бронзовым слоем.

В связи с этим одна из требующих решения задач – локализация усадочных явлений в центральной зоне биметаллической заготовки. Впоследствии при окончательной механической обработке центральная зона удаляется. Для формирования усадочной раковины в центре заготовки необходимо обеспечить затвердевание жидкого металла в данной области в последнюю очередь. Соответственно это требует определенного распределения температур по поверхности заготовки в процессе затвердевания жидкого металла.



Рис. 3. Биметаллическая заготовка
после удаления части наплавленного слоя:
1 – стальное основание; 2 – бронзовый слой; 3 – раковины

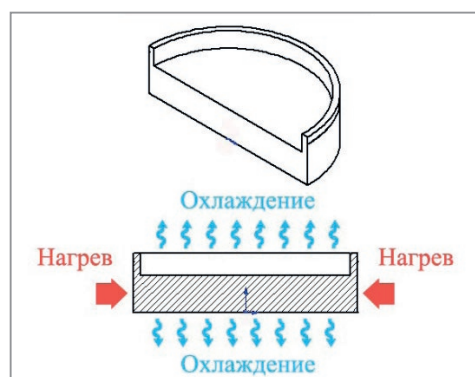


Рис. 4. Схема подвода и отвода тепла

В целях поиска путей решения указанной задачи было проведено математическое моделирование распределения температур по поверхности заготовки при ее нагреве. В связи с малой глубиной проникновения тока в металлы на высоких частотах индукционный нагрев можно рассматривать как поверхностный. Схема ввода тепла через боковую поверхность заготовки и отвода тепла через торцовые поверхности показана на рис. 4.

В модель ввели ряд упрощений, в частности, не учтена зависимость значений теплоемкости и теплопроводности от температуры, произведена замена потоков тепла, отводимого соответственно теплопроводностью, излучением и конвекцией единым тепловым потоком, и тепловые потоки заданы равномерно распределенными по поверхностям. Но в данном конкретном случае больший интерес представляет качественная картина явления, чем количественная. Базовым вариантом для расчета было стальное основание без бронзового слоя. Для повышения достоверности моделирования использовали исходные данные реального процесса. Расчеты соответствуют установившемуся (стационарному) распределению температур. Результат моделирования – распределение температур в радиальном направлении (по верхней торцовой поверхности стального основания) показано на рис. 5.

Расчет показал наличие значительного перепада температур в радиальном направлении. Минимальная температура – в центральной зоне, там, где предпочтительно должен находиться тепловой узел для

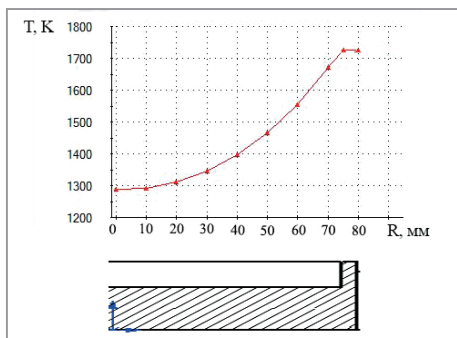


Рис. 5. Радиальное распределение температур на стальной основе

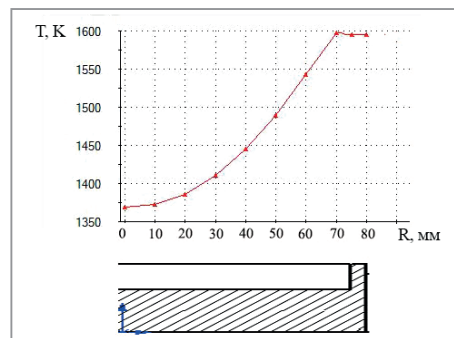


Рис. 6. Распределение температур при наличии бронзового слоя

выведения усадочных явлений. Данная модель рассматривалась нами в качестве базовой, которую по необходимости можно модифицировать в нужном направлении.

В следующем варианте расчета в базовую модель вводили верхний слой алюминиевой бронзы толщиной 10 мм. На рис. 6 показано расчетное распределение температур при наличии на металлической основе бронзового слоя.

В этом случае наблюдается уменьшение перепада температур в радиальном направлении. Но разница температур между центральной частью и периферией имеет еще значительную величину.

В связи с этим представляет интерес вариант с дифференцированным отводом тепла от верхней поверхности модели. В модель были введены условия увеличенного теплоотвода в периферийной зоне (по сравнению с центральной зоной). На рис. 7 представлено распределение температур этого варианта. Расчет показывает, что, изменяя интенсивность отводимого теплового потока, можно достаточно эффективно влиять на распределение температур на поверхности нагреваемой заготовки.

По результатам моделирования тепловой поток считался подведенным к боковым поверхностям основания. Это соответствует реальному индукционному нагреву на частотах 28–30 кГц, когда глубина проникновения тока вследствие скин-эффекта не превышает 4 мм. Частота – важный параметр индукционного нагрева, он определяет глубину проникновения тока в металл. С этой точки зрения интересен вариант расчета в условиях, когда глубина проникновения тока составляет половину диаметра заготовки, т.е. сквозного нагрева. Известно, что при проникновении электромагнитной волны в проводящую

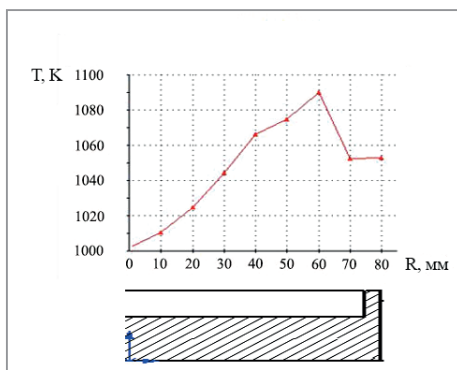


Рис. 7. Распределение температур с дифференциальным верхним теплоотводом

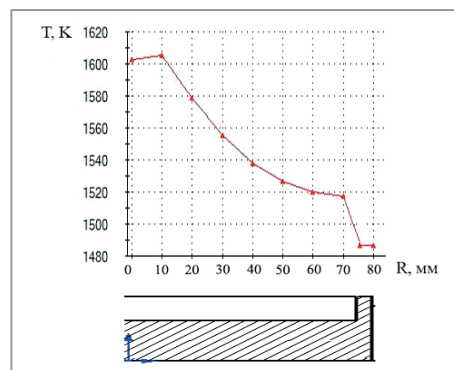


Рис. 8. Распределение температур с экспоненциальным распределением теплового потока

среду характерно ее экспоненциальное затухание по мере распространения в глубь проводящей среды [4]. С учетом этого условия и было проведено моделирование распределения температур по поверхности заготовки. Упрощением в данной модели является условие равномерности потока электромагнитной индукции, проходящего через биметаллическую заготовку. На рис. 8 представлено смоделированное распределение температур для частоты 41 Гц и глубины проникновения тока 78 мм.

Расчет показал, что при низких частотах происходит благоприятный нагрев с максимумом температуры в центре заготовки. Однако такой нагрев сложно реализовать технически. В первую очередь это вызвано тем, что в установках индукционного нагрева, использующих промышленную частоту, резко

возрастают электродинамические усилия в системе индуктор-деталь и соответственно создаваемые ими вибрации [5]. Вследствие этих причин резко увеличиваются металлоемкость и габаритные размеры установок индукционного нагрева, работающих на промышленных частотах. Повышенные капитальные затраты на технологическую оснастку существенным образом сказываются на конечной себестоимости продукции.

Анализ представленных вариантов расчета теплового состояния модели позволяет сделать определенные выводы. Для обеспечения равномерного распределения температур при индукционном нагреве перспективен следующий комплексный подход: варьирование глубины проникновения тока путем регулирования частоты ВЧ-источника; дифференцированный отвод тепла от верхней поверхности заготовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Компания EFD INDUCTION [электронный ресурс] / интеллектуальный нагрев для высокотехнологичных цепей. – г. Санкт-Петербург, 2017. <http://www.efd-induction.com>.
2. **Гордиенко А. И., Михлюк А. И., Вегера И. И.** Индукционная термическая обработка в машиностроении: анализ, проблемы и перспективы развития // *Литье и металлургия*. 2010. № 1–2. С. 140–148.
3. **Земцов В. А., Мешков Д. А., Сазоненко И. О.** Метод изготовления биметаллических дисков сталь – алюминиевая бронза // *Литье и металлургия*. 2008. № 1. С. 126–128.
4. **Галдин Н. М., Чернега Д. Ф., Иванчук Д. Ф.** Цветное литье: Справ. М.: Машиностроение, 1989. 212 с.
5. **Слухоцкий, А. Е.** Установки индукционного нагрева. Л.: Энергоиздательство, 1981. 328 с.

REFERENCES

1. EFD INDUCTION [electronic resource] / intelligent heating for high-tech circuits. – г. Санкт-Петербург, 2017. <http://www.efd-induction.com>.
2. **Gordienko A. I., Mihljuk A. I., Vegera I. I.** Indukcionnaja termicheskaja obrabotka v mashinostroenii: analiz, problemy i perspektivy razvitiya [induction heat treatment in machinery: analysis, problems and prospects for development] . *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 1–2, pp. 140–148.
3. **Zemcov V. A., Meshkov D. A., Sazonenko I. O.** Metod izgotovlenija bimetallicheskih diskov stal' - aljuminievaja bronza [method of manufacturing bimetallic discs steel - aluminum bronze]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2008, no. 1, pp. 126–128.
4. **Galdin N. M., Chernega D. F., Ivanchuk D. F.** *Cvetnoe lit'e* [Colored casting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989 , 212 p.
5. **Sluhockij, A. E.** *Ustanovki indukcionnogo nagreva* [Induction heating installations]. Leningrad, Jenergoizdatel'stvo Publ., 1981, 328 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-64-67>
УДК 621.74

Поступила 09.11.2020
Received 09.11.2020

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛИТЬЯ ПОРШНЕЙ

М. А. САДОХА, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. Тел. + 375-29-778-84-65.

Представлены результаты исследований получения сложных отливок из алюминиевых сплавов с применением метода самозаполнения. Изучено влияние ряда технологических параметров (время заливки, режим охлаждения кокиля, применение самозаполнения и др.) на качество получаемых отливок поршней. Установлено оптимальное время заполнения расплавом кокиля при литье поршней. Показано, что режим охлаждения кокиля оказывает существенное влияние на качество отливок.

Ключевые слова. Литейное производство, поршень, самозаполнение, кокиль, алюминиевый сплав, расплав, кристаллизация, брак отливок.

Для цитирования. Садоха, М. А. Технологические особенности литья поршней / М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 64-67. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-64-67>.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF PISTON CASTING

М. А. SADOKHA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
Tel. + 375-29-778-84-65.

The results of studies of obtaining complex castings from aluminum alloys using the self-filling method are presented. The influence of a number of technological parameters (pouring time, chill cooling mode, the use of self-filling, etc.) on the quality of the resulting piston castings has been studied. The optimal time for filling the chill mold was determined when casting pistons. It is shown that the chill mold cooling mode has a significant impact on the quality of castings.

Keywords. Foundry, piston, casting, self-pouring, permanent mold, aluminum alloy, melt, solidification, defective castings.

For citation. Sadokha M. A. Technological features of piston casting. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 64-67. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-64-67>.

Поршень, как отливка, относится к литым заготовкам повышенной ответственности и соответственно высокой сложности. Наличие большой разницы в толщине стенок, значительных по объему тепловых узлов, применение в конструкции вставок из нирезиста, оформление кольцевых каналов для масляного охлаждения и т.п. выдвигает перед технологией литья ряд требований как по металлургической подготовке расплава, так и по заполнению формы (кокиля), параметрам кристаллизации.

Метод самозаполнения, который успешно используется для получения фасонных отливок [1], позволяет обеспечить регулируемое заполнение формы расплавом с установленным расходом. Известно, что при реализации метода самозаполнения напор является величиной непостоянной (регулируемой) – функцией угла поворота кокиля (φ) и в общем виде описывается формулой:

$$H = f(\varphi). \quad (1)$$

В свою очередь угол поворота кокиля (φ) также переменная величина и представляет собой функцию времени (t):

$$(\varphi) = f(t). \quad (2)$$

Из этого следует, что фактически напор (H) является функцией времени (t):

$$H = f(t). \quad (3)$$

Таким образом, при самозаполнении (согласно формулам ((1)–(3)) возможно управление напором при заливке путем осуществления поворота кокиля с управляемой скоростью по режиму, который определяется требованиями геометрии отливки. В технологическом плане дополнительно появляется еще одна степень свободы, значительно увеличивающая возможности воздействия на режим заполнения кокиля расплавом.

Одновременно с этим возникает возможность автоматизировать предварительно отработанный режим заполнения кокиля расплавом, полностью исключив человеческий фактор из процесса и заметно стабилизировав качество литья.

Качество получаемой в кокиле отливки в значительной степени зависит от скорости его заполнения металлом, которая, в свою очередь, определяется параметрами литниковой системы: площадью сечения стояка и питателей и местом подвода питателей.

Применительно к получению отливок поршней с нирезистовой вставкой и каналом для масляного охлаждения важно обеспечить два обязательных условия получения качественной отливки [2, 3]: сваривание нирезистовой вставки с основным материалом отливки и отсутствие литейных дефектов в материале отливки (пористость, усадочные дефекты, неметаллические включения и т.п.).

Заполнение кокиля в стационарном положении при литье поршней не всегда позволяет обеспечить в полной мере все необходимые условия заполнения рабочей полости расплавом, кристаллизации отливки (различных ее зон), сваривание нирезистовой вставки с основным материалов отливки. В связи с этим применение метода самозаполнения позволяет более гибко управлять всеми названными выше процессами и обеспечить получение отливок требуемого качества.

Принимая во внимание относительно небольшую массу отливки поршня, целесообразно вести заполнение кокиля не через чашу, встроенную в конструкцию кокиля, а с использованием заливочного приспособления (например, ковша) непосредственно в литниковую чашу кокиля, который в это время наклоняется, т.е. в данном случае вариант самозаполнения совмещен с традиционной заливкой. Схема реализации варианта самозаполнения представлена на рис. 1. На начальной стадии заливки (рис. 1, а) обеспечивается плавное заполнение нижней части отливки. Далее в результате поворота кокиля (рис. 1, б, в) происходит более интенсивное заполнение верхних слоев отливки. При этом гибко регулируется напор за счет скорости поворота кокиля.

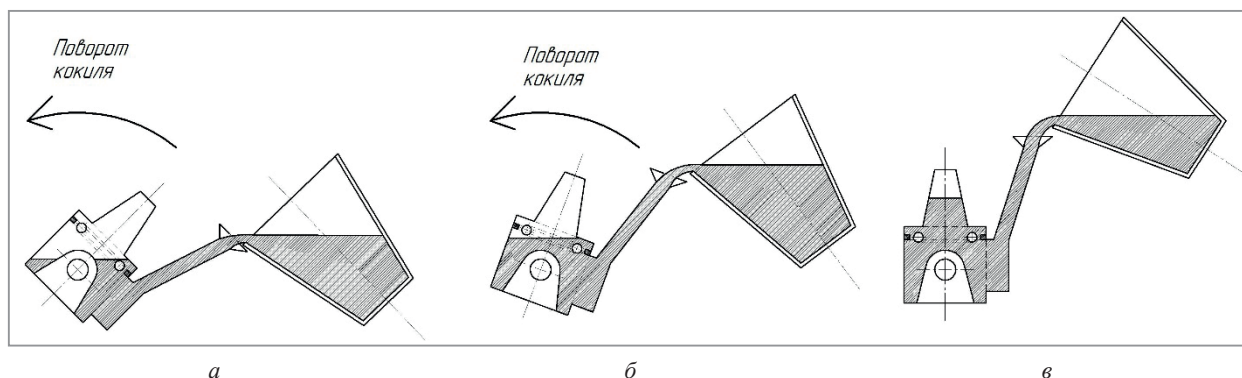


Рис. 1. Схема самозаполнения кокиля расплавом при литье поршней

Экспериментальные работы проводили с получением отливок поршней дизельных двигателей из сплава АК12М2МгН (АЛ25) (ГОСТ 1583-93) с применением вставок из нирезиста, имеющего следующий состав: 14–18 % Ni, 6–5 % Cu, 1,5–2,6 % Cr, 2,5–3 % C, 2–3 % Si, до 0,5 % P, 0,5–1 % Mn, Fe – остальное.

Было установлено, что при литье в стационарный кокиль общий уровень брака отливок поршней значительно выше, чем при использовании самозаполнения (рис. 2).

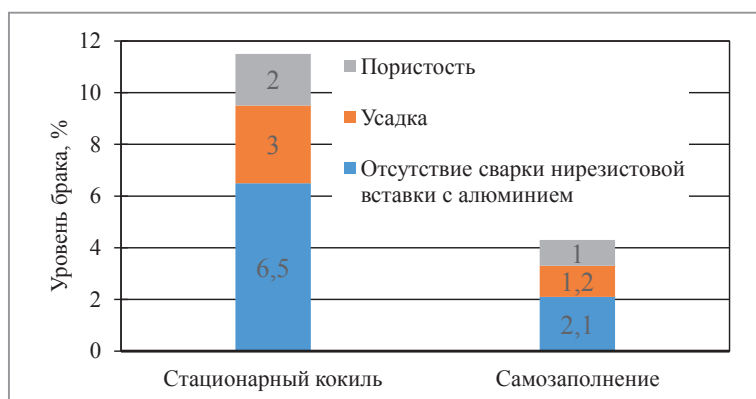


Рис. 2. Уровень брака отливок поршней при использовании разных технологий. Время заливки – 10 с

Это можно объяснить тем, что при использовании самозаполнения создаются оптимальные условия заполнения и кристаллизации различных зон отливки. В частности, при самозаполнении происходит лучшее омывание нирезистовой вставки расплавом, удаление с поверхности вставки пузырьков газов, неметаллических включений и оксидов, что, в конечном итоге, и обеспечивает сваривание алюминиевого сплава с нирезистовой вставкой.

Влияние времени заполнения кокиля расплавом на уровень брака отливок поршней показано на рис. 3.

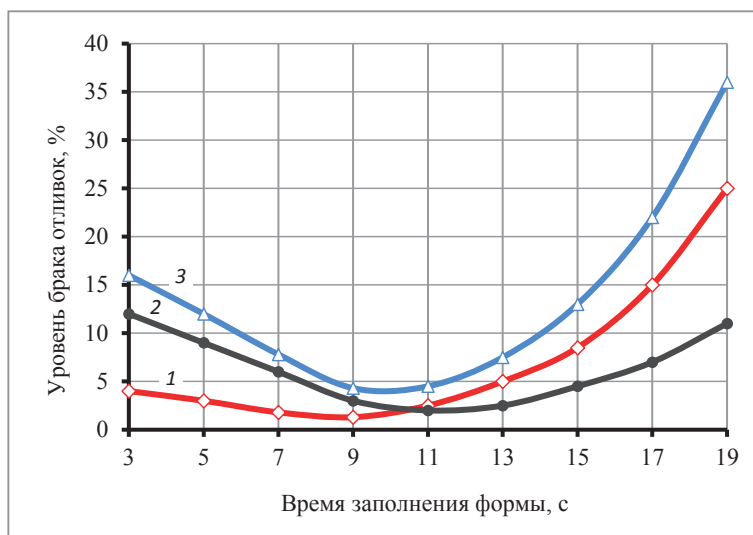


Рис. 3. Влияние времени заполнения кокиля на уровень брака отливок поршней: 1 — сваривание нирезистовой вставки; 2 — литейные вставки; 3 — всего

По мере увеличения времени заполнения формы с 3 до 9 с происходит уменьшение брака как по причине улучшения приваривания нирезистовой вставки к алюминиевому сплаву, так и по причине снижения литейных дефектов в теле отливки. Повышение уровня брака при очень быстрой заливке можно объяснить высокой турбулентностью расплава, плохим омыванием поверхности нирезистовой вставки расплавом и отсутствием условий для наиболее полного удаления воздуха и шлаковых включений с поверхности вставки.

После перехода через минимальное значение уровня брака (при заполнении кокиля за 9–11 с) по мере дальнейшего увеличения времени заполнения наблюдается существенное повышение уровня брака отливок поршней. В этом диапазоне на брак влияют другие причины, чем при быстром заполнении. Среди них следует отметить некоторое снижение температуры нирезистовой вставки в момент контакта с расплавом и более сильное окисление ее поверхности, а также уменьшение скорости потока расплава вдоль поверхности вставки, что существенно снижает эффект смыва оксидных пленок, неметаллических включений шлака и флюсов. Кроме того, увеличение времени заполнения кокиля выводит процесс кристаллизации отливки за оптимальные границы. В связи с этим существенно возрастает количество таких дефектов, как неспаи, недоливы, раковины, пористость и т.п.

Выполненные исследования показывают (рис. 3), что наиболее оптимальное время заполнения кокиля расплавом при литье поршней методом самозаполнения составляет 9–11 с. В этом случае создаются нормальные условия для сваривания нирезистовой вставки с основным материалом отливки, условия для выхода газов, задержания шлаков и оксидов, предотвращается подсос воздуха струей расплава и обеспечивается благоприятное распределение температуры в расплаве, при котором происходит направленная кристаллизация и достаточное питание всех сечений отливки.

Большое влияние на процесс формирования отливки (особенно такой сложной и разностенной, как поршень) наряду с условиями заполнения рабочей полости кокиля расплавом оказывает принудительное охлаждение различных зон кокиля.

Было установлено, что непрерывное принудительное охлаждение элементов кокиля при заливке ведет к сильному неконтролируемому переохлаждению отдельных элементов кокиля, особенно при неритмичной работе заливщика. Следствием этого может быть как чрезмерное обжатие отливкой охватываемых частей и элементов кокиля и затрудненный съем отливки, так и нарушение тепловых условий формирования отливки и появление различных видов литейного брака.

В результате проведения опытных работ установлено, что режим охлаждения элементов кокиля, сопрягаемых с наиболее массивными частями отливки, наиболее рационален по режиму 2:1 (2/3 времени кристаллизации отливки – охлаждение включено, 1/3 – выключено) (рис. 4).

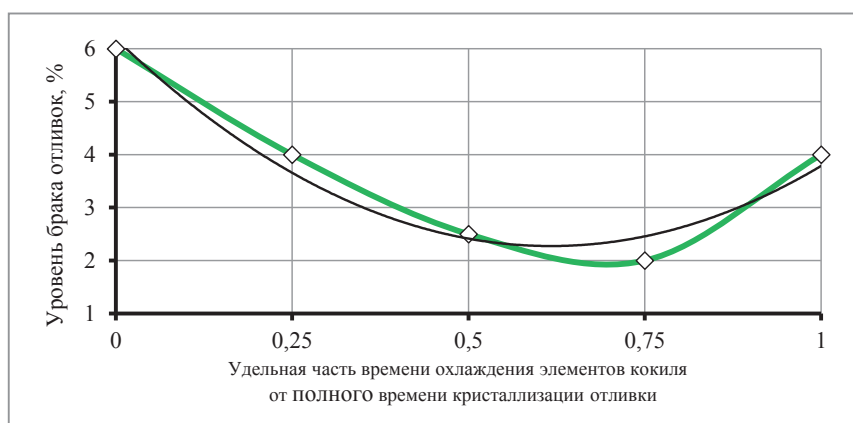


Рис. 4. Влияние времени охлаждения элементов кокиля на качество отливок поршней

Расход воды через каждый из охлаждаемых элементов кокиля регулируется индивидуально в процессе отладки технологического процесса.

Принимая во внимание особенно высокие требования к технологии литья поршней, включая необходимость регулируемого охлаждения различных зон кокиля по заданной программе, а также жесткие условия работы кокилей, формообразующие их части целесообразно изготавливать из сталей типа 40Х, 4Х5МСФ и др. В этом случае рационально заготовки формообразующих частей получать методом литья. С целью обеспечения максимальной эффективности целесообразно использовать современные технологии получения литейной модельной оснастки [4, 5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Садох М.А. Производство отливок из алюминиевых сплавов литьем в кокиль // Литейное производство. 2017. № 1. С. 18–22.
2. Садох М.А. Исследование технических параметров кокилей для получения отливок поршней // Литье и металлургия. 2011. № 3. С. 58–60.
3. Садох М.А. Определение технологических параметров производства отливок поршней высоконагруженных дизельных двигателей // Литье и металлургия. 2011. № 3. С. 61–64.
4. Нелюб И.А., Кушель П.А., Ровин С.Л. Особенности и преимущества применения современных пластполимерных материалов для изготовления модельной оснастки // Литье и металлургия. 2010. № 4. С. 36–39.
5. Современные способы создания модельных комплектов для литья / М.Л. Калиниченко, Л.П. Долгий, С.Л. Ровин, В.А. Кукареко, В.А. Калиниченко // Литье и металлургия. 2018. № 3. С. 125–130.

REFERENCES

1. Sadoha M.A. Proizvodstvo otlivok iz aljuminievyh splavov lit'em v kokil' [Production of castings from aluminum alloys by cokeel casting]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2017, no. 1, pp. 18–22.
2. Sadoha M.A. Issledovanie tehnikeskikh parametrov kokilej dlja poluchenija otlivok porshnej [Study of technical parameters of chill molds for obtaining piston castings]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 3, pp. 58–60.
3. Sadoha M.A. Opredelenie tehnologicheskikh parametrov proizvodstva otlivok porshnej vysokonagruzhennyh dizel'nyh dvigatelej [Determination of technological parameters for the production of piston castings for high-load diesel engines]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 3, pp. 61–64.
4. Neljub I.A., Kushel' P.A., Rovin S.L. Osobennosti i preimushhestva primeneniya sovremennyh plastopolimernyh materialov dlja izgotovleniya model'noj osnastki [Features and advantages of using modern plastic-polymer materials for the manufacture of model equipment]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 4, pp. 36–39.
5. Kalinichenko M.L., Dolgij L.P., Rovin S.L., Kukareko V.A., Kalinichenko V.A. Sovremennye sposoby sozdaniya model'nyh komplektov dlja lit'ja [Modern Ways to Create Model Casting Kits]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 3, pp. 125–130.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-68-74>
УДК 669.14.018.252

Поступила 10.11.2020
Received 10.11.2020

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5

Ф. И. РУДНИЦКИЙ, Л. П. ДОЛГИЙ, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: stl_minsk@tut.by

В статье приведены результаты компьютерного моделирования условий кристаллизации отливок из быстрорежущей стали Р6М5, предназначенных для изготовления фрез и зубодолбежного инструмента, используемых в условиях ОАО «Минский завод шестерен». Применение моделирования позволило оптимизировать литниковую систему, уменьшить объем прибыльной части на 30–35 % и повысить выход годного литья, что дало возможность снизить расход дорогостоящих легирующих элементов, вводимых в расплав для их компенсации при угаре во время плавки и разливки.

Ключевые слова. Быстрорежущая сталь, отливки, условия кристаллизации, компьютерное моделирование, литейная оснастка.

Для цитирования. Рудницкий, Ф. И. Особенности технологии изготовления литых инструментальных заготовок из быстрорежущей стали Р6М5 / Ф. И. Рудницкий, Л. П. Долгий // Литейное производство. 2020. № 4. С. 68–74. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-68-74>.

FEATURES OF TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING CAST TOOLBILLS FROM RAPID-CUTTING STEEL R6M5

F. I. RUDNITSKY, L. P. DOLGIY, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: stl_minsk@tut.by

The article presents the results of computer simulation of the crystallization of castings from high-speed steel R6M5, intended for the manufacture of cutters and gear shaping tools in the conditions of OJSC "Minsk Gear Plant". The use of modeling made it possible to optimize the gating system, reduce this volume of the profitable part by 30–35 % and increase the yield of suitable casting, which made it possible to reduce the consumption of expensive alloying elements introduced into the melt to compensate for burnout during melting and casting.

Keywords. High speed steel, castings, crystallization conditions, computer modeling, foundry equipment.

For citation. Rudnitsky F.I., Dolgiy L.P. Features of technology for manufacturing cast toolbills from rapid-cutting steel R6M5. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 68–74. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-68-74>.

Опыт применения литейных технологий при изготовлении литых заготовок из быстрорежущих сталей позволяет с уверенностью выделить ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами использования проката и поковок:

- возможность использования собственных отходов инструментального производства (стружка, вышедший из строя инструмент, немерные заготовки проката, металлоабразивный шлам);
- экономия металла за счет максимального уменьшения припусков под механическую обработку при использовании точных методов литья (до 90 %);
- повышение стойкости инструмента путем оптимизации химического состава, технологических факторов изготовления на всех этапах от плавки металла до заливки и термической обработки заготовок с максимальным учетом конкретных условий эксплуатации [1–3].

Для промышленного использования необходимы заготовки круглого и квадратного сечения различной длины, а также фасонные заготовки по размерам, максимально приближающимся к размерам готового инструмента. Для обеспечения качественного заполнения формы металлом, предотвращения литейных дефектов (усадочных раковин, пористости и др.), которые особенно недопустимы в инструментальных заготовках, учитывая особенности стали Р6М5 (сложнолегированный широкоинтервальный сплав с невысокими технологическими свойствами, такими, как усадка (2–2,2 %),

склонность к образованию горячих и холодных трещин), использовали методы компьютерного моделирования при проектировании оснастки.

В ходе работы для выполнения моделирования литейной технологии получения цилиндрических заготовок из стали Р6М5 (для изготовления фрез) в программном пакете «SolidWorks» была построена 3D-модель кокиля с традиционной прибыльной частью, выполненной в теле металлической формы и кокиля с прибыльной надставкой из химически твердеющей смеси (рис. 1).

Для расчетов литейной технологии в пакете «Полигон» построена конечно-элементная модель кокиля с использованием пакета «CosmosDesignStar» (рис. 2).

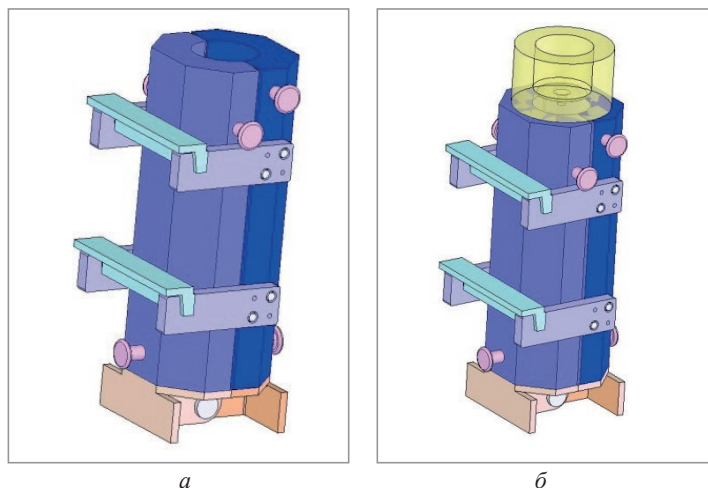


Рис. 1. Виртуальная 3D-модель кокиля:
а – модель кокиля; б – модель кокиля с прибыльной надставкой

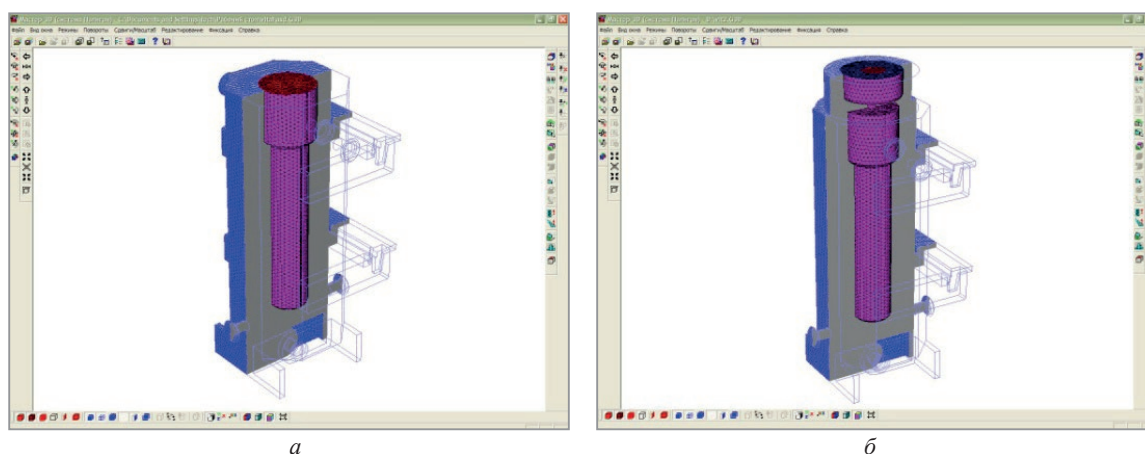
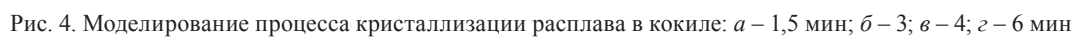
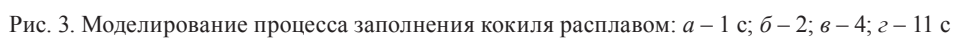


Рис. 2. Конечно-элементная модель кокиля: а – модель кокиля; б – модель кокиля с прибыльной надставкой

Проведен расчет гидродинамических процессов заполнения кокиля расплавом в модуле «Flow Vision» пакета «Полигон» (рис. 3). Выполнено моделирование процесса кристаллизации расплава в кокиле в модуле «Фурье3D» пакета «Полигон» (рис. 4). Получена картина усадочных дефектов в объеме отливки, образовавшихся в процессе кристаллизации расплава в кокиле (рис. 5).

Из результатов моделирования следует, что при выбранной литниковой системе после заполнения формы расплавом и его кристаллизации в теле отливки возможно образование дефектов, что является недопустимым. Для исправления ситуации с возможным появлением дефектов предложен вариант с использованием прибыльной надставки из стержневой химически твердеющей смеси. Такая надставка вследствие меньшей теплоаккумулирующей способности ее материала может существенно изменить условия затвердевания отливки. Поэтому на втором этапе работы проведен расчет гидродинамических процессов заполнения кокиля с прибыльной надставкой расплавом в модуле «FlowVision» пакета «Полигон» (рис. 6). Выполнено моделирование процесса кристаллизации расплава в кокиле с прибыльной надставкой в модуле «Фурье3D» пакета «Полигон» (рис. 7). Получена картина усадочных дефектов в объеме отливки, образовавшихся в процессе кристаллизации расплава в кокиле с прибыльной надставкой (рис. 8).



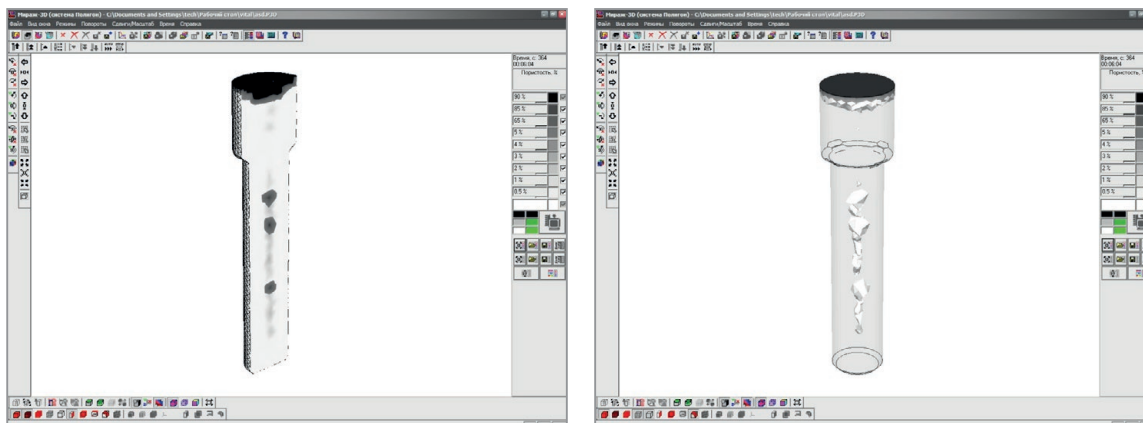


Рис. 5. Картина усадочных дефектов в отливке: *а* – в сечении отливки; *б* – в объеме отливки

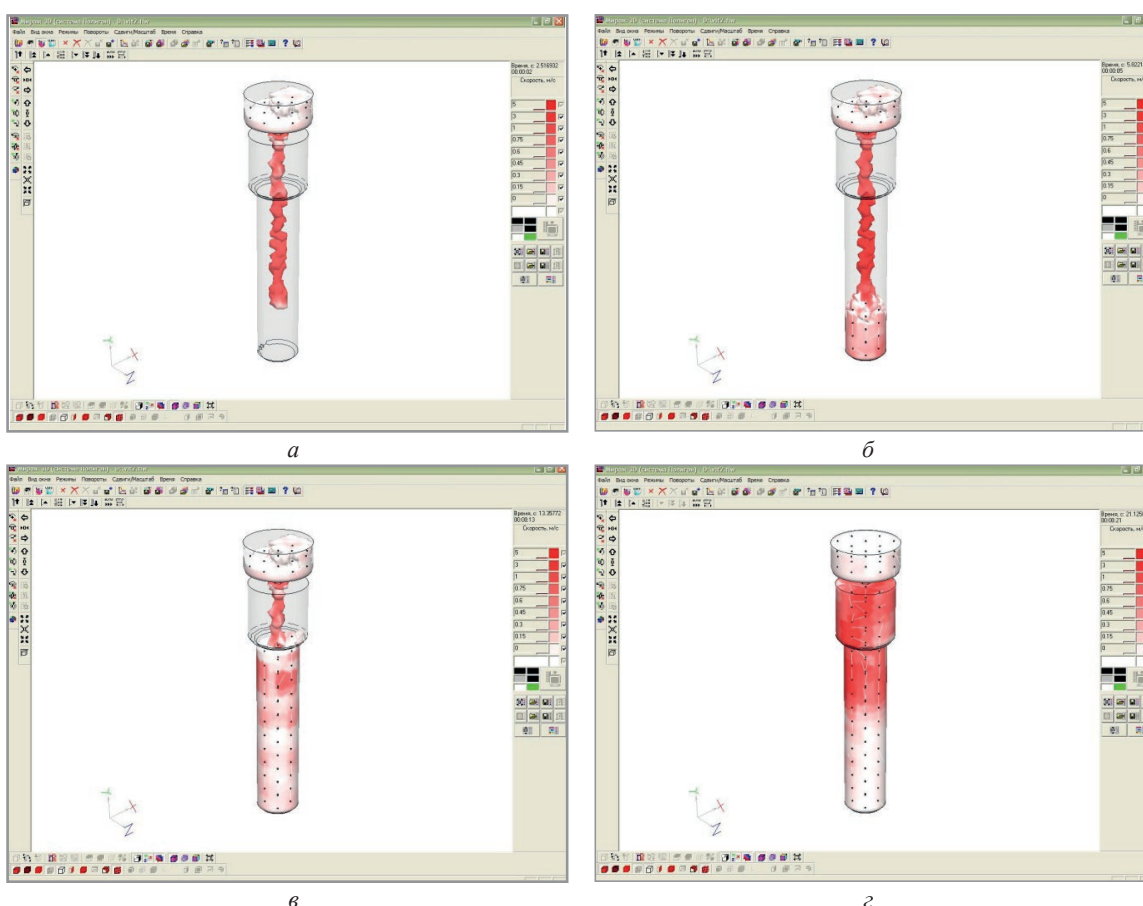


Рис. 6. Моделирование процесса заполнения кокиля с прибыльной надставкой расплавом: *а* – 2,5 с; *б* – 6; *в* – 13; *г* – 21 с

Результаты моделирования подтвердили эффективность применения прибыльной надставки для устранения усадочных дефектов в теле отливки.

В рамках выполнения научно-производственного договора с ОАО «Минский завод шестерен» по разработке технологии переплава лома и отходов стали Р6М5 с целью повышения выхода годного литья была разработана с использованием результатов моделирования и изготовлена специальная литейная оснастка. Комплект включает металлическую литейную форму (кокиль) с емкостью для установки прибыльных надставок и унифицированный пластиковый стержневой ящик для получения надставок из материалов (и их комбинаций) с различной степенью теплоизоляции (рис 9).

Опробованы несколько вариантов теплоизолирующих композиций, основные из них:

- 1) кварцевый песок (жидкостекольная смесь с продувкой CO_2);
- 2) разработанный композиционный состав № 3 [1];
- 3) вставки из мулито-кремнеземного волокна ММРР-130;

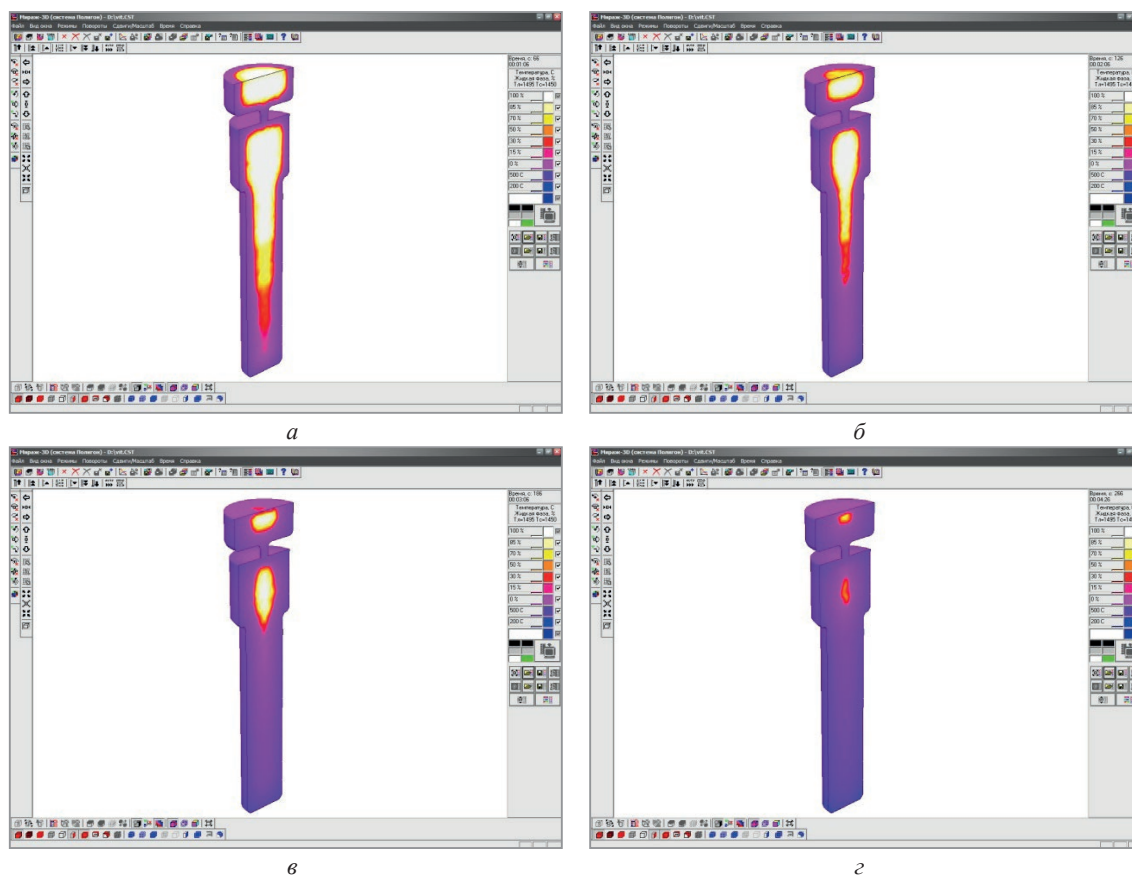


Рис. 7. Моделирование процесса кристаллизации расплава в кокиле с прибыльной надставкой: а – 1,5 мин; б – 3; в – 4; г – 5 мин

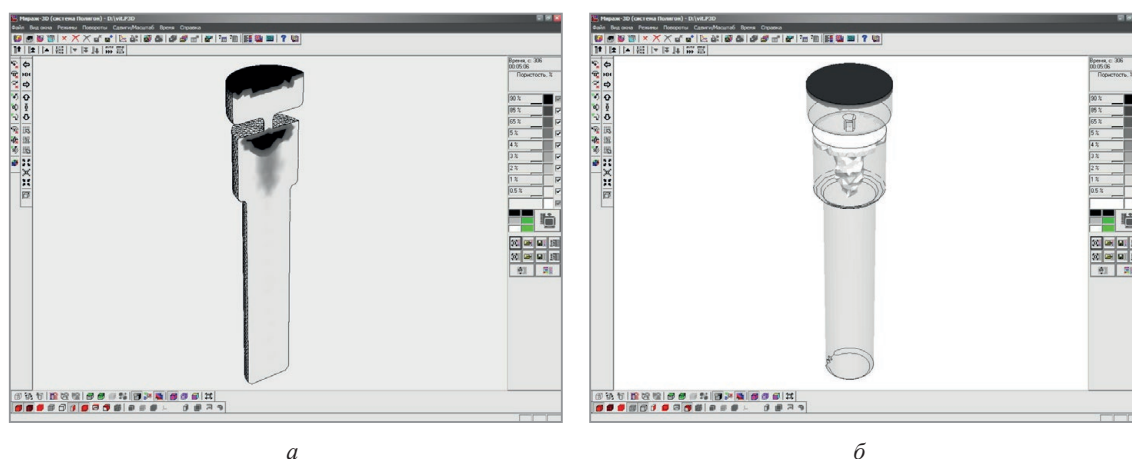


Рис. 8. Картина усадочных дефектов в отливке, полученной в кокиле с прибыльной надставкой: а – в сечение отливки; б – в объеме отливки

- 4) обмазка песчаной надставки экзотермической смесью со связующим;
- 5) дополнительный подогрев прибыльной части отливки, прессованной экзотермической вставкой (рис. 10).

Из приведенных наилучшие результаты показали варианты 2, 3 и 5. Недостатки использования мулито-кремнеземного волокна – его высокая стоимость и неудовлетворительные экологические условия при производстве вставок. При дополнительном подогреве прессованными экзотермическими вставками наблюдается значительное дымовыделение и пироэффект, что также ухудшает экологическую обстановку в замкнутом пространстве литейного участка. Кроме того, сложно достичь стабильного эффекта при данной технологии. Поэтому при относительно равных прочих условиях предпочтение отдано композиционному составу № 3 на основе недорогих и доступных материалов (в основном отходы производства) – глина (15%), древесные опилки (40%), отходы производства стекловолна (20%) и маршаллит или кварцевый песок (25%) (рис. 11).

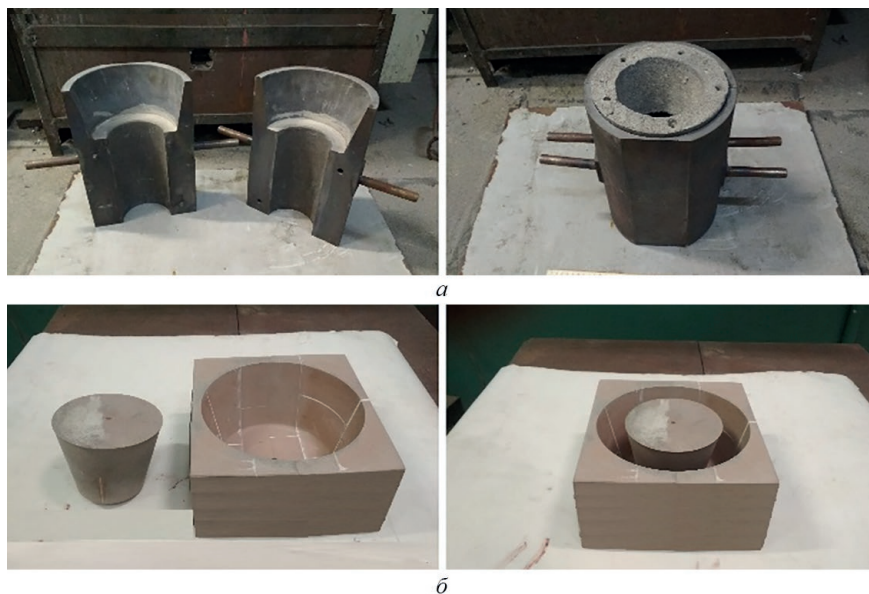


Рис. 9. Технологическая оснастка для разливки металла: *а* – кокиль; *б* – форма для получения прибыльной надставки

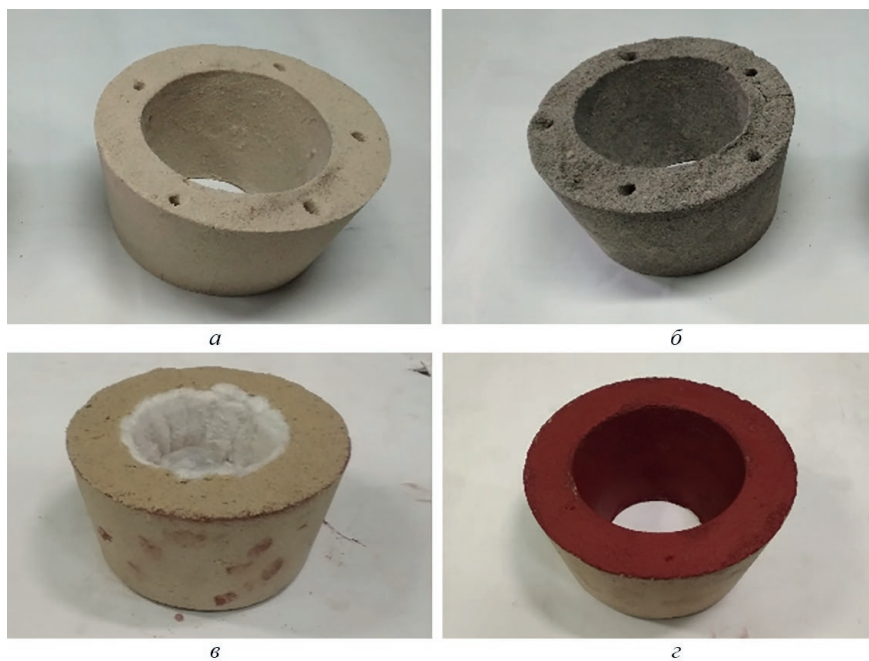


Рис. 10. Внешний вид теплоизолирующих вставок:
а – кварцевый песок; *б* – состав № 3; *в* – вставка из ММРР-130; *г* – обмазка экзосмесью

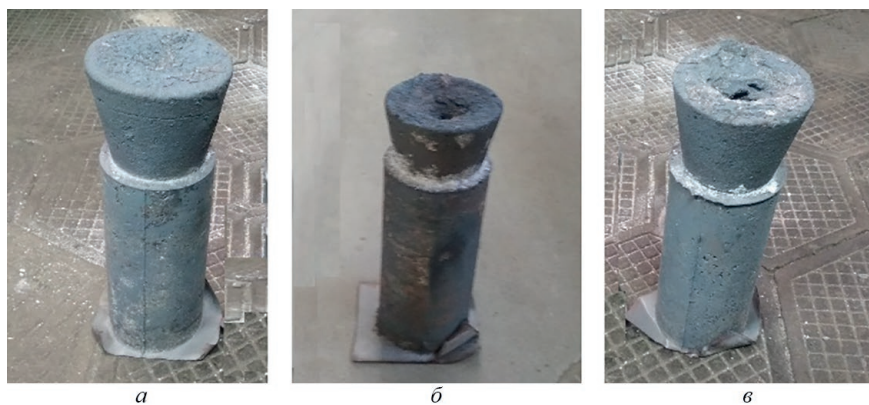


Рис. 11. Отливки с прибыльной частью, полученные с применением вставок различного состава:
а – без утепления; *б* – со вставкой из композита № 3; *в* – с обмазкой песчаной надставки экзотермической смесью

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чаус А. С., Рудницкий Ф. И. Влияние условий эксплуатации литого металлорежущего инструмента на особенности его изнашивания и стойкость. Часть 1. Анализ условий работы инструментов // Трение и износ. 2007. Т. 28. № 5. С. 449–456.
2. Чаус А. С., Рудницкий Ф. И. Влияние условий эксплуатации литого металлорежущего инструмента на особенности его изнашивания и стойкость. Часть 2. Результаты стойкостных испытаний // Трение и износ. 2008. Т. 29. № 2. С. 198–203.
3. Рудницкий Ф. И. Особенности эксплуатации инструмента из литой быстрорежущей стали // Литье и металлургия. 2006. № 2. Ч. 2. С. 173–177.
4. Долгий Л. П., Калининченко М. Л., Калининченко В. А., Лущик П. Е. Получение изделий ответственного назначения из износостойкого чугуна ЧХ16М2 // Литейное производство. 2002. № 1. С. 8–11.

REFERENCES

1. Chaus A. S., Rudnickij F. I. Vlijanie uslovij jekspluatacii litogo metallorzhushhego instrumenta na osobennosti ego iznashivaniya i stojkost'. Chast' 1. Analiz uslovij raboty instrumentov [Influence of the operating conditions of a cast metal-cutting tool on the characteristics of its wear and durability. Part 1. Analysis of working conditions of instruments]. *Trenie i iznos = Friction and wear*, 2007, vol. 28, no. 5, pp. 449–456.
2. Chaus A. S., Rudnickij F. I. Vlijanie uslovij jekspluatacii litogo metallorzhushhego instrumenta na osobennosti ego iznashivaniya i stojkost'. Chast' 2. Rezul'taty stojkostnyh ispytanij [Influence of the operating conditions of a cast metal-cutting tool on the characteristics of its wear and durability. Part 2. Results of resistance tests]. *Trenie i iznos = Friction and wear*, 2008, vol. 29, no. 2, pp. 198–203.
3. Rudnickij F. I. Osobennosti jekspluatacii instrumenta iz litoj bystrorezhushhej stali [Features of the operation of tools made of cast high-speed steel]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2006, no. 2, ch. 2, pp. 173–177.
4. Dolgij L. P., Kalinichenko M. L., Kalinichenko V. A., Lushhik P. E. Poluchenie izdelij otvetstvennogo naznachenija iz iznosostojkogo chuguna ChH16M2 [Obtaining critical products from wear-resistant cast iron ChKh16M2]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2020, no. 1, pp. 8–11.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-75-77>
УДК 536.75

Поступила 21.10.2020
Received 21.10.2020

О БРОУНОВСКОМ ДВИЖЕНИИ В ЖИДКОСТЯХ

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

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

Показано, что броуновское движение в воде происходит в результате упругих столкновений нанокристаллов льда с броуновскими частицами. Вода состоит на 87% из нанокристаллов льда и на 13% — из молекул воды. При 300 К нанокристалл льда в воде в среднем состоит из 24 молекул воды. Броуновское движение является экспериментальным подтверждением нанокристаллического строения жидкостей. Такое представление о жидкостях имеет большое значение для теории кристаллизации и модифицирования сплавов. В металлических жидкостях броуновское движение относится к микроскопическим неметаллическим частицам и интерметаллидам, которые имеют плотности, сравнимые с плотностями расплавов. В жидких алюминиевых сплавах броуновскими частицами являются микроскопические частицы оксида алюминия, которые остаются в отливках при их затвердевании.

Ключевые слова. Броуновское движение, вода, жидкости, броуновские частицы, нанокристаллы, молекулы, расплав.

Для цитирования. Марукович, Е.И. О броуновском движении в жидкостях / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 75–77. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-75-77>.

ABOUT BROWNIAN MOVEMENT IN 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.

It has been shown that Brownian movement in water occurs as a result of elastic collisions of ice nanocrystals with Brownian particles. Water consists of 87% of ice nanocrystals and 13% of water molecules. At 300 K, the ice nanocrystal in water on average consists of 24 water molecules. Brownian movement is an experimental confirmation of the nanocrystalline structure of liquids. This concept of liquids is of great importance for the theory of crystallization and modification of alloys. In metallic liquids, Brownian motion refers to microscopic non-metallic particles and intermetallides that have densities comparable to melt densities. In liquid aluminum alloys, Brownian particles are microscopic alumina particles that remain in the castings when they solidify.

Keywords. Brownian movement, water, liquids, Brownian particles, nanocrystals, molecules, melt.

For citation. Marukovich E.I., Stetsenko V. YU., Stetsenko A.V. About brownian movement in liquids. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 75–77. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-75-77>.

Броуновское движение представляет собой беспорядочное (хаотическое) движение микроскопических твердых частиц, плотность которых сравнима с плотностью среды, в которой они находятся [1]. Броуновская частица (БЧ) движется под воздействием ударов молекул (атомов). Броуновское движение является экспериментальным подтверждением молекулярно-кинетической теории о хаотическом движении молекул (атомов) [2]. Поэтому выводы этой теории применимы к жидкостям.

Броуновское движение является результатом неодновременного упругого удара молекул (атомов) по БЧ. В противном случае она оставалась бы в покое из-за компенсирующих ударных воздействий. Поэтому необходимо определить действие, которое окажет одна молекула (атом) на БЧ. Экспериментально броуновское движение хорошо изучено для прозрачных жидкостей, особенно воды. Установлено, что средняя скорость взвешенной в воде БЧ размером 1 мкм составляет 0,35 мкм /с [3]. Определим среднюю скорость такой БЧ при упругом соударении с одной молекулой воды. Согласно закону сохранения импульса:

$$2m_2v_2 = m_1v_1, \quad (1)$$

где m_1 , v_1 – масса и средняя скорость БЧ; m_2 , v_2 – масса и средняя скорость молекулы воды. Из уравнения (1) следует:

$$v_1 = 2v_2 \frac{m_2}{m_1}. \quad (2)$$

Пусть БЧ является сферической диаметром d_1 . Тогда m_1 будет определяться следующим уравнением:

$$m_1 = \rho_1 \frac{\pi d_1^3}{6}, \quad (3)$$

где ρ_1 – плотность БЧ, взвешенной в воде. Принимаем: $\rho_1 = 10^3$ кг/м³ и $d_1 = 10^{-6}$ м. Тогда из (1) получаем $m_1 = 5 \cdot 10^{-16}$ кг. Величина v_2 определяется следующим уравнением [2]:

$$v_2 = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_2}}, \quad (4)$$

где k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – температура воды. Принимаем $T = 300$ К. Тогда из (4) получаем $v_2 = 607$ м/с. Значение m_2 составляет $3 \cdot 10^{-26}$ кг [1]. Подставляя значения v_2 , m_1 , m_2 в уравнение (2), получаем $v_1 = 0,073$ мкм/с. Это значение средней скорости БЧ от удара одной молекулы воды в 5 раз меньше средней экспериментальной скорости БЧ. Следовательно, в БЧ ударяет не одна молекула, а комплекс (наночастица), состоящая из n молекул.

Определим величину n . Согласно закону сохранения импульса:

$$2m_3v_3 = m_1v, \quad (5)$$

где m_3 , v_3 – масса и средняя скорость наночастицы, состоящей из n молекул воды; v – экспериментальная средняя скорость БЧ массой m_1 в воде.

Значение v составляет $0,35 \cdot 10^{-6}$ м/с. Из уравнения (5) с учетом $m_3 = nm_2$ следует:

$$n = \frac{m_1v}{2m_2v_3}. \quad (6)$$

Величина v_3 определяется следующим уравнением [2]:

$$v_3 = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_3}}. \quad (7)$$

Из (6) и (7) с учетом $m_3 = nm_2$ после простых преобразований получим:

$$n = \frac{\pi m_1^2 v^2}{32 m_2 k T}. \quad (8)$$

Подставляя значения m_1 , v , m_2 , k , T в уравнение (8), получаем $n = 24$. Это означает, что наночастицы, которые вызывают броуновское движение БЧ диаметром 1 мкм в воде при 300 К со средней скоростью 0,35 мкм/с, в среднем состоят из 24 молекул каждая.

Известно, что элементарная кристаллическая решетка льда является гексагональной, состоящей из 12 молекул воды. Поэтому можно считать, что в воде при 300 К существуют нанокристаллы льда. На них распадаются микрокристаллы льда в процессе их плавления. Известно, что удельная теплота парообразования воды при температуре кипения и нормальном давлении составляет 2260 кДж/кг, а удельная теплота плавления льда – 340 кДж/кг [1]. При кипении воды образуется пар, состоящий из молекул. Тогда можно считать, что удельная теплота молекуляризации льда составляет 2600 кДж/кг. В этом случае после расплавления льда молекуляризуются только 13 % микрокристаллов льда, а остальные распадутся на нанокристаллы. Поэтому следует считать, что вода состоит на 13 % из молекул и на 87 % – из нанокристаллов льда, которые участвуют в броуновском движении в качестве наночастиц. Вода имеет нанокристаллическую структуру.

По аналогии подобные выводы можно сделать для металлических жидкостей (расплавов). Они в среднем на 96 % состоят из нанокристаллов фаз и на 4 % – из атомов [4]. В металлических жидкостях броуновское движение относится к неметаллическим и интерметаллидным частицам, которые имеют плотности, сравнимые с плотностями расплавов. Например, в жидких алюминиевых сплавах микроскопические частицы оксида алюминия будут участвовать в броуновском движении. Оно затрудняет процесс удаления этих частиц и является одной из основных причин загрязнения алюминиевых сплавов

оксидами алюминия. Кроме вреда, броуновское движение помогает стабилизировать в расплаве микроскопические порошки при получении композиционных материалов.

Таким образом, броуновское движение является экспериментальным подтверждением нанокристаллического строения жидкостей, которые в основном состоят из нанокристаллов, разобщенных свободными молекулами или атомами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Аксенович Л. А., Зенькович В. И., Фарино К. С.** Физика в средней школе. Минск: Аверсэв, 2010. 1102 с.
2. **Трофимова Т. И.** Курс физики. М.: Академия, 2007. 560 с.
3. Физическая энциклопедия. Т. 1. М.: Советская энциклопедия, 1988. 704 с.
4. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Наноструктурная теория металлических расплавов // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 7–9.

REFERENCES

1. **Aksenovich L. A., Zen'kovich V. I., Farino K. S.** *Fizika v srednej shkole* [High School Physics]. Minsk, Aversev Publ., 2010. 1102 p.
2. **Trofimova T. I.** *Kurs fiziki* [Physics Course]. Moscow, Akademiya Publ., 2007. 560 p.
3. *Fizicheskaya enciklopediya* [Physical Encyclopedia]. Moscow, Sovetskaya enciklopediya Publ., 1988, vol. 1, 704 p.
4. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Nanostrukturnaya teoriya metallicheskih rasplavov [Nanostructural theory of metal melts]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 7–9.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-78-89>
УДК 541.183.: 66.096.5: 544.478

Поступила 13.11.2020
Received 13.11.2020

ТЕНДЕНЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕНТОНИТОВЫХ ГЛИН

А.С. ПАНАСЮГИН, Л.П. ДОЛГИЙ, И.Л. КУЛИНИЧ, А.А. ГЕРАСИКОВА, А.В. МИКИШКО,
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

В работе дана общая характеристика сфер применения бентонитовых глин. Проведена оценка ряда месторождений с точки зрения возможности их использования в различных технологических процессах. Проведен анализ направлений применения бентонитовых глин в литейном производстве.

С использованием методов рентгенофазового и газохроматографического анализа, сканирующей электронной микроскопии, термогравиметрии и прямых адсорбционно-структурных измерений показано, что материалы, полученные на основе монтмориллонита и гетероядерных гидроксокомплексов Cr-Cu, обладают большей термостабильностью и лучшими сорбционными характеристиками по сравнению с монтмориллонитом, фиксированным мооядерными гидроксокомплексами Cr.

С использованием монтмориллонита, модифицированного гетероядерными гидроксокомплексами Cr-Cu, обладающего наилучшими адсорбционно-структурными показателями, и цеолита НЦВМ наработана лабораторная партия смешанных адсорбентов-катализаторов.

Данный материал изучен в процессах глубокого окисления паров низкоконцентрированных органических веществ, таких, как ацетон, толуол, этилацетат, этанол, бутанол и бутилацетат.

Установлено, что степень конверсии на смешанных адсорбентах-катализаторах для изученных адсорбатов составляет 94,9–97,7 (средняя 96,2%).

Ключевые слова. Бентонитовые глины, монтмориллонит, литейные формы, адсорбенты-катализаторы, шпательные глины, цеолит НЦВМ.

Для цитирования. Панасюгин, А.С. Тенденции использования бентонитовых глин / А.С. Панасюгин, Л.П. Долгий, И.Л. Кулинич, А.А. Герасикова, А.В. Микишко, Н.П. Машерова, А.Р. Цыганов // *Литье и металлургия*. 2020. № 4. С. 78–89. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-78-89>.

TRENDS IN THE USE OF BENTONITE CLAYS

A. S. PANASYUGIN, L. P. DOLGIY, I. L. KULINICH, A. A. GERASIKOVA, A. V. MIKISHKO,
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,
Sverdlova str. E-mail: mascherova.nat@mail.ru

The paper gives a general description of the areas of application of bentonite clays. A number of deposits were evaluated in terms of their use in various technological processes. Analysis of directions of application of bentonite clays in foundry was carried out.

Using the methods of X-ray and gas chromatographic analysis, scanning electron microscopy, thermogravimetry and direct adsorption-structural measurements, it is shown that materials obtained from montmorillonite and heteronuclear hydroxo complexes Cr-Cu have greater thermal stability and better sorption characteristics compared to montmorillonite fixed by mononuclear hydroxo complexes.

Using montmorillonite modified with heteronuclear hydroxo complexes Cr-Cu with the best adsorption-structural parameters and zeolite NCVМ, a laboratory batch of mixed adsorbent catalysts has been developed.

This material has been studied in deep vapor oxidation processes of low concentrated organic substances such as acetone, toluene, ethyl acetate, ethanol, butanol and butyl acetate.

The conversion rate on the mixed adsorbent catalysts for the studied adsorbates was found to be 94.9–97.7 (average 96.2%).

Keywords. Bentonite clays, montmorillonite, casting molds, adsorbents-catalysts, crosslinked clays, zeolite HZHM.

For citation. Panasyugin A. S., Dolgiy L. P., Kulinich I. L., Gerasikova A. A., Mikishko A. V., Masherova N. P., Tsyganov A. R. Trends in the use of bentonite clays / *Foundry production and metallurgy*, 2020, no 4, pp. 78–89. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-78-89>.

Введение

Развитие промышленных технологий приводит к неуклонному расширению сфер применения природных глинистых минералов. Одновременно с этим развитие технологий, освоение новых производственных процессов и видов продукции все актуальнее ставит задачи по охране окружающей среды, а также разработке материалов и способов нейтрализации загрязнителей. В реальных производственных процессах практически всегда суммарные концентрации выделений загрязняющих веществ колеблются в широком диапазоне и, как следствие, оптимизировать режим работы систем нейтрализации весьма проблематично.

Целью данной работы являлось проведение анализа тенденций применения бентонитовых глин в различных областях, в частности в машиностроении.

Результаты и их обсуждение

Анализ и общая характеристика основных сфер применения бентонитовых глин

Основным породообразующим компонентом бентонитовых глин является преимущественно монтмориллонит (> 60–70 %), в свою очередь входящий в группу смектита. В качестве примесных компонентов встречаются кварц, полевые шпаты, кальцит, редко пирит и органическое вещество, а также другие глинистые минералы – каолинит, иллит, смешанослойные глинистые минералы, реже хлорит и вермикулит. Смектиты представляют собой гидратированные алюмосиликаты, состоящие из двух тетраэдрических и расположенной между ними одной октаэдрической сетки, образующих слой 2:1. Благодаря изоморфным замещениям в составе октаэдрических и тетраэдрических сеток формируется отрицательный заряд слоя, который компенсируется межслоевыми катионами и обеспечивает высокие сорбционные свойства бентонитовых глин. Для монтмориллонита характерна преимущественная локализация заряда в составе октаэдрических сеток, что приводит к высокой сорбции катионов и органических компонентов. По характеру обменных катионов в составе межслоевого комплекса монтмориллонита бентонитовые глины подразделяются на щелочные (натриевые) и щелочноземельные (кальций, магний) типы. Щелочные бентониты обладают более высокими технологическими свойствами по сравнению с щелочноземельными, в связи с тем что ионы щелочных металлов, в первую очередь натрия, имеют более высокий потенциал гидратации. В результате набухание Na-монтмориллонитов значительно выше, чем Са-монтмориллонитов. Также на свойства бентонитов оказывает влияние локализация заряда. Высокие сорбционные показатели и высокая набухаемость связаны с отсутствием заряда в тетраэдрической сетке, напротив, появление небольшой доли тетраэдрического заряда приводит к уменьшению сорбционной способности и снижению набухания. В той же степени на сорбционные показатели влияет и показатель средней величины заряда слоя – снижение сорбционной емкости при увеличении или излишнем снижении величины заряда слоя. Указанные особенности структуры монтмориллонита определяют специфические свойства, такие, как связующая и сорбционная способность, термостойкость и др. Таким образом, бентонитовые глины имеют важное значение и рассматриваются как перспективное и широко используемое промышленное сырье [1].

В табл. 1 приведены результаты анализа долей использования бентонитовых глин в различных областях [2,3].

Таблица 1. Доля использования бентонитовых глин в различных областях

Отрасль	Доля, %		
	Россия	Беларусь	Украина
Машиностроение	34	46	37,8
Газонефтехимия	33	24	26,6
Горнодобыча	11	17	11,6
Строительство	10	7	8,1
Текстильная промышленность	5	3	3,7
Водоподготовка	4	3	4,9
Пищевая	2	4	4,5
Ядерная энергетика	1	2	2,8

Если рассмотреть структуру использования бентонитовых глин в Республике Беларусь, то видны значительные отличия в процентном соотношении по сравнению с Россией и Украиной.

Так, если сравнивать, например, такие сферы, как машиностроение и газонефтехимия, то заметно, что в РБ в машиностроении бентонитовых глин используется в 1,3 раза больше, чем в среднем в России и Украине, в то же время газонефтехимия у нас потребляет бентонита в 1,2–1,4 раза меньше. Данное обстоятельство связано в первую очередь со специфической структурой промышленности РБ, а также с более низкими объемами потребления, что в свою очередь связано с отсутствием в Беларуси собственных месторождений, содержащих в своем составе монтмориллонит в количествах, делающих рентабельными при использовании в газонефтехимической, текстильной и горнодобывающей промышленности.

Далее нами были рассмотрены более детально направления использования бентонитовых глин в различных отраслях производства. По мнению различных авторов, которые используют в общем и целом схожие критерии оценки сфер применения бентонитовых глин, их число колеблется от 180 до 205. В табл. 2 приведены наиболее распространенные процессы и получаемые материалы на основе бентонитовых глин и его основной кристаллографической фазы – монтмориллонита.

Таблица 2. Наиболее распространенные процессы и получаемые материалы на основе бентонитовых глин и монтмориллонита

Отрасль	Процесс
Машиностроение	Получение песчано-глинистых форм
	Изготовление стержней
	Производство железорудных окатышей
Горнодобыча	Производство буровых глинопоршков
Строительство	Получение вспененных строительных материалов
	Производство водонепроницаемых бетонов
Косметология	Получение масок, скрабов, теней
Медицина	Фильтрация суспензий и физиологических растворов
	Лечебные ванны
Текстильная промышленность	Очистка сточных вод от красителей
Пищевая	Очистка масел
	Очистка виноматериала
Ядерная энергетика	Подушки гидроизоляции хранилищ жидких радиоактивных отходов
	Сорбционные материалы
	Термофиксация долгоживущих радиоизотопов
Газонефтехимия	Очистка нефтяных дисциллятов
	Создание катализаторов
	Компонентов катализаторов
	Носителей активных каталитических фаз
	Сорбционных материалов различного назначения для удаления загрязнений из водных объектов и отходящих газов

Бентонит в литейном производстве

На каждом конкретном предприятии литейное производство имеет свои особенности аппаратного оформления основных и вспомогательных процессов, используемых материалов, в частности способов производства песчано-глинистых форм по мокрому или сухому методу.

В формы, изготовленные по сырому методу, льют в основном небольшие и преимущественно тонкостенные детали для массового производства от килограммов до сотен килограммов и при производительности несколько сот форм за смену (автомобильное литье). При использовании высококачественных формовочных материалов в сырых формах можно отливать достаточно крупные детали: чугуны массой до 1500 кг и стальные – до 800 кг. Часто для этого применяют технологии формовки на органических или жидкостекольных связующих.

За последние два десятилетия в Европе огромное внимание было уделено технологии производства отливок в сырых песчано-глинистых формах, что привело к значительному совершенствованию формовочного оборудования, а также методов уплотнения формовочной смеси. В результате стало возможным и в песчано-глинистых формах производить отливки геометрически точные, сложной конфигурации. Совершенствование методов изготовления моделей открыло новые возможности их проектирования и производства. Все эти факторы обеспечили возможность производства в песчано-глинистых формах отливок многофункционального назначения, в конструкциях которых

присутствуют очень тонкие стенки. В результате всех этих изменений возросли и требования, предъявляемые к формовочной смеси.

На большинстве литейных предприятий в смесеприготовительных цехах отсутствует аппаратура автоматического контроля таких показателей, как влажность и насыпная масса. Горелая земля подается с высокой и не всегда одной и той же температурой (оборотная смесь должна быть предварительно охлаждена 10–25 °С, поскольку только за счет этого можно поднять прочность на 20–25 % при прочих равных условиях), а качество перемешивания оставляет желать лучшего. Без решения этих вопросов использование высококачественных бентонитовых связующих не даст должного результата.

Главное преимущество сырой формовки заключается в том, что при ее применении сокращаются производственный цикл, так как в этом случае не нужна сушка. Сразу же после выбивки формовочная смесь подвергается регенерации и поступает снова в систему смесеприготовления. Таким образом, технология литья в сырые песчано-глинистые формы более предпочтительна для массового производства.

Повышение качества отливок в сырых формах может быть достигнуто введением специальных добавок, регулирующих те или иные свойства смеси, которые могут быть классифицированы следующим образом: антипригарные; противоусадочные; улучшающие формуемость, уплотняемость, текучесть; стабилизирующие влажность формовочной смеси.

Наиболее распространенной антипригарной добавкой для чугунного литья является молотый каменный уголь. Добавки каменноугольного порошка в формовочную смесь позволяют получить отливки с чистой, без химического пригара, качественной поверхностью. Их действие основано на разложении каменного угля, образовании восстановительных углеводородных газов, при разложении которых образуется пиролитический (блестящий) углерод, не смачиваемый расплавленным металлом. Он покрывает тонким слоем поверхность зерен песка, изолируя форму от отливки. Молотый уголь вводится в формовочную смесь в количестве, зависящем от его способности выделять блестящий углерод, а также от толщины стенок отливок и их массы.

Для борьбы с усадками в смесь обычно вводят добавки древесной муки и модифицированного крахмала. В США наиболее распространенным способом борьбы с усадками является повышение содержания натриевого бентонита в смеси. Свести к минимуму риск образования усадками можно путем подбора оптимального режима активации кальциевого бентонита содой, а также подбором каменного угля с определенной температурой размягчения. Для улучшения формования смеси в ее состав вводят ПАВ. Это дает возможность сократить расход бентонита, время перемешивания смеси, брак форм и отливок, повышает качество поверхности отливок.

Для стабилизации влажности на автоматических формовочных линиях в смеси вводят в количестве до 0,5 % модифицированного крахмала, что также позволяет улучшить отпечаток модели, повысить прочность смеси при сжатии, прочность в зоне конденсации влаги, предохранить кромки от усыхания, улучшить выбивку отливок из форм.

Таким образом, для получения качественной формы нужно сбалансировать состав формовочной смеси путем ввода корректирующих добавок с учетом особенностей применяемого бентонита и песка. Это зачастую невозможно в условиях смесеприготовления в литейных цехах. Поэтому в Европе для сырых песчано-глинистых форм уже давно используют комплексные связующие на основе бентонита, в состав которых необходимые добавки вводятся не непосредственно в процессе приготовления смеси в формовочном цехе, а централизованно в процессе производства бентопорошка на специализированном предприятии. Их применение снижает удельный расход формовочных материалов, обеспечивает стабильные свойства смеси, необходимые для работы автоматических линий.

По данным маркетинговых исследований, проведенных фирмой «IKO Minerals GmbH», доля литья, получаемого с использованием мокрых форм, составляет в Японии 40 %, Германии – 40 %, Англии – 39 %, Франции – 39 %.

Отсюда следует, что сырое формование не может заменить полностью сухое формование. Например, литье сплавов, увеличивающихся в объеме, при кристаллизации требует жесткости формы, которую не может обеспечить мокрая форма.

В технологии песчано-глинистых форм особое значение имеют три взаимосвязанных показателя формовочных смесей: прочность во влажном состоянии, газопроницаемость и влажность. Нельзя увеличить прочность формы за счет увеличения глиносодержания, так как при этом резко снизятся газопроницаемость и влажность формы, что приведет к образованию газовых раковин. Поэтому стремятся

к использованию высококачественных бентонитовых глин, обеспечивающих требуемую прочность при минимальном количестве глины.

Для сырых песчано-глинистых форм экономически наиболее эффективным связующим и термопротекторным материалом является бентонит.

Расход бентонита на изготовление 1 т отливок из чугуна в настоящее время составляет 60–90 кг, а стальных – 90–120 кг.

В СССР общий объем использования бентонита в 1960 г. составлял всего около 1000 т и он использовался главным образом для противопопригарных покрытий, но уже в 1982 г. его потребление в литейном производстве превысило 370 тыс. т.

При изготовлении отливок значительной высоты или сложной конфигурации, с выступающими частями, сырая форма не в состоянии противостоять давлению большой массы заливаемого металла. В этом случае применяют сухие песчано-глинистые формы. Необходимость сушки для повышения прочности формы приводит к снижению производительности литейного участка и удорожанию литья за счет этого.

Сухая формовка в сравнении с сырой обеспечивает гораздо более высокую прочность формы, но в то же время обладает рядом существенных недостатков (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Характеристики метода сухого изготовления песчано-глинистых форм

Достоинства	Недостатки
Более высокое содержание глины	Регенерация отработанной смеси требует больших затрат и дополнительного измельчающего оборудования в сравнении с мокрой формовкой
Глина вводится в смесь, как правило, в виде суспензии	Более длительный цикл производства из-за необходимости сушки
Используется более крупный песок	Сложность, а порой и невозможность механизации процесса
Противопригарные добавки не вводятся в смесь, а наносится противопригарная краска на подсушенную форму	Высокая трудоемкость уплотнения и изготовления формы
Обеспечивает гораздо более высокую прочность формы	Более низкая размерная точность из-за усадок формы при сушке

В странах СНГ для нужд литейного производства в настоящее время потребляется около 35 % всего используемого в них бентонита, тогда как в Европе этот показатель составляет более 50 %. Основная часть бентонита у нас находит применение в нефтегазодобывающей промышленности и черной металлургии (изготовление железорудных окатышей), что отражает сырьевую специализацию производства постсоветских стран.

Практика применения бентонита в виде суспензии, а не порошка, обусловлена тем, что в 50–60-х годах прошлого века в СССР не было организовано централизованного производства бентопорошка в достаточных количествах. В настоящее время в литейных цехах и при работе на бентоните нередко используются отработанные полвека тому назад технологические схемы.

Данные последних лет свидетельствуют о том, что в общем объеме выпуска литья промышленно развитых стран 65–70 % стальных и чугунных отливок мелкой и средней массы производится в формах из песчано-глинистых смесей и эта тенденция сохранится в будущем.

Большинство месторождений бентонитов СНГ являются кальциевыми и нуждаются в улучшении свойств путем активации содой. Благодаря этому увеличиваются прочностные свойства смеси, термостойкость бентонита и способность противостоять образованию усадок. Нередко соду вводят непосредственно в бегуны при приготовлении формовочной смеси на литейном производстве. Однако накапливаемое в смеси избыточное количество соды резко снижает термохимическую стойкость смеси и вызывает пригар на отливках. Во избежание этого добавки соды с целью активации кальциевого бентонита должны вводиться еще до производства глинопорошка в сырую бентонитовую глину при интенсивном перемешивании, что обеспечивает лучшее взаимодействие соды с бентонитом и минимальное ее содержание в свободном виде в бентопорошке.

Далее рассмотрим характеристики наиболее применимых бентонитовых глин разных месторождений (табл. 4) [4].

Таблица 4. Сравнительные характеристики бентонитовых глин различных месторождений

Месторождение	Содержание глинистых минералов, %		
	монтмориллонит	гидрослюда	каолинит
Бентониты			
Верхнее-Нурлатское (Россия)	60–70	5–15	5–10
Тарн-Варское (Россия)	60–70	5–15	5–10
Березовское (Россия)	60–70	5–15	5–10
Бикляное (Россия)	60–70	9–17	7–30
Месторождение о. Милос (Греция)	84–93	1–6	5–10
Даш-Салахлинское (Азербайджан)	80–90	5–10	6–12
Тихменевское (Россия)	75–90	1–8	5–10
«Поляна» Белгородской области (Россия)	75–85	1–6	5–8
Асканское (Грузия)	87–95	1–3	3–8
Бентонитоподобные глины			
Бехтеревское (Россия)	~50	~15	~11
Больше-Атынское (Россия)	<60	10–17	5–10
Юколинское (Россия)	<60	10–17	5–10
Апастовское (Россия)	<50	20–30	10–20
Тавлинское (Россия)	<50	20–30	10–20

Одними из высококачественных натриевых бентонитов являются месторождения о. Милос (Греция) и Даш-Салахлинское (Азербайджан).

Бентониты о. Милос используют для изготовления буровых растворов во всех видах бурения, а физико-механические свойства этого бентонита позволяют использовать его в формовочном деле и при производстве железорудных окатышей.

Высокое качество бентонита Даш-Салахлинского месторождения определяется содержанием щелочного монтмориллонита от 75 до 85 %. Бентониты Даш-Салахлинского месторождения с успехом могут использоваться как связующий компонент формовочных смесей при проведении практически всех видов буровых и подземных строительных работ и при производстве железорудных окатышей.

В 2011–2012 гг. в связи с необходимостью получения органоглин из натриевого бентонита отечественного месторождения для производства нанокомпозитов встала острая необходимость в поиске месторождений натриевого бентонита высокого качества. С этой целью исследователями ИГЕМ РАН под руководством В. В. Наседкина было детально изучено Тихменевское месторождение бентонита о. Сахалин.

По составу обменных катионов монтмориллонит относится к щелочному типу.

Показатель вязкости $\phi 600$ составляет от 35 до 60–80 сП, предел прочности при сжатии во влажном состоянии – не менее 1 кгс/см², а прочность на разрыв – более 30 г/см², что свидетельствует о высоком качестве бентонита для получения формовочных смесей.

Показатель вязкости $\phi 600$ в среднем составляет 12–25 сП, а местами достигает 40 сП, без дополнительной активации. После химической активации щелочных разновидностей бентонита показатель $\phi 600$ возрастает до 60 и более 100 сП. Проведенные исследования физико-механических свойств показали, что предел прочности при сжатии во влажном состоянии достигает 1,05 кгс/см², термоустойчивость – 80 ед. Такие показатели свидетельствуют о том, бентонит Тихменевского месторождения может являться сырьем высочайшего класса в формовочном производстве, а также применяться для производства высококачественных буровых глинопорошков; может быть высококачественным относительно крупнопористым адсорбционным сырьем, пригодным для очистки подсолнечного масла и продукции масложировой промышленности.

Применение бентонитовых глин для очистки отходящих газов от летучих органических соединений

Следует отметить, что, помимо решения задач, связанных с применением бентонитовых глин в производстве литейных форм, стержней, железорудных окатышей, существует сфера применения бентонитовых глин, непосредственно относящейся к машиностроению – очистки отходящих газов от летучих органических соединений.

Перспективным направлением в решении проблем очистки газовых выбросов, характеризующихся низкими концентрациями загрязняющих веществ органической природы и огромными объемами, является использование адсорбентов-катализаторов, которые на первой стадии процесса очистки поглощают примеси из очищаемого воздуха, а затем при повышении температуры слоя окисляют их до углекислого газа и воды. Традиционно используемые для очистки воздуха активные угли непригодны ввиду своей низкой термостойкости в окислительных средах. Наибольший интерес для этих целей представляют бентонитовые глины, которые являются активными катализаторами многих реакций, в частности с большим содержанием монтмориллонита, которые после модифицирования обладают цеолитоподобной структурой и способны выступать в качестве носителя каталитической фазы глубокого окисления углеводородов [5–7].

В качестве объектов исследований были выбраны смешанные адсорбенты-катализаторы, полученные на основе монтмориллонитовой глины Асканского месторождения слоисто-столбчатого строения, где для фиксации слоев использовали гетероядерные полигидрокомплексы хрома и меди со шпинельным соотношением компонентов и цеолит НЦВК с мольным отношением $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, равным 81,7.

Концентрация вводимого комплекса составляла 10 мг-экв (Cu-Cr) на грамм глины. Олигомерный комплекс Cu-Cr получали титрованием смеси хлоридов металлов раствором NaOH, взятых в соотношении $[\text{Cu-Cr}]:\text{OH}=2:1$ до $[\text{Cu-Cr}]:\text{OH}=1:2$; при этом значения pH комплекса находились в интервале 3,5–4,5. Соотношение $\text{Cr}_2\text{O}_3:\text{CuO}$ в полигидрокомплексе составляло 2:1 [8].

Смесь выдерживали в течение 2 ч, после чего модифицированный монтмориллонит, фиксированный гетероядерными гидрокомплексами Cr-Cu ($\text{Cr} \cdot \text{Cu-ФМ}$), отделяли от раствора центрифугированием, промывали дистиллированной водой. Полученную массу, тщательно перетирая, смешивали с цеолитом в пропорции 1:1.

После подсушивания сыпучую массу гранулировали при помощи таблетировочной машины, позволяющей получать цилиндрические гранулы размером $d=L=4$ мм, которые сушили на воздухе и подвергали термообработке при температуре 500 °С.

Удельную поверхность ($S_{\text{уд}}$) образцов определяли по низкотемпературной сорбции азота на экспресс-анализаторе «Micromeritics 2200». Значения первого базального отклонения (d_{001}) модифицированных глин определяли на дифрактометре «Simens 5000».

Для оценки адсорбционно-каталитических свойств полученных образцов использовали модельную воздушную смесь, состав которой аналогичен составу газовых выбросов лакокрасочного производства. Как видно из табл. 5, газовая смесь, приготовленная из реактивов марок «ХЧ» и «ЧДА», представлена соединениями, относящимися к различным классам органических веществ: предельные углеводороды, ароматические углеводороды, спирты.

Таблица 5. Состав модельной газовой смеси

Адсорбат	Исходная смесь, мг/м ³
Этилацетат	20,8
Ацетон	33
Толуол	101
Бутилацетат	36,4
Этанол	20,3
Бутанол	20,1
Сумма	231,6

Концентрации органических веществ определяли на газовом хроматографе «Цвет-100» с пламенно-ионизационным детектором на капиллярной колонке ($d=0,5$ мм, $l=60$ м), заполненной карбоваксом-20. В качестве газа-носителя использовали азот марки «ОСЧ». Содержание СО в отходящих газах определяли на газовом хроматографе НР-5710А с катарометром на колонке из фторопласта 4Д ($d=3,5$ мм, $l=2,5$ м), заполненной активированным углем АГ-3. В качестве газа-носителя использовали аргон. Интерпретацию полученных хроматограмм проводили с использованием программы «Мультихром 1.39».

Адсорбционно-каталитические свойства полученных образцов определяли в динамическом режиме на макетной установке, принципиальная схема которой показана на рис. 1. Атмосферный воздух, нагнетаемый вентилятором 1, поступает в устройство, регулирующее объемный расход газа, которое снабжено ресиверной емкостью для обеспечения равномерности газового потока 2, объемный расход которого

задается регулятором 3. Наличие трехходовых кранов 4 позволят проводить отбор проб газа для анализа. Попадая в емкость 5, содержащую модельную органическую смесь, воздух насыщается ее парами, содержание которых составляло до 230 мг/м^3 . Поглощение органических компонентов воздушной смеси происходит в реакторе 6 ($d=35 \text{ мм}$, $l=650 \text{ мм}$), заполненном цилиндрическими гранулами исследуемого адсорбента-катализатора. В эксперименте объем адсорбента-катализатора составлял 100 мл. В качестве реактора сравнения 7 использовали реактор, аналогичный реактору 6, снабженный встроенной термопарой 8 и управляющим потенциометром 9. Такая компоновка макетной установки позволяет установить температуру начала каталитического процесса окисления органики путем сравнения температуры реактора сравнения 7, в котором отсутствуют органические вещества, и реактора 6.

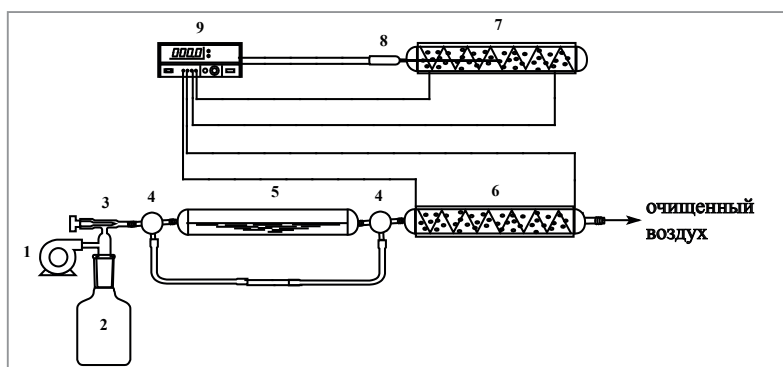


Рис. 1. Принципиальная схема макетной установки для изучения адсорбционно-каталитических свойств адсорбента:

1 – вентилятор; 2 – ресиверная емкость; 3 – регулятор расхода газа; 4 – трехходовые краны; 5 – емкость с модельной смесью; 6 – термокаталитический реактор; 7 – термокаталитический реактор сравнения; 8 – термопара; 9 – управляющий потенциометр

На рис. 2 представлена зависимость первого базального отражения (d_{001}) образцов фиксированного монтмориллонита от степени основности гидроксокомплексов хрома, которые были использованы при модифицировании. Как видно из приведенных данных, как для образцов Cr-ФМ, так и для Cr·Cu-ФМ с увеличением степени основности от 0 до 2,0 значение d_{001} растет от 1,61 до 1,85 нм для первых и от 1,76 до 1,98 нм для вторых соответственно, что обусловлено увеличением размеров гидроксокомплексов Cr и Cr·Cu. Последнее может быть связано как с увеличением степени гидролиза металлов, так и повышением доли полиядерных гидроксокомплексов хрома по мере роста степени основности, имеющих по сравнению с моноядерными большие размеры [8].

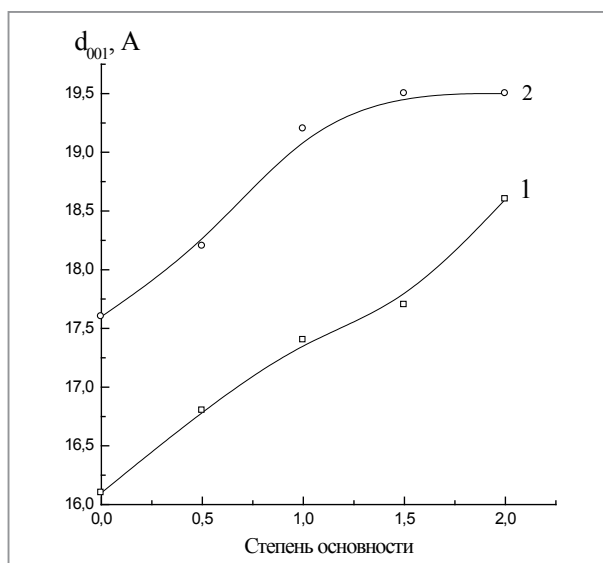


Рис. 2. Зависимость первого базального отражения d_{001} (нм) образцов монтмориллонита, фиксированного гидроксокомплексами Cr (1) и гетероядерными гидроксокомплексами Cr·Cu (2), от степени основности

Необходимо отметить, что на рентгенограммах модифицированных образцов как Cr-ФМ, так и Cr·Cu-ФМ пики d_{001} намного шире аналогичных пиков исходных образцов, что отражает неравномерное раздвижение алюмосиликатных слоев монтмориллонита гидроксокомплексами Cr и Cr·Cu.

Таблица 6. Значение pH растворов гидроксокомплексов Cr и Cr-Cu в зависимости от соотношения $\text{OH}^-/\text{Cr}^{3+}$ (степени основности)

Образец, pH	Степень основности				
	0	0,5	1,0	1,5	2,0
Cr	2,25	3,62	3,85	3,95	4,05
Cr-Cu	2,02	3,25	3,45	3,65	3,50

С другой стороны, данные о содержании ионов хрома в составе Cr-ФМ и Cr·Cu-ФМ, представленные в табл. 6, свидетельствуют об увеличении количества хрома от 0,78 до 2,05 ммоль/г для первого и от 0,89 до 2,06 ммоль/г для второго образцов соответственно по мере роста степени основности от 0 до 2. Следовательно, с увеличением степени основности возрастает не только размер, но и количество гидроксокомплексов Cr и Cr-Cu в составе модифицированного монтмориллонита.

В то же время, согласно данным табл. 5, содержание гидроксоионов хрома в образцах Cr-ФМ и Cr·Cu-ФМ при одинаковых значениях степени основности приблизительно равно, поэтому более высокие значения d_{001} образцов Cr·Cu-ФМ по сравнению с образцами Cr-ФМ не являются следствием большего количества гидроксокомплексов хрома, а, скорее всего, отражают различия в количестве атомов кислорода, OH-групп и молекул H_2O , входящих в состав интеркалированного полигидроксокомплекса Cr-Cu. В пользу высказанного предположения свидетельствуют результаты термогравиметрического анализа (рис. 3), согласно которым образец Cr·Cu-ФМ по сравнению с образцом Cr-ФМ имеет более высокие значения потери массы при нагревании его до 900 °C. Из рисунка видно, что зависимость относительной потери массы образцов от степени основности находится в хорошей корреляции с зависимостью значений d_{001} от этого параметра.

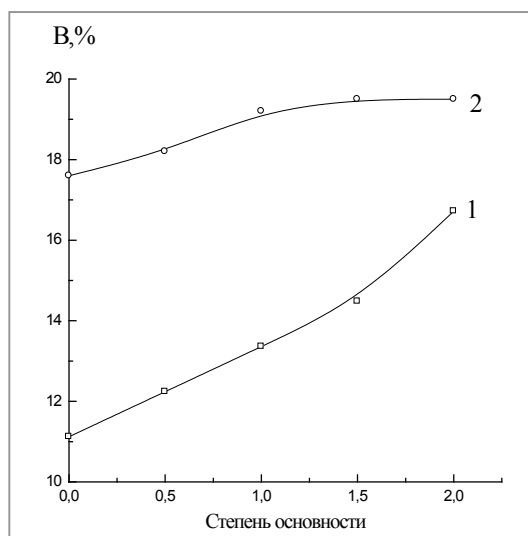


Рис. 3. Зависимость потери массы B (%) образцов Cr-ФМ (1) и Cr·Cu-ФМ (2) от степени основности растворов хрома, используемых для их модифицирования, при прокаливании на воздухе до температуры 900 °C

Удельная поверхность ($S_{\text{уд.}}$) полученных образцов при увеличении степени основности от 0 до 2,0 гидроксокомплексов хрома, прогретых при 120 °C, возрастает от 135 до 320 $\text{м}^2/\text{г}$ и для Cr-Cu – от 105 до 400 $\text{м}^2/\text{г}$ соответственно (рис. 4).

Как и следовало ожидать, поверхность после прокаливания при температурах 500 и 800 °C уменьшается, при этом характер зависимости $S_{\text{уд.}}$ от степени основности сохраняется. Так, после прокаливания при 500 °C при увеличении степени основности от 0 до 2 удельная поверхность изменяется от 50 до 80 $\text{м}^2/\text{г}$ для Cr-ФМ и от 70 до 110 $\text{м}^2/\text{г}$ для Cr·Cu-ФМ, при 800 °C – от 15–35 и 35–50 $\text{м}^2/\text{г}$ соответственно.

Наблюдаемое уменьшение удельной поверхности модифицированных адсорбентов при термической обработке является следствием сближения слоев алюмосиликатов вследствие дегидратации фиксирующих агентов. Тот факт, что это уменьшение носит более резкий характер, чем это установлено в более ранних работах по изучению слоисто-столбчатых материалов [5], связан, по-видимому, с неравномерностью раздвижения слоев алюмосиликатов, о чем упоминалось выше. Неравномерность привела к образованию смешанных слоистых структур, которые, по-видимому, обладают различной устойчивостью к термообработке.

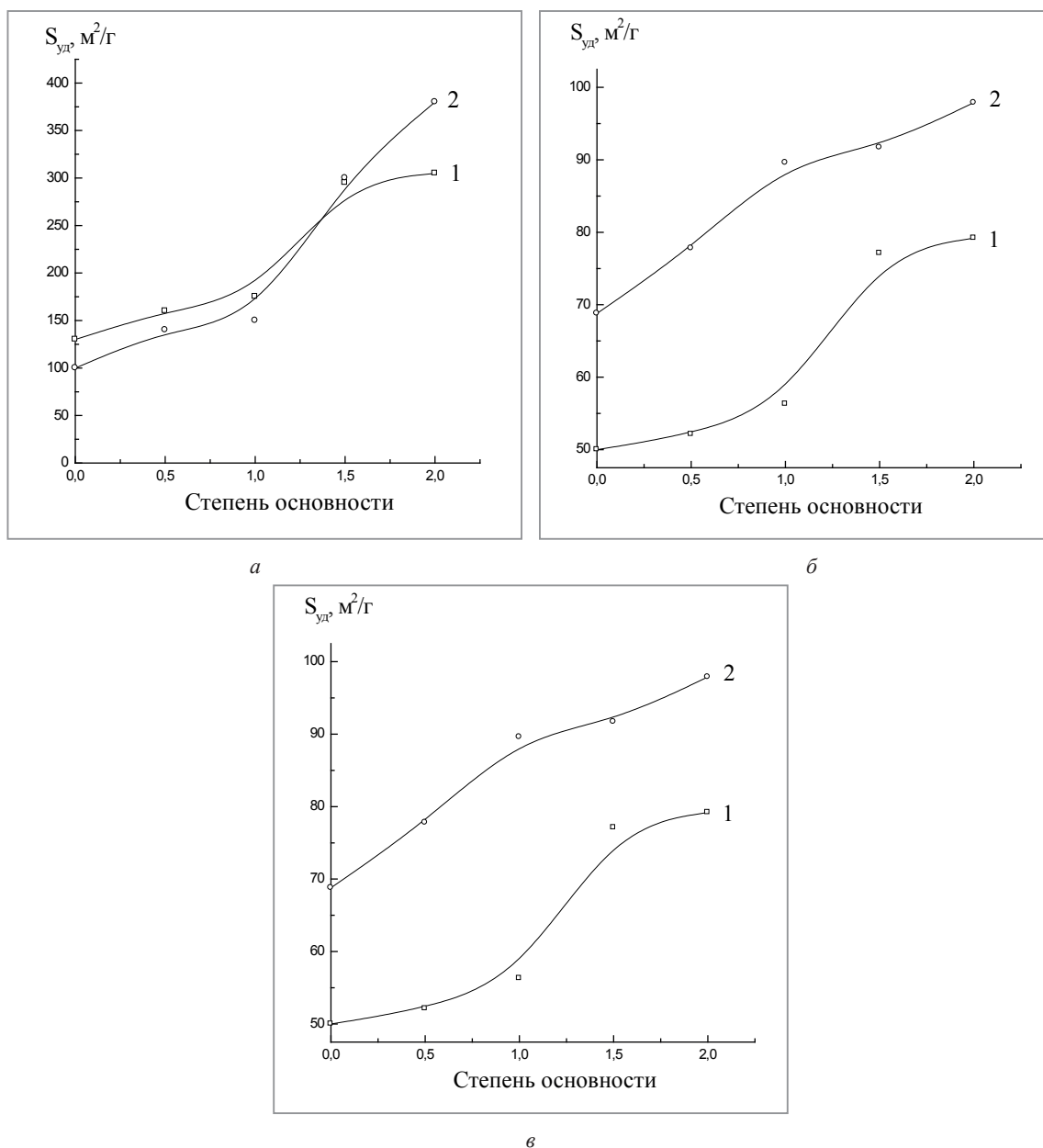


Рис. 4. Изменение удельной поверхности по азоту $S_{уд}$ (m^2/g) образцов Cr-ФМ (1) и Cr·Cu-ФМ (2) в зависимости от степени основности при температуре прокаливания 120 °C (а), 500 °C (б), 800 °C (в)

Поскольку указанные материалы предполагается использовать в составе адсорбентов-катализаторов, представлялось интересным рассмотреть их сорбционные свойства по отношению к ряду органических веществ. В табл. 7 приведены данные по сорбции ацетона, этанола, бензола, толуола и воды образцами Cr-ФМ и Cr·Cu-ФМ со степенью основности 2, имеющими наибольшие значения удельной поверхности и для сравнения – значения сорбционной способности высококремнеземного цеолита НЦВК.

Таблица 7. Сорбция органических веществ образцами монтмориллонита Cr-ФМ и Cr·Cu-ФМ в зависимости от температуры термообработки

Образец	Температура термообработки, °C	Сорбция органических веществ, ммоль/г					
		этилацетат	ацетон	этанол	бутанол	бутилацетат	толуол
Cr-ФМ	120	7,67	2,40	2,33	1,00	0,81	0,52
	500	4,80	1,93	1,66	1,30	1,01	1,06
Cr·Cu-ФМ	120	7,50	2,64	2,26	1,05	0,84	0,62
	500	4,62	2,10	1,67	1,20	0,9	1,09
Цеолит НЦВК	200	7,80	2,62	2,30	1,16	0,88	0,70

Как видно из таблицы, сорбционная способность образцов Cr-ФМ и Cr·Cu-ФМ по отношению к изученным сорбатам имеет близкие значения. Прокаливание при 500 °С приводит к значительному снижению сорбционной способности образцов по отношению к воде – с 7,67 до 4,8 ммоль/г для Cr-ФМ и с 7,50 до 4,62 ммоль/г для Cr·Cu-ФМ, что является следствием уменьшения объема микропор. В несколько меньшей степени термообработка уменьшает сорбцию ацетона (с 2,40 до 1,93 ммоль/г для Cr-ФМ и с 2,64 до 2,10 ммоль/г для Cr·Cu-ФМ) и этанола (с 2,33 до 1,66 ммоль/г для Cr-ФМ и с 2,26 до 1,67 ммоль/г для Cr·Cu-ФМ). Обращает на себя внимание повышение сорбционной способности прокаленных образцов по отношению к бутанолу (от 1,00 до 1,30 ммоль/г для Cr-ФМ и от 1,05 до 1,20 ммоль/г для Cr·Cu-ФМ), бутилацетату (от 0,81 до 1,01 ммоль/г для Cr-ФМ и от 0,84 до 0,90 ммоль/г для Cr·Cu-ФМ) и толуолу (от 0,52 до 1,06 ммоль/г для Cr-ФМ и от 0,62 до 1,09 ммоль/г для Cr·Cu-ФМ). Последнее, по-видимому, связано с увеличением при прокаливании средней ширины пор синтезированных столбчатых глин, что отмечалось ранее при фиксировании монтмориллонита гидроксокаатионами алюминия и, очевидно, является общей тенденцией для столбчатых глин [8]. Необходимо отметить, что значения сорбционной способности синтезированных образцов, прогретых при 200 °С, и цеолита HЦВК имеют близкие значения.

Степень конверсии определяли по формуле $S_{\text{conv}} = [(C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}})/C_{\text{вх}}] \cdot 100\%$, где $C_{\text{вх}}$ и $C_{\text{вых}}$ – соответственно входящая и выходящая концентрация органических веществ.

В табл. 8 приведены значения степени конверсии для изученных адсорбатов.

Т а б л и ц а 8. Значения степени конверсии

Адсорбат	Степень конверсии, %	Средняя степень конверсии, %
Этилацетат	95,8	96,2
Ацетон	97,7	
Толуол	96,4	
Бутилацетат	94,9	
Этанол	97,3	
Бутанол	95,1	

Из таблицы видно, что степень конверсии для изученных адсорбатов составляет 94,9–97,7 (средняя 96,2 %). Проведенные исследования показали, что материалы, полученные на основе монтмориллонита и гетероядерных гидроксокомплексов Cr·- Cu, обладают большей термостабильностью и лучшими сорбционными характеристиками по сравнению с монтмориллонитом, фиксированным моноядерными гидроксокомплексами Cr. Смешанные адсорбенты-катализаторы, полученные на основе монтмориллонитов со слоисто-столбчатой структурой, сшитые гетероядерными гидроксокомплексами Cr·- Cu, и цеолита HЦВМ представляют большой интерес для использования их в качестве рабочего тела при создании систем глубокой каталитической очистки отходящих газов от низкоконтентрированных паров органических веществ.

Данный материал изучен в процессах глубокого окисления паров низкоконтентрированных органических веществ, таких, как ацетон, толуол, этилацетат, этанол, бутанол и бутилацетат.

Установлено, что степень конверсии на смешанных адсорбентах-катализаторах для изученных адсорбатов составляет 94,9–97,7 (средняя 96,2 %).

Таким образом, можно констатировать, что эти материалы представляют большой интерес для использования их в качестве рабочего тела при создании систем глубокой каталитической очистки отходящих газов от низкоконтентрированных паров органических веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Грим, Р.Е.** Минералогия глин. М.: Изд-во иностранной литературы. 1956, 457 с.
2. **Комаров, В.С.** Адсорбционно-структурные, физико-химические и каталитические свойства глин Белоруссии / В.С. Комаров. Минск: Наука и техника, 1970. 317 с.
3. **Розенгарт, М.И.** Слоистые силикаты как катализаторы/ М.И. Розенгарт, Г.М. Вьюнова, Г.В. Исагулянц // Успехи химии. 1988. № 57. Вып. 2. С. 204–227.
4. **Белоусов, В.Е.** Сравнительная характеристика месторождений высококачественных бентонитов России и некоторых зарубежных стран/ В.Е. Белоусов // Вест. РУДН. Сер. Инженерные исследования. 2013. № 2. С. 55–61.
5. **Панасюгин, А.С.** Адсорбционно-структурные свойства монтмориллонита, интеркалированного гидроксокомплексами железа и редкоземельных металлов / А.С. Панасюгин, Г.В. Бондарева, Н.В. Китикова, О.В. Струкова // Коллоидный журнал. 2003. № 3. С. 520–523.

6. Алхазов Т.Г., Марголис Л.Я. Глубокое каталитическое окисление органических веществ. М.: Химия, 1985. 186 с.
7. Дубинин, Ю.В. Исследование катализаторов глубокого окисления СО и органических веществ для кипящего слоя/ Ю.В. Дубинин, Н.А. Языков, А.Д. Симонов и др. // Катализ в промышленности. 2013. № 4. С. 68–76.
8. Ратько, А.И. Окислительная активность адсорбентов-катализаторов на основе высококремнеземных цеолитов/ А.И. Ратько, А.С. Панасюгин, Г.В. Бондарева// ЖПХ. 2002. Т. 75. № 11. С. 1860–1863.

REFERENCES

1. Grim R.E. *Mineralogiya glin* [Mineralogy of clays]. Moscow Izdatel'stvo inostrannoj literatury Publ., 1956. 457 p.
2. Komarov V.S. *Adsorbcionno-strukturnye, fiziko-himicheskie i kataliticheskie svojstva glin Belorussii* [Adsorption-structural, physico-chemical and catalytic properties of clays of Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1970, 317 p.
3. Rozengar, G.M. V'yunova G.V., Isagulyanc M.I. Sloistye silikaty kak katalizatory [Layered silicates as catalysts]. *Uspekhi himii = Advances in chemistry*, 1988, no .57, vyp. 2, pp. 204–227.
4. Belousov, P.E. Sravnitel'naya harakteristika mestorozhdenij vysokokachestvennyh bentonitov rossii i nekotoryh zarubezhnyh stran [Comparative characteristics of high-quality bentonite deposits in Russia and some foreign countries]. *Vestnik RUDN, seriya Inzhenernye issledovaniya = RUDN Bulletin, Engineering research series*, 2013, no. 2, pp. 55–61.
5. Panasyugin A.S., Bondareva G.V., Kitikova N.V., Strukova O.V. Adsorbcionno-strukturnye svojstva montmorillonita, interkalirovannogo gidrokso-kompleksami zheleza i redkozemel'nyh metallov [Adsorption-Structural properties of montmorillonite intercalated with iron and rare-earth metal hydroxocomplexes]. *Kolloidnyj zhurnal = Colloid journal*, 2003, no 3, pp. 520–523.
6. Alhazov, T.G., margolis L.Ya. *Glubokoe kataliticheskoe okislenie organicheskikh veshchestv* [Deep catalytic oxidation of organic substances]. Moscow, Himiya Publ., 1985. 186 p.
7. Dubinin Yu.V., Yazykov N.A., Simonov A.D. i dr. Issledovanie katalizatorov glubokogo okisleniya CO i organicheskikh veshchestv dlya kipiyashchego sloya [Research of catalysts for deep oxidation of CO and organic substances for the boiling layer]. *Kataliz v promyshlennosti = Catalysis in industry*, 2013. no. 4, pp. 68–76.
8. Rat'ko A.I., Panasyugin A.S., Bondareva G.V. Okislitel'naya aktivnost' adsorbentov-katalizatorov na osnove vysokokremnezemnyh ceolitov [Oxidative activity of adsorbents-catalysts based on high-silica zeolites]. *Zhurnal prikladnoy khimii = Russian Journal of Applied Chemistry*, 2002, vol. 75, no. 11, pp. 1860–1863.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-90-93>
УДК 669.01

Поступила 12.11.2020
Received 12.11.2020

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДЫ ДЕФЕКТОВ НА НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕРМООБРАБОТАННЫХ БЕСШОВНЫХ ТРУБ

О. В. РОЖКОВА, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская область, Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: fht.czl@bmz.gomel.by; тел. +375 29 3058200

Соблюдение технологии закалки обеспечивает получение качественного изделия с требуемыми свойствами. Нарушение режимов нагрева под закалку и охлаждения при закалке приводит к образованию таких дефектов, как мягкие пятна и закалочные трещины. Наличие мягких пятен в металле недопустимо по причине структурных напряжений и разности механических свойств между основным металлом и дефектными участками. Для устранения мягких пятен требуется повторная термообработка. Закалочные трещины возникают по причине внутренних напряжений, превышающих сопротивление разрушению, вследствие неодновременности превращений и теплового расширения и сжатия. Изделия с закалочными трещинами являются окончательным браком.

Исследованы мягкие пятна и термические трещины на наружной поверхности бесшовных труб, образовавшиеся в процессе термической обработки. Представлены результаты металлографических исследований микроструктуры в зоне дефектов, определены и изучены генетические и морфологические признаки дефектов. Структурная неоднородность подтверждена замерами твердости по методу Роквелла. На основании полученных данных определены причины образования дефектов.

Ключевые слова. Бесшовная труба, металл, дефект, закалка, микроструктура, твердость, мягкие пятна, закалочная трещина, причины образования.

Для цитирования. Рожкова, О. В. Исследование природы дефектов на наружной поверхности термообработанных бесшовных труб / О. В. Рожкова // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 90–93. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-90-93>.

INVESTIGATION OF THE NATURE OF DEFECTS ON THE OUTER SURFACE OF HEAT-TREATED SEAMLESS PIPES

O. V. ROZHKOVA, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, Zhlobin City, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya Str. E-mail: fht.czl@bmz.gomel.by; tel. +375 29 3058200

Compliance with the quenching technology ensures a high-quality product with the required properties. Violation of the modes of heating for quenching and cooling during quenching leads to the formation of defects such as soft spots and quenching cracks. The presence of soft spots in the metal is unacceptable due to structural stresses and the difference in mechanical properties between the base metal and the defective areas. To remove soft spots, repeated heat treatment is required. Quenching cracks occur due to internal stresses that exceed the resistance to destruction, due to non-simultaneous transformations and thermal expansion and compression. Products with quenching cracks are the final rejects.

The article examines soft spots and thermal cracks on the outer surface of seamless pipes formed during heat treatment. The results of metallographic studies of the microstructure in the defect zone are presented, and the genetic and morphological features of defects are determined and studied. The structural heterogeneity was confirmed by Rockwell hardness measurements. Based on the data obtained, the causes of defects were determined.

Keywords. Seamless pipe, metal, defect, quenching, microstructure, hardness, soft spots, quenching crack, causes of formation.

For citation. Rozhkova O. V. Investigation of the nature of defects on the outer surface of heat-treated seamless pipes. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 90–93. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-90-93>.

Получение качественного изделия в процессе производства обусловлено различными факторами. Для своевременного устранения нарушений технологического процесса требуется оперативно определить причину образования дефектов.

Нарушение технологических режимов закалки приводит к образованию ряда дефектов. Мягкие пятна являются дефектом микроструктуры металла. Визуально дефект не виден и выявляется контролем твердости и микроструктуры металла после термообработки. Мягкие пятна представляют собой неоднородность мартенсита из-за наличия в нем структурных составляющих с более низкой

твердостью – зерен феррита, продуктов высокотемпературного распада аустенита, повышенного количества остаточного аустенита [1]. Мягкие пятна в металле готового изделия недопустимы из-за разности механических свойств между основным металлом и дефектными участками в микроструктуре, а также из-за структурных напряжений [1].

Возникновение в металле структурных напряжений в процессе закалки приводит к образованию дефекта «закалочная трещина». Зачастую трещины плохо видны из-за слоя окалины и малой ширины. Для выявления изделий с трещинами применяют ультразвуковой контроль.

В настоящей работе приведены результаты металлографического исследования дефектов на наружной поверхности термообработанных труб, определены и изучены генетические и морфологические признаки дефектов, классифицированы дефекты и определены причины образования.

Для труб ответственного назначения, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, при повышенных и пониженных температурах, в специальных агрессивных средах, как правило, после горячей прокатки проводят термообработку. После прохождения требуемых режимов нагрева и охлаждения трубы подвергаются визуальному, ультразвуковому контролю и др.

В процессе ультразвукового контроля термообработанных труб на наружной поверхности были выявлены дефекты.

При визуальном осмотре поверхности труб обнаружены узкие разрывы металла с извилистыми краями поперечного направления. Для проведения металлографических исследований отобраны три образца. Из двух образцов труб по месту расположения дефектов вырезаны образцы продольного сечения относительно оси трубы, у третьего образца в месте дефекта сошлифована наружная поверхность и подготовлены микрошлифы для исследования.

В результате исследования на всех образцах труб обнаружены извилистые полости, межкристаллитные, концы полостей тонкие, стенки полостей покрыты окалиной. Неметаллических включений в полостях и вдоль полостей дефектов не выявлено.

На одном из продольных микрошлифов обнаружен дефект, не вышедший на поверхность. Максимальная длина дефектов в исследуемых сечениях образцов труб составила 1,4 – 7,18 мм. Глубина залегания дефектов в исследуемых сечениях продольных образцов труб составила 1,64 мм.

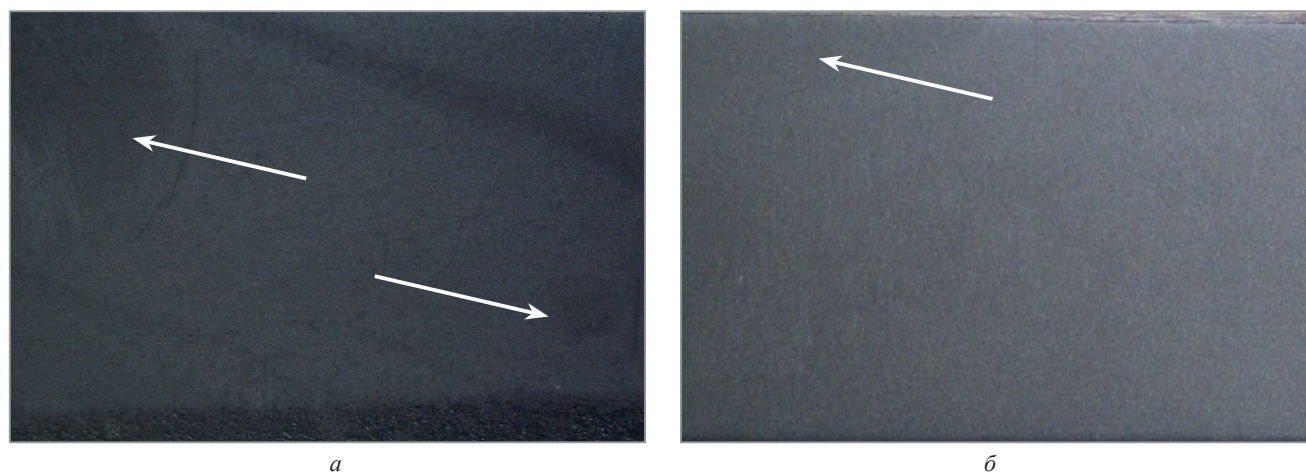


Рис. 1. Внешний вид микрошлифов труб после травления в реактиве «Nital 4%» (стрелкой показаны участки повышенной травимости): а – образец со сошлифованной поверхностью; б – образец продольного сечения

Анализ микроструктуры металла в области дефектов показал, что обезуглероживания участков с ликвацией легкоплавких компонентов, а также диффузионных оксидов в зонах расположения дефектов не выявлено.

Классификация дефектов проведена на основании внешних признаков и микроструктурных особенностей.

Характерными генетическими признаками для выявленных дефектов являются извилистое, межкристаллитное расположение полостей дефектов; отсутствие в районе дефектов неметаллических включений, участков с ликвацией легкоплавких компонентов, а также диффузионных оксидов.

По результатам исследования дефекты классифицированы как закалочные трещины.

Микроструктура в зоне дефектов показана на рис. 2, а, б, 3, а, б.

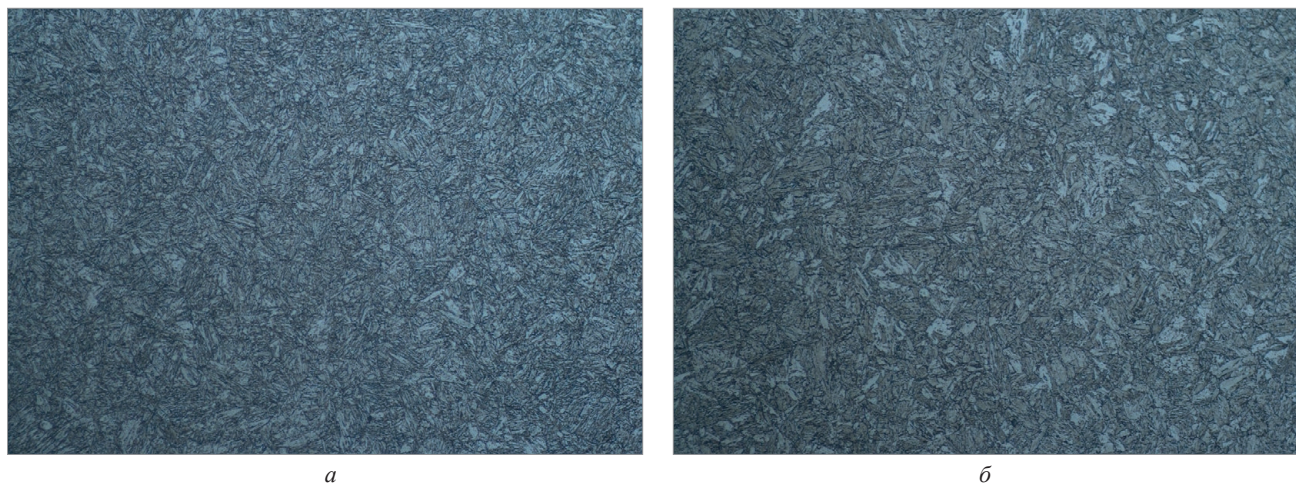


Рис. 2. Микроструктура образца трубы после травления в реактиве «Nital 4%». $\times 500$:
a – микроструктура основного металла; *б* – участок повышенной травимости

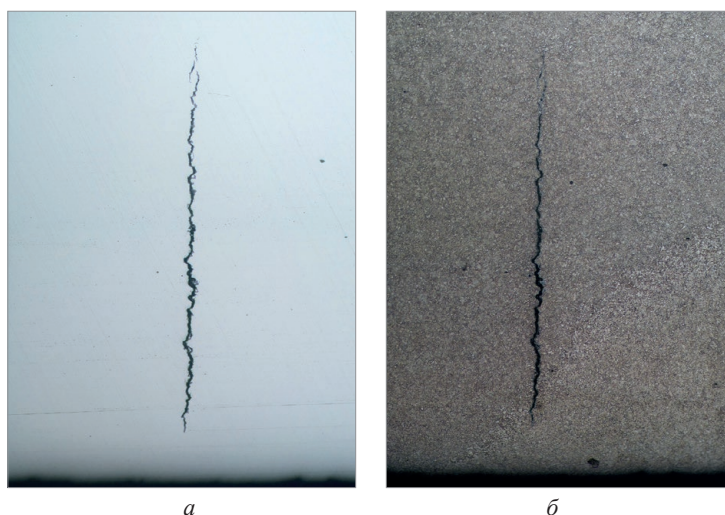


Рис. 3. Микроструктура образца трубы в зоне закалочной трещины. $\times 50$:
a – не травлено; *б* – после травления в реактиве «Nital 4%»

При визуальном осмотре образцов после травления в реактиве «Nital 4%» обнаружена явно выраженная микроструктурная неоднородность в виде участков повышенной травимости. Исследуемые трещины расположены вблизи участков повышенной травимости (см. рис. 1 *a, б*).

При исследовании микроструктуры выявлена неоднородность из-за наличия структурной составляющей с более низкой твердостью – феррит. Микроструктура основного металла представляет собой бейнит, участки со структурой, отличной от основного металла, имеют бейнито-ферритную структуру. Участки повышенной травимости классифицированы как мягкие пятна.

С целью определения природы образования участков повышенной травимости и закалочных трещин проведен замер твердости методом Роквелла. Измерены зона выявленных участков и зона основного металла. Результаты замеров приведены в таблице.

Твердость образцов труб по методу Роквелла

Номер образца	Место замера твердости	Среднее значение твердости HRC согласно ISO 6508-1
1	Структура основного металла	35,1
	Участки повышенной травимости	29,9
2	Структура основного металла	33,8
	Участки повышенной травимости	29,8
3	Структура основного металла	35,3
	Участки повышенной травимости	31,2

Из таблицы видно, что участки повышенной травимости, вблизи которых расположены закалочные трещины, имеют более низкие значения твердости, чем твердость основного металла трубы на 4–5 HRC.

Рассмотрим механизм развития закалочных трещин относительно участков повышенной травимости. Трещины располагаются в начале зоны бейнита, т.е. в зоне, где исчезают следы мягких пятен, и находятся в зоне с максимальным объемом, так как под влиянием различных температур нагрева по глубине изделия должна образоваться зона стали с максимальным объемом. При увеличении феррита в структуре удельный объем стали уменьшается, а под действием повышающегося содержания углерода – увеличивается.

В области максимального удельного объема возникают напряжения сжатия, а в областях с меньшим удельным объемом – напряжения растяжения. Следовательно, в направлении от трещины к мягким пятнам удельный объем стали уменьшается под влиянием увеличивающегося содержания феррита, а в направлении к основной структуре металла удельный объем стали уменьшается под влиянием снижающегося содержания углерода [2].

Выводы

В результате проведенной работы установлено, что признаков, характерных для дефектов сталеплавильного и трубопрокатного производства, в микроструктуре исследуемых микрошлифов труб в зоне дефектов не выявлено. Участки повышенной травимости, вблизи которых расположены закалочные трещины, имеют более низкие значения твердости, чем твердость основного металла трубы.

Дефекты образовались в процессе закалки из-за резкого перепада температур, вызвавшего неравномерность мартенситного превращения. Резкий перепад температур возник вследствие нарушения режимов термообработки (недостаточный прогрев или недостаточно интенсивное охлаждение).

ЛИТЕРАТУРА

1. Правосудович В. В., Сокуренок В. П., Данченко В. Н. и др. Дефекты стальных слитков и проката: спр. изд. М.: Интермет Инжиниринг, 2006. 384 с.
2. Малинкина Е. И. Образование трещин при термической обработке стальных изделий: изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1965.

REFERENCES

1. Pravosudovich V.V., Sokurenko V.P., Danchenko V.N. *Defekty stal'nyh slitkov i prokata* [Defects in steel ingots and rolled products]. Moscow, Intermet Inzhiniring Publ., 2006, 384 p.
2. Malinkina E.I. *Obrazovanie treshhin pri termicheskoy obrabotke stal'nyh izdelij* [Cracking during heat treatment of steel products]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-94-98>
УДК 541.183.: 66.096.5: 544.478

Поступила 11.11.2020
Received 11.11.2020

ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА ТОРСИОМЕТРЕ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШАГА СВИВКИ МЕТАЛЛОКОРДА

Н. А. АКУНЕЦ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: fmi.czl@bmz.gomel.by

Метизное производство постоянно улучшается: предъявляемые потребителями требования стимулируют внедрение новых технологических решений и оборудования. Для металлопродукции, выпускаемой метизными цехами (металлокорд, проволока для РВД, бортовая бронзированная проволока), важными являются механические свойства, которые определяют прочность, пластичность и другие характеристики материалов. Металлокорд имеет ряд физических и химических характеристик: диаметр металлокorda, шаг свивки, линейную плотность, отклонение от прямолинейности, остаточное кручение, раскручиваемость, характеристики латунного покрытия – химический состав, масса покрытия, толщина латуни, адгезию, механические свойства – разрывная нагрузка, удлинение при разрыве.

В статье приводится порядок измерения величины шага свивки на торсиометре установки фирмы Metro Com engineering s.p.a. (Италия) с применением модернизированного устройства с десятью импульсами (разрешающая способность счетчика витков равна 0,1 оборот вращающегося зажима). Проведены сравнительные испытания образцов металлокorda 2x0,30НТ, отобранных от одной катушки, с использованием устройства с разрешающей способностью счетчика витков 0,25 оборота и 0,1 оборот вращающегося зажима установки для определения шага свивки.

Ключевые слова. Установка для измерения величины шага свивки, вращающийся зажим, металлокорд, шаг свивки, разрешающая способность счетчика витков.

Для цитирования. Акунец, Н.А. Опыт проведения испытаний на торсиометре с целью определения шага свивки металлокorda / Н.А. Акунец // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 94–98. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-94-98>.

EXPERIENCE IN CONDUCTING TESTS ON A TORSIOMETER TO DETERMINE THE PITCH OF THE METAL CORD

N. A. Akunets, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, Zhlobin City, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya Str. E-mail: fmi.czl@bmz.gomel.by

Hardware production is in continuous improvement: the requirements imposed by consumers stimulate the introduction of new technological solutions and equipment. For metal products produced by hardware shops (metal cord, wire for RVD, side bronzed wire), mechanical properties are important, which determine the strength, ductility and other characteristics of materials. Metal cord has a number of physical and chemical characteristics: the diameter of the metal cord, lay pitch, linear density, deviation from straightness, residual torsion, untwistability, characteristics of the brass coating-chemical composition – coating weight, brass thickness, adhesion, mechanical properties-breaking load, elongation at break.

The article describes the procedure for measuring the size of the lay pitch on a torsionmeter installed by Metro Com engineering S. p. a., Italy using an upgraded device with ten pulses (resolution of the turn counter = 0.1 rotation of the rotating clamp). Comparative tests of 2x0. 30NT metal cord samples taken from a single coil were performed using a device with a resolution of 0.25 turns and 0.1 turns of the rotating clamp of the installation to determine the pitch of the coil.

Keywords. Installation for measuring the size of the lay pitch, rotating clamp, metal cord, lay pitch, resolution of the turn counter

For citation. Akunets N. A. Experience in conducting tests on a torsionmeter to determine the pitch of the metal cord. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 94–98. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-94-98>.

Определения

Диаметр металлокorda – это арифметическое среднее максимальных и минимальных значений, измеренных в миллиметрах через каждые 90° вокруг корда.

Шаг свивки определяется шагом и направлением скручивания. Длина шага свивки – это осевое расстояние вдоль корда, выраженное в миллиметрах и необходимое для совершения одного полного оборота на 360° вокруг корда.

Линейная плотность определяется как отношение массы на единицу длины (обычно в г/м) пряжи или корда.

Отклонение от прямолинейности – способность пряжи или корда находиться в горизонтальной плоскости между двумя прямыми, параллельными линиями, находящимися друг от друга на определенном расстоянии.

Остаточное кручение – это количество оборотов, сделанных пряжей или кордом заданной длины в положении, когда один конец зафиксирован в неподвижном состоянии, а другой свободно вращается.

Раскручиваемость определяется как расплетение элементов обрезанного конца пряжи или корда и выражается как распущенная длина в миллиметрах.

Характеристики латунного покрытия. Перед тем как приступить к окончательному волочению нити, стальная проволока для производства шинного корда подвергается электролитическому латунированию. Латунирование преследует две цели. Во-первых, латунное покрытие выполняет функцию под-смазочного слоя при мокром волочении. Во-вторых, латунь обеспечивает сцепление металлокорда с резиной. Медь в латунном покрытии при вулканизации реагирует с серой и другими компонентами резины и образует химическое соединение с прочной долговечной связью. Латунное покрытие характеризуется химическим составом, массой покрытия, толщиной латунного слоя и градиентом содержания меди по толщине покрытия.

Химический состав – это весовое процентное содержание меди и цинка в общем слое покрытия.

Масса покрытия определяется как количество материала, нанесенного на поверхность проволоки, выраженного в граммах покрытия на килограмм стальной проволоки.

Толщина латуни – это толщина латунного слоя, измеренная в микрометрах.

Адгезионные свойства оцениваются по усилию, которое необходимо для выдергивания проволоки или корда из вулканизированного резинового блока. Данное усилие измеряется в ньютонах. Кроме того, часто в качестве меры адгезии используется понятие «покрытие резиной», под которым понимается доля поверхности проволоки или корда, покрытого резиной после ее/его выдергивания из вулканизированного резинового блока.

Механические характеристики

Разрывная нагрузка – максимальная нагрузка (в ньютонах), которую выдерживает корд перед разрывом во время проведения испытания на разрыв.

Удлинение при разрыве – это относительное увеличение длины корда под действием разрывной нагрузки, выраженное в процентах.

Шаг свивки (t) – это осевое расстояние между витками одного из элементов (проволоки) металлокорда (рис. 1). Металлокорд должен иметь равномерный шаг свивки по всей длине.

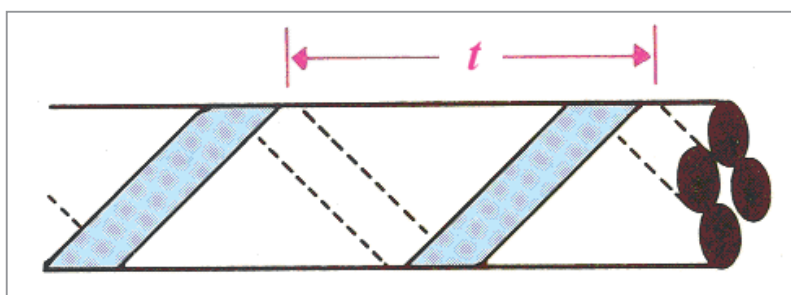


Рис. 1. Шаг свивки металлокорда

Шаг свивки соответствует обороту на 360° любого элемента в пряже или металлокорде. Для его определения образец корда или пряжи раскручивают в установке для определения шага свивки до тех пор, пока эти элементы не станут параллельными. Металлокорд 2х0,30 НТ крепится в установке для определения шага свивки под натяжением не более 20 Н таким образом, чтобы расстояние между зажимами составляло 500 ± 1 мм. Шаг свивки вычисляют по формуле: Шаг (мм) = мерная длина (500мм) / количество кручений.

В соответствии с требованиями действующих стандартов, а также методик измерений, по которым работают фирмы-потребители металлокорда, шаг свивки определяется торсиомером. В Центральной заводской лаборатории ОАО «БМЗ–управляющая компания холдинга «БМК» используется торсиомер фирмы Metro Com engineering s.p.a. (Италия) (рис. 2).

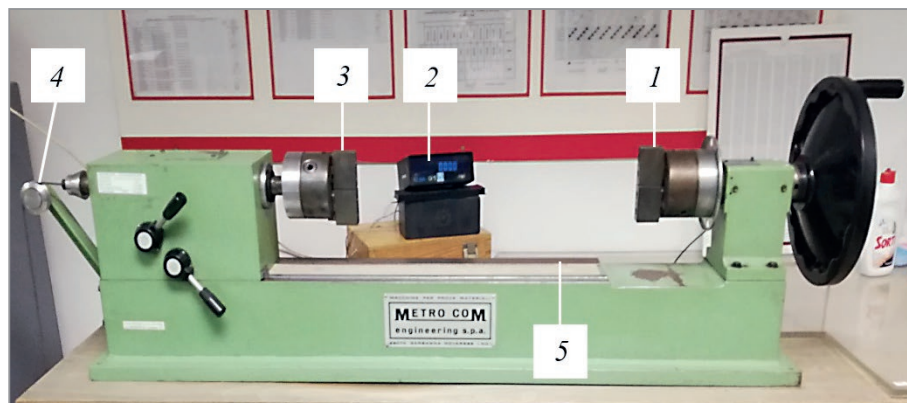


Рис. 2. Общий вид установки для определения шага свивки фирмы Metro Com, Италия:

1 – вращающийся зажим; 2 – счетчик оборотов; 3 – передвижной зажим; 4 – приспособление для придания натяжения; 5 – линейка

Ранее на установке для определения шага свивки разрешающая способность счетчика витков соответствовала 0,25 оборота вращающегося зажима торсиометра (рис. 3, а), но в соответствии с требованиями методики одного из потребителей металлокорда проведена модернизация установки для увеличения точности измерений: на подвижной зажим было установлено устройство, с помощью которого увеличилась разрешающая способность счетчика и стала равной 0,1 оборота подвижного захвата (рис. 3, б).



а



б

Рис. 3. Общий вид вращающегося захвата с разрешающей способностью счетчика витков 0,25 (а) и 0,1 (б) оборота вращающегося зажима установки для определения шага свивки

Для оценки точности измерений шага свивки металлокорда конструкции 2х0,30 НТ на установке с использованием устройства с разрешающей способностью счетчика витков 0,25 и 0,1 оборота вращающегося зажима установки для определения шага свивки проведены испытания образца на каждой из них четырьмя операторами по четыре раза на образцах, отобранных от одной и той же катушки. Результаты измерений параметра «шаг свивки» металлокорда конструкции 2х0,30 НТ приведены в табл. 1, 2 и на рис. 4, 5.

Таблица 1. Результаты испытаний металлокорда по параметру «шаг свивки», мм

Номер испытаний	Разрешающая способность устройства							
	0,25 оборота				0,1 оборота			
	оператор				оператор			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	13,50	13,70	13,60	13,70	13,55	13,62	13,55	13,51
2	13,60	13,60	13,60	13,80	13,59	13,56	13,55	13,62
3	13,60	13,60	13,70	13,70	13,55	13,66	13,59	13,55
4	13,70	13,70	13,80	13,60	13,56	13,59	13,62	13,66

Таблица 2. Показатели средних значений и среднеквадратичных отклонений (СКО) по результатам испытаний разными операторами на устройствах с различной разрешающей способностью

	Разрешающая способность устройства							
	0,25 оборота				0,1 оборота			
Номер оператора	1	2	3	4	1	2	3	4
Среднее значение	13,60	13,65	13,68	13,70	13,56	13,61	13,58	13,64
Среднеквадратичное отклонение	0,08	0,058	0,096	0,08	0,030	0,043	0,034	0,023

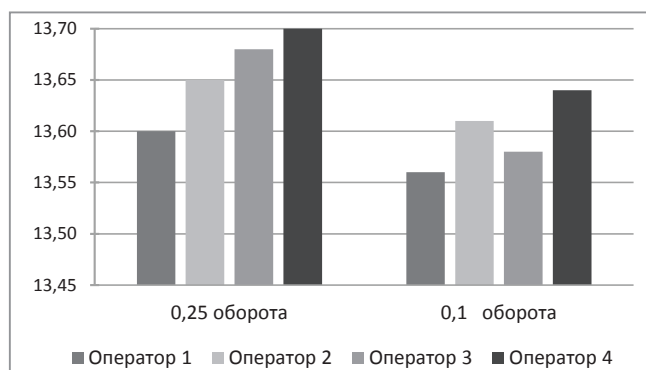


Рис. 4. Гистограмма средних значений измерений шага свивки металлокорда на 0,25 и 0,1 оборота

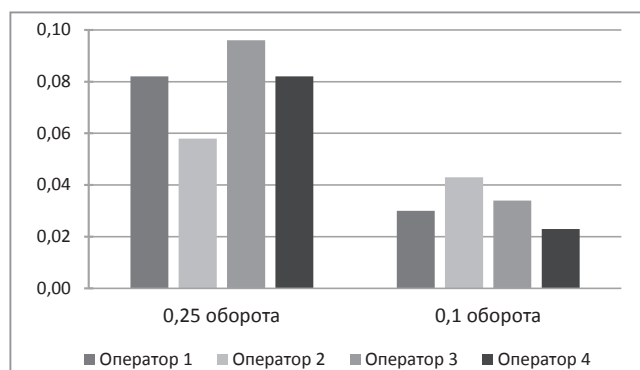


Рис. 5. Гистограмма среднеквадратичных отклонений (СКО) измерений шага свивки на 0,25 и 0,1 оборота

По результатам проведенных измерений построены диаграммы (рис. 6, 7).

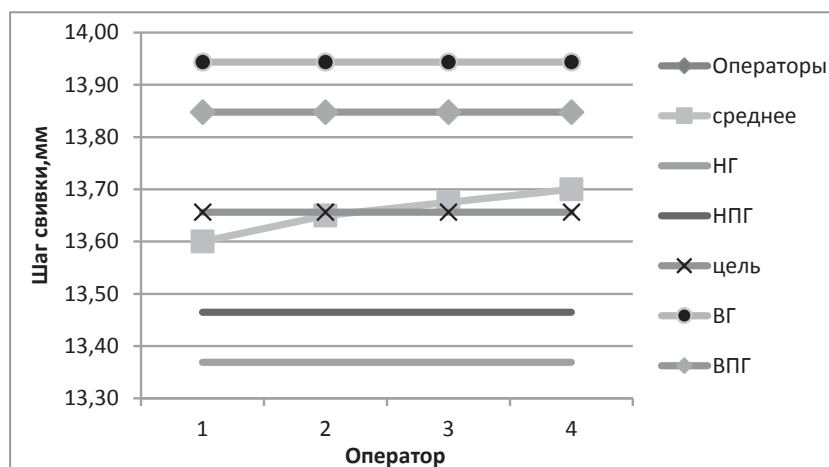


Рис. 6. Диаграмма при работе операторов на 0,25 оборота

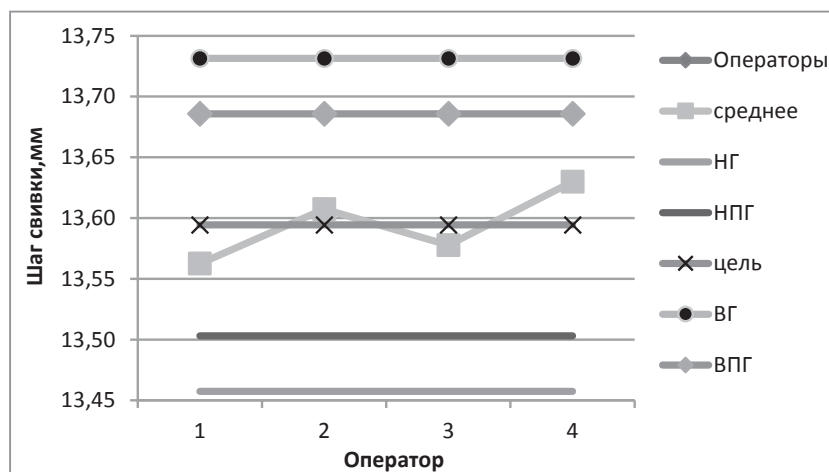


Рис. 7. Диаграмма при работе операторов на 0,1 оборота

Проанализировав полученные результаты измерений шага свивки металлокорда, сделаны следующие выводы:

- При испытании образцов металлокорда на устройстве с разрешающей способностью 0,25 оборота вращающегося зажима установки для определения шага свивки получены более высокое средне-квадратичное отклонение (СКО) результатов испытаний и высокое среднее значение по сравнению с результатами, полученными с использованием устройства с разрешающей способностью 0,1 оборота.
- По результатам проведенной работы в лабораториях физико-механических испытаний производства металлокорда ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» внедрено устройство с разрешающей способностью счетчика витков 0,1 оборот вращающегося зажима установки для определения шага свивки для измерения шага свивки всех конструкций металлокорда.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-99-105>
УДК 669.187.2

Поступила 11.11.2020
Received 11.11.2020

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ ПРИ ЭЛЕКТРОПЛАВКЕ МЕТАЛЛА

С. В. КОРНЕЕВ, И. А. ТРУСОВА, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: korneev@bntu.by

В работе рассмотрены пути оценки эффективности использования альтернативных источников теплоты при плавке сплавов в дуговых электропечах. Основное внимание уделено увеличению производительности печей и сокращению затрат на производство. Выполнен анализ использования различных систем интенсификации плавки в дуговых печах и их основные показатели. Осуществлена оценка эффективности использования топлива в электродуговых печах. Рассчитан ожидаемый экономический эффект от внедрения альтернативных источников энергии в электрических печах. Показано, что экономический эффект от внедрения на электродуговых печах альтернативных источников энергии существенно зависит от величины повышения производительности печи.

Ключевые слова. Дуговая сталеплавильная печь, газокислородные горелки, природный газ, инжекторы, тепловыделение, эффективность.

Для цитирования. Корнеев, С. В. Эффективность использования альтернативных источников теплоты при электроплавке металла / С. В. Корнеев, И. А. Трусова // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 99–105. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-99-105>.

EFFICIENCY OF USING ALTERNATIVE SOURCES OF HEAT IN ELECTRIC MELTING OF METAL

S. V. KORNEEV, I. A. TRUSOVA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: korneev@bntu.by

The paper considers ways to assess the efficiency of using alternative sources of heat when melting alloys in electric arc furnaces. The focus is on increasing furnace productivity and reducing production costs. The analysis of the use of various systems for intensifying melting in arc furnaces and their main indicators is carried out. An assessment of the efficiency of fuel use in electric arc furnaces has been carried out. The expected economic effect from the introduction of alternative energy sources in electric furnaces has been calculated. It is shown that the economic effect from the introduction of alternative energy sources on electric arc furnaces depends significantly on the increase in furnace productivity.

Keywords. Electric arc furnace, oxy-fuel burners, natural gas, injectors, heat generation, efficiency.

For citation. Korneev S. V., Trusova I. A. Efficiency of using alternative sources of heat in electric melting of metal. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 99–105. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-99-105>.

Введение

Повышение технико-экономических показателей электрических печей имеет тенденцию увеличения их мощности, так как в подавляющем большинстве случаев это приводит и к сокращению удельных энергетических затрат. Однако на современном этапе развития технологий электроплавки и конструкций электропечей возникают ограничения по дальнейшему увеличению мощности трансформаторов. Анализ удельных показателей мощности печей для плавки чугуна и стали показывает, что для современных сверхмощных электродуговых печей удельная мощность трансформаторов достигла 1100 кВ·А/т. Кроме того, доля электрической энергии в электродуговых печах, функционирующих на металлургических предприятиях, в настоящее время составляет 55–65 %, т. е. остальная энергия вносится посредством сжигания топлива и за счет экзотермических реакций в ванне расплава. Для индукционных тигельных печей удельная активная мощность достигла 1000 кВт/т, т. е. анализ характеристик печей показал, что за последние 60 лет удельная мощность источников энергии увеличилась более чем в 2 раза.

Исследование максимальной скорости нагрева и плавления материалов в печах различных типов показало следующее:

- при электродуговом нагреве наблюдается высокая скорость нагрева поверхности вплоть до температур плавления, однако, как для завалки, так и для жидкого металла важен объемный теплоперенос за счет конвективной составляющей, в противном случае может наблюдаться интенсивный угар и испарение металла;
- большую скорость нагрева можно получить при индукционном нагреве, ограничением мощности в данном варианте могут являться только ограничение мощности источника питания, высота мениска в индукционных тигельных печах, выдавливание металла из канала в индукционных канальных печах и более интенсивный износ тигля при циркуляции металла;
- для индукционных печей скорость нагрева зависит от правильного подбора размерных параметров печи и ее частоты в зависимости от вида применяемой металлошихты;
- при нагреве и плавлении металла в печах сопротивления скорость нагрева зависит от мощности тепловыделения нагревателей и их температуры, а так как нагрев является косвенным, то и от параметров теплообмена, при этом существенным ограничением является максимальная температура материала нагревателей и срок их службы;
- ограничением скорости нагрева в топливных печах является мощность источника теплоты (расход топлива), а также конечная температура нагрева, так как нагрев с использованием топлива имеет низкий КПД в области высоких температур;
- при высокотемпературном нагреве ограничением скорости нагрева является также калориметрическая и адиабатическая температура горения топлива.

Таким образом, при сопоставимой мощности газовый нагрев обеспечивает быстрый подъем температуры металла, но по мере увеличения температуры металла растет температура уходящих продуктов сгорания, что снижает мощность, передаваемую металлу, при этом скорость и экономичность нагрева падают.

Электродуговые печи конструктивно наиболее приспособлены для эффективного использования альтернативных электроэнергии источников. В высокомоощных электродуговых печах системы интенсификации плавки посредством сжигания природного газа и инъекции твердого и жидкого топлива получили распространение уже достаточно давно, на печах малой емкости только внедряются в последнее время.

Другие типы электропечей конструктивно менее подходят для непосредственной установки систем интенсификации плавки, однако данный подход также используется, но различные источники теплоты при этом используются в разных агрегатах. Примером могут служить так называемые дуплекс-процессы или использование внешнего предварительного подогрева металлошихты в установках подогрева.

Анализ данных опытной эксплуатации систем интенсификации плавки

Рассмотрим примеры использования различных систем интенсификации плавки и их основные показатели по данным работ [1–3, 6, 7], результаты которых приведены в таблице. Система PYREJET™, впервые внедренная фирмой «American Combustion (ACI)» в середине 80-х годов, состоит из нескольких настенных инжекторов, может сочетать несколько multifunctionальных инжекторов PYREJET™ и кислородно-топливных горелок PyroX. PYREJET™ также оснащен сменной трубой для впрыска углерода, расположенной вблизи осевой линии горелки. В другом варианте (для печи емкостью 150 т жидкой стали, работающей с долей металлizedованного сырья более 50 %) при установке системы PyreJet получены результаты, приведенные в [2].

Результаты эксплуатации систем интенсификации электроплавки на различных предприятиях

Параметр (изменение)	Установленная система, значения параметров согласно литературному источнику					
	PYREJET™, [2]	PYREJET™, [1]	PYREJET + AlarcPC™, [3]	JetBOx, [6]	JetBOx, [6]	CoJet [7]
Потребление электроэнергии, кВт·ч/т	–57 (–9,3 %)	–22 (–5,3 %)	–35	–27	–12	–45
Потребление природного газа, м³/т	+2,7	+1,5	+2	+2,5	+0,4	+10 (КОКСОВЫЙ)
Потребление кислорода, м³/т	+13 (+92,9 %)	+4 (+11,5 %)	+10	–7,6	+3,3	+10
Потребление углерода, кг/т		+3 (+23 %)	+2	–5	+0,3	–0,3
Время плавки, мин		–3 (–5 %)	–6	–1,4		–4,2
Время под током, мин	–8 (–8,3 %)		–4	–1,5	–0,3	
Выход годного металла, %		0		+1,5		0
Расход электродов, кг/т	–0,1 (–4,2 %)		–0,2	–0,12		

Также приведены результаты внедрения системы PYREJET+AlarcPCTM при выплавке углеродистых сталей на предприятии Vallourec (Франция) [3]. Для эффективного использования энергии дожигания инжекторы PC должны устанавливаться вблизи источников генерации CO.

Компания BSE предложила решение по системе интенсификации VLB и CarbJet, в котором VLB размещаются в боковой стенке в водоохлаждаемых коробках без выступания внутрь печи. В настоящее время в мире работает более 190 фурм-манипуляторов BSE, дополнительно установлено около 20 LM2s (фурма-манипулятор с автоматическим замером температуры). С 1999 г. установлено более 40 систем VLB. Были достигнуты следующие показатели: среднее снижение потребления электроэнергии – 40 кВт·ч/т, уменьшение времени под током – 5,2 мин. Например, 90-тонная печь работала с системой предварительного подогрева лома и была оснащена пятью горелками и фурмой-манипулятором BSE. Для повышения энергоэффективности в стеновых панелях были установлены четыре системы VLB для работы в сочетании с фурмой-манипулятором. Время под током и потребление электроэнергии были снижены соответственно на 3 мин (9%) и 37 кВт·ч/т (10%) с увеличением расхода кислорода на 2,4 м³/т и снижением расхода газа на 0,3 м³/т. Таким образом, новая технология инъекции работает более эффективно, чем предыдущая (например, результаты приведены в [4]).

В 1995 г. фирмой «Siemens VAI» разработаны и предложены к внедрению технология и оборудование SIMETAL RCB (Refining Combined Burner – технология вдувания кислорода, газа и углерода). Следует отметить, что к настоящему времени эта технология внедрена более чем на 100 дуговых сталеплавильных печах. При этом экономия электроэнергии может составлять до 15%, а экономия потребления кислорода – до 10% по сравнению с другими кислородными фурмами, уменьшение времени плавки – до 10%, повышение производительности – до 6%. При производстве коррозионностойких сталей до и после установки системы получены следующие показатели: сокращение потребления электроэнергии составило 55 кВт·ч/т, сокращение потребления кислорода – 3,8 м³/т [5].

Фирмой «Process Technology International (PTI)» разработана система JetBOx. К настоящему времени более 20 электродуговых печей (EAF) по всему миру оснащены этими системами. В качестве примера в таблице приведены результаты использования этой технологии при различных условиях.

Не менее известной является технология CoJet®, установленная более чем на 70 дуговых печах емкостью от 30 до 200 т (постоянного и переменного тока, Consteel® и шахтных печах). Особенностью CoJet® является длинный участок струи газа, двигающегося со сверхзвуковой скоростью. Результаты работы за первые шесть месяцев после установки системы CoJet на 100-тонной печи постоянного тока [7] приведены в таблице.

Десятки печей, работающих в разных странах, оснащены инъекционной системой КТ компании «Techint (Tenova Melt Shops)». Система KT Injection System® (КТ) представляет собой настенную многоточечную систему для вдувания кислорода и широкого спектра материалов: углерода, извести, DRI и других материалов. На основании опыта компании «Techint» по внедрению системы КТ были сделаны следующие выводы: расход электроэнергии снижается примерно на 75 кВт·ч/т, удельная производительность увеличивается на 0,25 т/ч/МВт [8].

Следует также отметить технологию фирмы «Stein Injection Technology», которая была внедрена на 150-тонной ДСП с получением следующих результатов: сокращение потребления электроэнергии – 108 кВт·ч/т; суммарный расход природного газа – 6,2 м³/т; суммарный расход кислорода – 37,5 м³/т; суммарный расход углерода – 7,2 кг/т; увеличение производительности – 34% [9].

В 2007 г. на Белорусском металлургическом заводе была произведена реконструкция каркаса печи ДСП-2 с установкой новой системы интенсификации. В настоящее время на БМЗ функционируют две 100-тонные печи ДСП-2 и ДСП-3, которые оснащены аналогичной системой интенсификации фирмы MORE, а одна печь ДСП-1 – системой интенсификации на основе оборудования «PyreJet» и «Alarc-PC» фирмы AmericanCombustion (ACI). Например, на ДСП-2 после проведения модернизации за счет увеличения расхода кислорода (в среднем на 7,6 м³/т), при использовании инъекции угольной пыли типа В (до модернизации не использовалось), а также новых горелок с большей мощностью удалось добиться снижения потребления природного газа на 0,86 м³/т, а также уменьшения расхода электроэнергии примерно на 32 кВт·ч/т.

После модернизации ДСП-1 расход природного газа увеличился в среднем на 3,1 м³/т, кислорода – на 17,43 м³/т. Это в комплексе позволило достигнуть экономии электроэнергии около 34,7 кВт·ч/т.

Оценка эффективности использования топлива в электродуговых печах

Средний приход энергии, по рекомендациям работы [10], при использовании продувки составляет 3,8 кВт·ч/м³ кислорода, газокислородных горелок – 6,5 кВт·ч/м³, фурм для дожигания СО – 3,3 кВт·ч/м³.

Кремний обладает наиболее высокой удельной энергией (11,2 кВт·ч/м³O₂), энергия окисления углерода до СО минимальна и составляет 2,73 кВт·ч/м³ O₂. Диапазон энергии варьируется от 3,2 до 6,8 кВт·ч/м³O₂ [11].

Усредненный коэффициент использования топлива и энергии окислительных реакций можно определить следующим образом:

1. Определяем разность удельного расхода электрической энергии $\Delta W_{эл}$ (кВтч/т), природного газа (м³/т) и кислорода (м³/т) в базовом и проектном варианте.

2. Определяем удельное энерговыделение при использовании природного газа и кислорода $W_{экз} = W_{CH_4} + W_{O_2}$:

$$W_{CH_4} = q_{CH_4} \cdot n_{CH_4},$$

где q_{CH_4} – удельный расход природного газа, м³/т;

n_{CH_4} – тепловой эффект горения природного газа, кВт·ч/м³;

$$W_{O_2} = q_{O_2} \cdot n_{O_2},$$

где q_{O_2} – удельный расход кислорода, м³/т;

n_{O_2} – тепловой эффект при использовании кислорода, кВт·ч/м³;

3. Из уравнения $\Delta W_{эл} = W_{э1} - W_{э2} = \eta(W_{экз2} - W_{экз1})$ находим η :

$$\eta = \frac{\Delta W_{эл}}{(W_{CH_4} + W_{O_2})}.$$

Используя приведенный алгоритм, определяем усредненный коэффициент эффективности для системы интенсификации плавки на примере ДСП-2 ОАО «БМЗ».

Учитывая рекомендации, описанные выше, получаем:

$$\Delta W_{эл} = W_{э1} - W_{э2} = \eta(W_{экз2} - W_{экз1}) = (440,5 - 408,6) = \eta((4,92 \cdot 9 + 35,8 \cdot 6,8) - (5,78 \cdot 9 + 28,2 \cdot 6,8)), \eta = 0,73.$$

Экономический эффект от внедрения альтернативных источников энергии в электрических печах

Экономический эффект от применения топливных горелок в электродуговых печах можно упрощенно определить, используя выражение

$$\Xi = \Delta Z_3 - Z_T - Z_0 - Z_{a.o.} + \Delta Z_{в.м.} + \Delta П,$$

где Ξ – годовой экономический эффект, у.е.; ΔZ_3 – экономия затрат на электрическую энергию при использовании топливных горелок, у.е.; Z_T – затраты на топливо, у.е.; Z_0 – затраты на производство и доставку окислителя топлива, у.е.; $Z_{a.o.}$ – затраты на амортизацию оборудования системы интенсификации, у.е.; $\Delta Z_{в.м.}$ – экономия вспомогательных материалов, у.е.; $\Delta П$ – дополнительная прибыль, полученная в результате увеличения производительности агрегата, а также увеличения выхода годного металла, у.е.

Далее будем использовать удельные величины, отнесенные к 1 т жидкой стали:

$$\Xi = \Delta W_{эл} \cdot C_{эл} - G_{газ} \cdot C_{газ} - G_{ок} \cdot C_{ок} - \frac{\%A \cdot C_o \cdot 1,1}{100M} + \Sigma(m_{mi} \cdot C_{mi}) + \frac{\Delta П}{M},$$

где $G_{газ}$ – удельный расход природного газа, м³/т; $C_{эл}$ – стоимость электрической энергии, у.е./(кВт·ч); $C_{газ}$ – стоимость природного газа, у.е./м³; $G_{ок}$ – удельный расход окислителя, м³/т; $C_{ок}$ – стоимость окислителя, у.е./м³; $\%A$ – процент амортизации газового оборудования; C_o – стоимость установленной системы интенсификации, у.е.; 1,1 – коэффициент, учитывающий затраты на обслуживание газового оборудования; M – годовой выпуск жидкой стали, т; m_{mi} – масса сэкономленного i -го материала, кг/т; C_{mi} – стоимость i -го материала, у.е./кг.

При наличии данных об эксплуатации действующих систем экономия электрической энергии и расход топлива можно подставить в формулу в готовом виде. Для оценочных расчетов можно использовать усредненные данные по аналогичным системам с учетом коэффициентов использования топлива.

Коэффициент полезного использования углеродистого топлива:

$$\eta_{\text{угл}} = \left(1 - \frac{(V_{\text{п.с}} c_{\text{п.с}} t_{\text{п.с}} + q_{\text{хим}})}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} \right),$$

где $V_{\text{п.с}}$ – объем продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $c_{\text{п.с}}$ – теплоемкость продуктов сгорания, $\text{МДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; $t_{\text{п.с}}$ – температура уходящих из печи продуктов сгорания, $^{\circ}\text{C}$; $q_{\text{хим}}$ – недожог топлива, $\text{МДж}/\text{м}^3$.

Коэффициент полезного использования газообразного топлива рассчитывается аналогичным образом.

Для определения условий экономической эффективности работы системы интенсификации плавки найдем основные составляющие приведенного выше выражения.

Прирост прибыли в результате повышения производительности составляет:

$$\Delta\P = \bar{\Pi} \cdot \Delta P - \bar{\Pi}.$$

Среднюю прибыль можно вычислить по данным средней стоимости металла и уровня рентабельности.

Рассмотрим следующий пример. При самом простом варианте стоимости металла 350 \$/т при уровне рентабельности продукции 10% получим среднюю прибыль $\Delta\P = 350 \cdot 0,1 = 35$ \$/т. Тогда при неизменной себестоимости при повышении производительности, например на 5%, будет получена дополнительная прибыль за счет продажи дополнительной продукции в сумме $\Delta\P = 35 \cdot 1,05 - 35 = 1,75$ \$/т.

Стоимость системы интенсификации плавки с использованием альтернативных источников может различаться в зависимости от состава оборудования и качества его изготовления при одинаковых расходах подаваемого топлива. Для дальнейших расчетов принимаем удельную стоимость системы подачи и сжигания газа, равной 5 \$/т, что при сроке амортизации оборудования в 10 лет и учете затрат на обслуживание дает затраты на амортизацию оборудования в объеме 0,55 \$/т.

Так как при работе средств интенсификации используются природный газ и антрацит, цены на которые изменяются независимо от изменения цен на электрическую энергию, то результаты расчетов, полученные для одного года эксплуатации, нельзя полностью транслировать на другие годы. Цена электрической энергии, так же как и цены на другие энергоносители и металл, может как увеличиваться, так и уменьшаться в долларовом эквиваленте. Для дальнейших оценок приняты: средневзвешенная цена электрической энергии – 0,098 \$/кВт·ч; цена природного газа – 0,284 \$/м³ или 0,03 \$/кВт·ч (при теплоте сгорания природного газа 34 МДж/м³ или 9,44 кВт·ч/м³); цена кислорода – 0,09 \$/м³.

С учетом того, что при сжигании природного газа на 1 м³ газа необходимо 2 м³ кислорода, итоговая цена газа с кислородом для его сжигания составит:

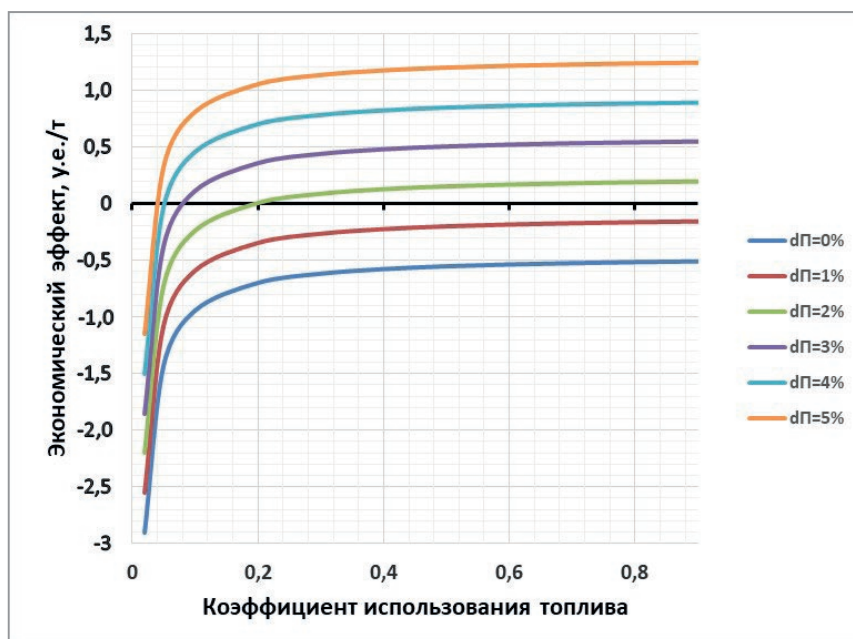
$$C_{\text{г}} = 0,464/9,44 = 0,049 \text{ $/кВт} \cdot \text{ч}.$$

При использовании приведенных выше данных определена зависимость экономического эффекта (\$/т) от коэффициента использования топлива при сжигании природного газа в электродуговой печи при различных вариантах увеличения производительности.

В подавляющем большинстве случаев при расплавлении заковки, когда температура металла близка к температуре ликвидуса и коэффициент использования топлива падает ниже 0,3, горелки природного газа отключают, так как их работа в этом режиме малоэффективна из-за плохой теплопередачи энергии металлу и высокой температуры уходящих газов.

Из рисунка следует, что экономический эффект от внедрения на электродуговых печах альтернативных источников энергии существенно зависит от величины повышения производительности печи. При высокой стоимости системы и работе печи с перерывами между плавками экономический эффект отрицательный, т.е. более дешевое топливо в виде природного газа не перекрывает затраты на амортизацию дополнительного газового оборудования. При представленных выше ценах экономический эффект имеет положительное значение без учета повышения производительности только при стоимости системы интенсификации менее 0,25 \$/т, что для печи производящей, например, 600 тыс. т в год составляет 150 тыс. \$.

Аналогичная картина наблюдается и при использовании углеродистого топлива. При расчетах принято, что стоимость кокса составляет 0,265 \$/кг или 0,033 \$/кВт·ч (при теплоте сгорания кокса 29 МДж/кг или 8,05 кВт·ч/кг). Использование более дешевого топлива на основе инжектируемой угольной пыли предпочтительнее при внедрении, но имеет менее оптимальные экологические показатели и более



Экономический эффект использования природного газа в электродуговой печи в зависимости от коэффициента использования топлива и повышения производительности

высокие требования к коэффициенту использования, так как сложнее обеспечить отсутствие недожога без дополнительных кислородных инжекторов, дожигающих СО в рабочем пространстве.

Внедрение альтернативных источников в электродуговых печах литейного класса осложняется отсутствием на предприятиях собственного дешевого технического кислорода, а в условиях Республики Беларусь еще и тем обстоятельством, что установленное плавильное оборудование имеет значительный запас по производительности, а, следовательно, задача повышения производительности может возникать только при выводе из эксплуатации физически и морально устаревших плавильных печей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Thebault, J.M.** A multi-function system for EAF steelmaking: industrial result at LME (France) / J. M. Thebault // 7th European Steel Making Conference, 26–29 May. Venice, Italy. 2002.
2. **Грант, М.** Адаптация работы электродуговой печи к нетрадиционным сырьевым материалам / М. Грант [и др.] // *Металлург*. 2014. № 2. С. 48–56.
3. **Cantacuzene, S.** Advanced EAF oxygen usage at Vallourec–mannesmann Saint saulve steelworks / S. Cantacuzene [et al] // *Ironmaking & Steelmaking*. 2005. Vol.32. № 3. P. 203–207.
4. **Opfermann, A.** Improvement of energy efficiency in EAF steelmaking / A. Opfermann // *Millennium steel*. 2009. P. 65–72.
5. **Моксон, П.** Применение системы RCB для вдувания кислорода в электродуговые печи / П. Моксон [и др.] // *Черные металлы*. 2004. № 4. С. 89–92.
6. **Brhel, J.** The JetBOx™ burner/injector system for EAF steelmaking / J. Brhel, Ch. Farmer, V. Shver // *Millennium steel*. 2006. P. 87–91.
7. **Cates, L.** Installation of Praxair's CoJet® Gas Injection System at Sumikin Steel and other EAFs with Hot Metal Charges / L. Cates [et al] // *AISTech 2008 Iron & Steel Technology Conference Proceedings*, Pittsburgh, PA. 2008.
8. Оценка эффективности работы электродуговых печей при использовании инжекционной системы КТ / *Черная металлургия*. 2004. № 11. С. 53–59.
9. **Данилов, Е. В.** Оптимизация работы дуговых сталеплавильных печей / Е. В. Данилов // *Металлург*. 2003. № 7. С. 60.
10. **Opfermann, A.** Energy efficiency of Electric Arc Furnace / A. Opfermann, D. Riedinger // *Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. May 5–8 2008, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A. // *AIST, Association for Iron & Steel Technology*. Pittsburgh, 2008. Vol. 2.
11. **Adams, W.** Factors influencing the total energy consumption in arc furnaces / Adams, W. [et al] // *Proceedings 59th electric arc furnace conference 2001 Phoenix, Arizona*. 2001.

REFERENCES

1. **Thebault, J.M.** A multi-function system for EAF steelmaking: industrial result at LME (France). 7th European Steel Making Conference, 26–29 May. – Venice, Italy. – 2002.
2. **Grant M.** Adaptacija raboty jelektrodugovoj pechi k netradicionnym syr'evym materialam [Adaptation of the operation of an electric arc furnace to unconventional raw materials]. *Metallurg = Metallurgist*, 2014, no. 2, pp. 48–56.
3. **Cantacuzene S.** Advanced EAF oxygen usage at Vallourec–mannesmann Saint saulve steelworks. *Ironmaking & Steelmaking*. 2005, Vol.32, no. 3, pp. 203–207.

4. **Opfermann A.** Improvement of energy efficiency in EAF steelmaking. Millennium steel, 2009, pp. 65–72.
5. **Mokson P.** Primenenie sistemy RCB dlja vduvaniya kisloroda v jelektrodugovye pechi [Application of the RCB system for oxygen injection into electric arc furnaces]. *Chernye metally = Black metalm*, 2004, no. 4, pp. 89–92.
6. **Brhel J., Farmer Ch., Shyer V.** The JetBOx™ burner/injector system for EAF steelmaking. Millennium steel, 2006, pp. 87–91.
7. **Cates L.** Installation of Praxair's CoJet® Gas Injection System at Sumikin Steel and other EAFs with Hot Metal Charges. AISTech 2008 Iron & Steel Technology Conference Proceedings, Pittsburgh, PA, 2008.
8. Ocenka jeffektivnosti raboty jelektrodugovyh pechej pri ispol'zovanii inzhekcionnoj sistemy KT [Evaluation of the efficiency of electric arc furnaces using the KT injection system]. *Chermetinformacija Publ., Bjulleten' Chernaja metallurgija = Ferrous Metallurgy Bulletin*, 2004, no. 11, pp. 53–59.
9. **Danilov E. V.** Optimizacija raboty dugovyh staleplavil'nyh pechej [Optimization of the work of arc steel-making furnaces]. *Metallurg = Metallurgist*, 2003, no.7, 60p.
10. **Opfermann A., Riedinger D.** Energy efficiency of Electric Arc Furnace. (Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference: May 5–8 2008, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A.). AIST, Association for Iron & Steel Technology. Pittsburgh, 2008, Vol. 2.
11. **Adams W.** Factors influencing the total energy consumption in arc furnaces, Proceedings 59th electric arc furnace conference 2001 Phoenix, Arizona. – 2001.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-106-112>
УДК 620. 178. 311

Поступила 20.10.2020
Received 20.10.2020

АНАЛИЗ КОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ НА БАЗЕ ДИСПЕРСНОГО ОТХОДА ГОРЯЧЕГО ЦИНКОВАНИЯ

Н. И. УРБАНОВИЧ, К. Э. БАРАНОВСКИЙ, Е. В. РОЗЕНБЕРГ, Т. И. БЕНДИК, А. А. КАРПЕНКИН,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.
E-mail: komarov_metolit@tut.by, baranosky_metolit@tut.by, erozenberg@bntu.by,
В. А. АШУЙКО, В. Г. МАТЫС, Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова 13А,
В. Ф. ВОЛОСЮК, ООО «Гальварекс», г. Кобрин

Проведен сравнительный анализ коррозионных свойств цинксодержащих покрытий, полученных на основе металлического порошкового цинка и дисперсного отхода горячего цинкования. Результаты исследования коррозионной стойкости цинксодержащих покрытий электрохимическим методом и в камере солевого тумана показали, что покрытия, полученные на базе дисперсного отхода горячего цинкования, не уступают по защитным свойствам покрытиям на базе порошкового стандартного цинка.

Ключевые слова. Цинксодержащие покрытия, дисперсный отход горячего цинкования, коррозионные свойства.

Для цитирования. Урбанович, Н. И. Анализ коррозионных свойств цинксодержащих покрытий на базе дисперсного отхода горячего цинкования / Н. И. Урбанович, К. Э. Барановский, Е. В. Розенберг, Т. И. Бендик, А. А. Карпенкин, В. А. Ашуйко, В. Г. Матыс, В. Ф. Волосяк // *Литье и металлургия*. 2020. № 4. С. 106–112. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-106-112>.

ANALYSIS OF CORROSIVE PROPERTIES OF ZINC-CONTAINING COATINGS BASED ON DISPERSED WASTE HOT ZINC PLATING

N. I. URBANOVICH, K. E. BARANOVSKY, E. V. ROZENBERG, T. I. BENDIK,
A. A. KARPENKIN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
E-mail: baranosky_metolit@tut.by, erozenberg@bntu.by,
V. A. ASHUIKO, V. G. MATYS, Belarusian State Technological University. Minsk, Belarus, 13A, Sverdlova str.
V. F. VOLOSUYUK, LLC «Galvarex», Kobrin

A comparative analysis of the corrosion properties of zinc-containing coatings obtained on the basis of metallic powder zinc and dispersed hot-dip galvanized waste has been carried out. The results of a study of the corrosion resistance of zinc-containing coatings by the electrochemical method and in a salt spray chamber have shown that coatings obtained on the basis of dispersed hot-dip galvanized waste are not inferior in protective properties to coatings based on powder standard zinc.

Keywords. Zinc-containing coatings, dispersed hot-dip galvanizing waste, corrosive properties

For citation. Urbanovich N. I., Baranovsky K. E., Rozenberg E. V., Bendik T. I., Karpenkin A. A., Ashuiko V. A., Matys V. G., Volosyuk V. F. Analysis of corrosive properties of zinc-containing coatings based on dispersed waste hot zinc plating. *Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 4, pp. 106–112. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-106-112>.

Коррозия металлов наносит огромный ущерб народному хозяйству, поэтому борьба с коррозией является одной из важнейших задач. Среди методов борьбы с коррозией особое место занимает защита металлов от коррозии с помощью цинксодержащих красок. Широкому использованию цинксодержащих лакокрасочных покрытий способствует простая технология окраски, допускающая возможность их нанесения на крупногабаритные конструкции в полевых условиях.

Согласно последним исследованиям, уже в ближайшие десятилетия возрастающий дефицит сырьевой базы многих основных металлов (в том числе и цинка) приведет к резкому повышению их стоимости. В результате чего наблюдается устойчивая тенденция повышения использования лома и отходов в общем объеме цветных металлов. Особенно это актуально для Республики Беларусь, которая не имеет

своих сырьевых ресурсов и вынуждена закупать цинксодержащие краски или цинковый порошок для производства красок за рубежом. В то же время в Республике Беларусь существуют производства горячего цинкования, в частности, ОАО «Речицкий метизный завод». В процессе горячего цинкования образуются около 100 т в год цинковой пыли при продувке труб.

В связи с вышесказанным целью данной работы является изучение возможности применения цинксодержащей краски для защитных покрытий на основе дисперсного отхода горячего цинкования и исследование ее коррозионных свойств.

Так как в работе предлагается в качестве наполнителя цинксодержащей краски использовать дисперсный отход горячего цинкования, проводили исследования его гранулометрического и химического состава.

Цинковая пыль представляет собой дисперсный отход с частицами круглой формы размером от 3 до 200 мкм, внешний вид, морфология и размер которых показаны на рис. 1.

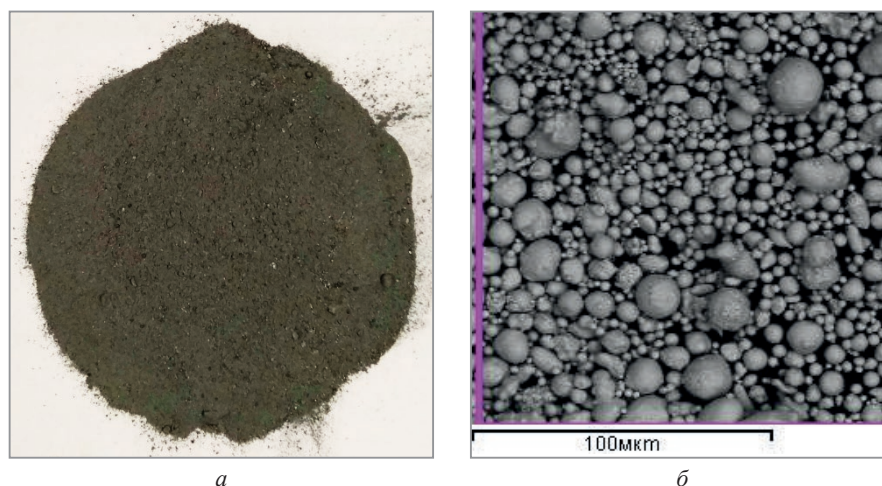


Рис. 1. Отход горячего цинкования – цинковая пыль:
а – внешний вид цинковой пыли; б – морфология и размер частиц отхода

Химический анализ отхода, который определяли с помощью рентгенофлуоресцентного микроанализатора INKA 350, показал, что содержание (по среднему значению) в нем таких элементов, как алюминий составляет 0,01 %, железо – 0,02, цинк – 94, свинец – 0,5%, кислород в виде оксида цинка – остальное. Анализ состава цинковой пыли позволил установить, что по химическому составу она в основном соответствует требованиям ISO 3549.

Так как для изготовления краски рекомендуется использовать цинковый порошок с размером частиц в диапазоне 3–15 мкм, необходимо было провести рассев цинковой пыли по фракциям, который осуществляли с помощью воздушно-центробежного классификатора фирмы «Ламел 777». Исследования фракционного состава цинковой пыли позволили установить, что она имеет следующий состав: 0–5 мкм – 8%; 5–15 мкм – 19%; 15–63 мкм – 7%; 63–100 мкм – 9%; 100 мкм – остальное. При этом содержание в цинковой пыли частиц размером ≤ 15 мкм составляет порядка 27% и их можно рекомендовать для изготовления цинксодержащих красок.

В зависимости от качества и количества цинкового порошка, а также химической природы используемого пленкообразующего полимера общее коррозионно-защитное поведение покрытий и вклад в него протекторного и гидроизолирующего механизмов оказывается различным. Общеизвестно [1, 2], что условием реализации протекторной защиты является существование цепочек из частиц цинкового порошка, электрически связанных между собой и со стальной основой.

Для изготовления экспериментальных составов красок на базе дисперсного отхода горячего цинкования использовали пленкообразователи (связующие), предоставленные производителем цинксодержащих красок в Республике Беларусь ООО «Гальварекс». Составы экспериментальных красок получали с применением литиевого жидкого стекла и акрилового связующего.

Цинксодержащие краски имеют высокие защитные свойства. Это обеспечивается содержанием в них цинка (85–95 %) [3, 4]. В качестве цинкового наполнителя в составах красок использовали дисперсный отход горячего цинкования фракцией 0–5 мкм и фракцией 5–15 мкм шаровидной формы и готового цинкового порошка марки Inst 800, имеющего частицы круглой формы фракцией 3–5 мкм с содержанием

небольшого количества частиц размером 15 мкм. Из анализа литературных источников известно, что для изготовления краски рекомендуется использовать цинковый порошок с размером частиц в диапазоне 3–15 мкм, так как при увеличении размеров частиц более 15 мкм снижаются укрывистость цинксодержащих покрытий, седиментационная устойчивость красок, затрудняется их нанесение на поверхность и получение покрытий заданной толщины. При использовании в составе красок цинкового порошка с частицами размером менее 2 мкм отмечается резкое ухудшение защитных свойств цинксодержащих покрытий из-за образования из мелких частиц цинка агломератов больших размеров [5]. Влияет также на протекторные и барьерные защитные свойства красок, их седиментационную устойчивость и качество получаемых покрытий форма частиц цинкового порошка (сферическая, чешуйчатая и др.) [6], хотя обычно на практике чаще применяют цинковую пыль со сферическими частицами. Применение в краске цинкового пигмента, содержащего не только частицы сферической формы, но и частицы в виде хлопьев, позволяет уменьшить содержание цинка в покрытиях без снижения их защитных свойств, что объясняется высокой удельной поверхностью пластинчатого цинка, а также увеличением числа возможных электрических контактов между различными по форме частицами металлического пигмента [7]. Кроме того, цинковые хлопья увеличивают также барьерный эффект, создаваемый покрытием.

В связи с приведенным выше проводили исследования по влиянию на коррозионные свойства цинксодержащих покрытий, в которых в качестве наполнителя использовали дисперсный отход с разным размером и формой частиц. Рецептуру составов цинксодержащих красок подбирали с учетом данных литературного обзора. При изготовлении цинксодержащих композиций соблюдали требование, чтобы массовое соотношение металлического пигмента или добавки к пленкообразователю в покрытии составляло 90:10. На основе дисперсного отхода горячего цинкования были изготовлены составы красок с применением акрилового связующего. В одном составе использовали отход с размером частиц 0–15 мкм, в другом – часть цинковой пыли сферической формы размером 0–15 мкм была заменена цинком хлопьевидной формы швейцарской фирмы «Eckart» в количестве 10 % от массы цинкового наполнителя. Получена также краска на акриловом связующем с цинковой пылью, имеющей размер частиц 0–5 мкм. На литиевом жидком стекле изготовлены краски с цинковой пылью размером 0–15 мкм. В качестве контрольных образцов при испытаниях служили покрытия, полученные с применением красок, изготовленных из цинкового порошка марки Inst 800, а пленкообразователем в одном случае являлось акриловое связующее, в другом – литиевое жидкое стекло. В табл. 1 приведены составы цинксодержащих красок.

Таблица 1. Составы цинксодержащих композиций

Номер композиции (номер образца)	Пигмент, форма и размер фракции, мкм	Пленкообразователь	Толщина покрытия, мм
1	Порошок цинка марки Inst 800, круглая, 3–5,15	Акрил	0,065-0,070
2	Дисперсный отход горячего цинкования сферической формы, 0–5	Акрил	0,035-0,040
3	Дисперсный отход горячего цинкования сферической формы, 0–15	Акрил	0,030-0,045
4	Дисперсный отход горячего цинкования сферической формы, 0–15; цинковые хлопья (размером 5–20 мкм) швейцарской фирмы «Eckart», 10 мас. %	Акрил	0,040-0,055
5	Порошок цинка марки Inst 800, круглая, 4-6,15	Жидкое стекло литиевое	0,110-0,125
6	Дисперсный отход горячего цинкования сферической формы, 0–15	Жидкое стекло литиевое	0,050-0,065

Основной функцией цинксодержащего покрытия является защита металла от коррозии. Для оценки коррозионной стойкости покрытий использовали электрохимические методы и метод испытаний в камере солевого тумана. С целью проведения испытаний покрытий на коррозионные свойства были получены стальные образцы разной формы и размеров, которые вырезали из стального листа толщиной 1,5 мм марки Ст3 с помощью гильотинных ножниц и установки лазерной резки. Стальные образцы перед окраской подвергали сухой абразивной струйной очистке. Пластины с покрытиями размером 70x50x1,5 мм предназначены для определения весовых показателей коррозии электрохимическим методом и в камере солевого тумана, а размером 20x20x1,5 мм – для снятия анодных и катодных кривых при определении плотностей токов коррозии и импедансных спектров. Размешивание краски осуществляли лабораторной

мешалкой в течение 30 с, для чего в наполненную емкость пленкообразователем постепенно добавляли цинковый порошок. Покрытие на металлические подложки наносили кисточкой. На рис. 2 показаны образцы с нанесенными покрытиями для проведения испытаний.

Оценку толщины покрытия на полученных образцах проводили с помощью прибора «Константа 5К». В табл. 2 приведены результаты электрохимических исследований покрытий, полученных на основе цинкового порошка.

Результаты анализа защитных свойств электрохимическим методом показали, что коррозионная стойкость цинкодержащих покрытий из стандартного цинкового порошка и дисперсного отхода производства, имеющего размер частиц 0–5 мкм, практически одинаковы. Защитные свойства покрытия на основе отхода горячего цинкования с размером частиц 0–15 мкм повышаются при добавке к отходам горячего цинкования цинковых чешуек, что связано с увеличением площади контакта и повышением катодной защиты. Более низкие защитные свойства имеют покрытия на литиевом жидком стекле. По-видимому, это связано с худшей адгезией покрытия к стальной основе по сравнению с покрытиями на акриловом пленкообразователе. Следует отметить, что защитные свойства покрытия на основе отхода горячего цинкования с размером частиц 0–15 мкм всего на 5–8 % хуже, чем на эталонном цинке.

Коррозионную стойкость весовым методом определяли с использованием камеры солевого тумана ASCOTT S120iS объемом 120 л. Время выдержки образцов в камере составляло каждый день по 6 ч при температуре 35 °С и непрерывном распылении 5%-ного раствора NaCl со скоростью 10 мл/мин. После каждого дня испытаний образцы промывали водой и сушили. Следует отметить, что только после первого и последнего дня испытаний образцы дополнительно протравливали в растворе удаления продуктов

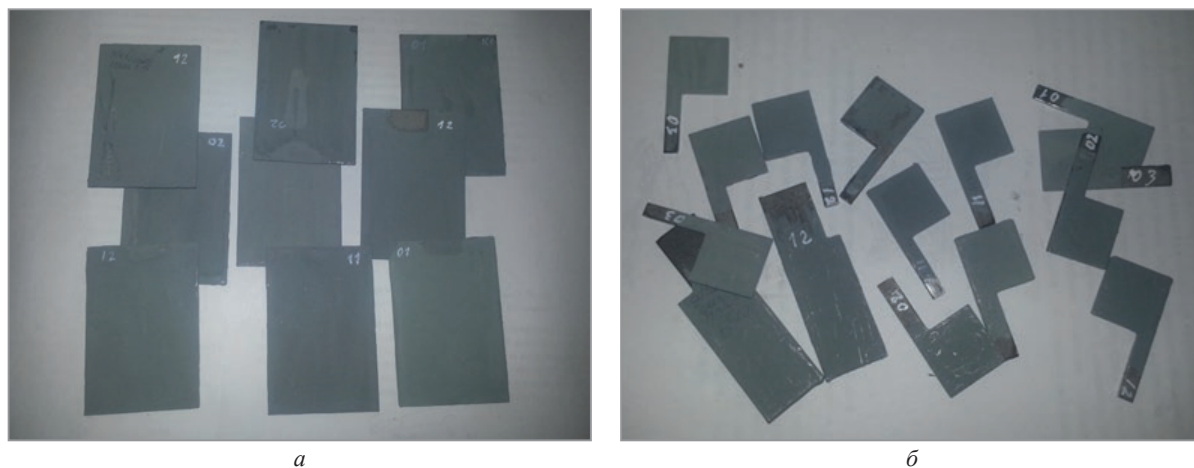


Рис. 2. Образцы для проведения коррозионных испытаний:
а – пластины размером 70х50х1,5 мм; б – образцы размером 20х20х1,5 мм

Таблица 2. Коррозионная стойкость цинковых покрытий на базе цинкового порошка разного размера, формы и состава

Номер образца	Состав цинкового покрытия	Средний токовый показатель скорости коррозии, А/см ²	Массовый показатель коррозии, г/(м ² ·ч)	Глубинный показатель коррозии, мм/год
1	Стандартный цинковый порошок Inst-800 (3–5 мкм), пленкообразователь – акрил	$4,7 \cdot 10^{-6}$	0,0576	0,0707
2	Дисперсный отход горячего цинкования сферической формы (0–5 мкм), пленкообразователь – акрил	$4,7 \cdot 10^{-6}$	0,0577	0,0709
3	Дисперсный отход горячего цинкования сферической формы (0–15 мкм), пленкообразователь – акрил	$5,1 \cdot 10^{-6}$	0,0671	0,0818
4	Дисперсный отход горячего цинкования сферической формы (0–15 мкм) + 10 % чешуек от массы цинкового наполнителя (размером 5–20 мкм) швейцарской фирмы «Eckart», пленкообразователь – акрил	$3,9 \cdot 10^{-6}$	0,0487	0,0599
5	Стандартный цинковый порошок Inst-800 (3–5 мкм), пленкообразователь – литиевое жидкое стекло	$1,9 \cdot 10^{-5}$	0,2325	0,2855
6	Дисперсный отход горячего цинкования сферической формы (0–15 мкм), пленкообразователь – литиевое жидкое стекло	$1,56 \cdot 10^{-5}$	0,1914	0,2351

коррозии и сушили в эксикаторе. Удаление продуктов коррозии цинка осуществляли химическим методом путем обработки образцов в растворе хлорида аммония, NH_4Cl 100 г/дм³ при температуре 70–75 °С в течение 3 мин (ГОСТ 9.907-2007). После травления образцы промывали в проточной воде ~2 мин и ополаскивали в дистиллированной воде. В остальные дни после каждых 6 ч пребывания в камере соляного тумана образцы промывали проточной водопроводной водой и ополаскивали дистиллированной водой, затем сушили их в течение ночи (~12 часов) на воздухе.

На рис. 3 показан внешний вид образцов цинксодержащих покрытий после пребывания в течение 48 ч в камере солевого тумана и последующего удаления продуктов коррозии.

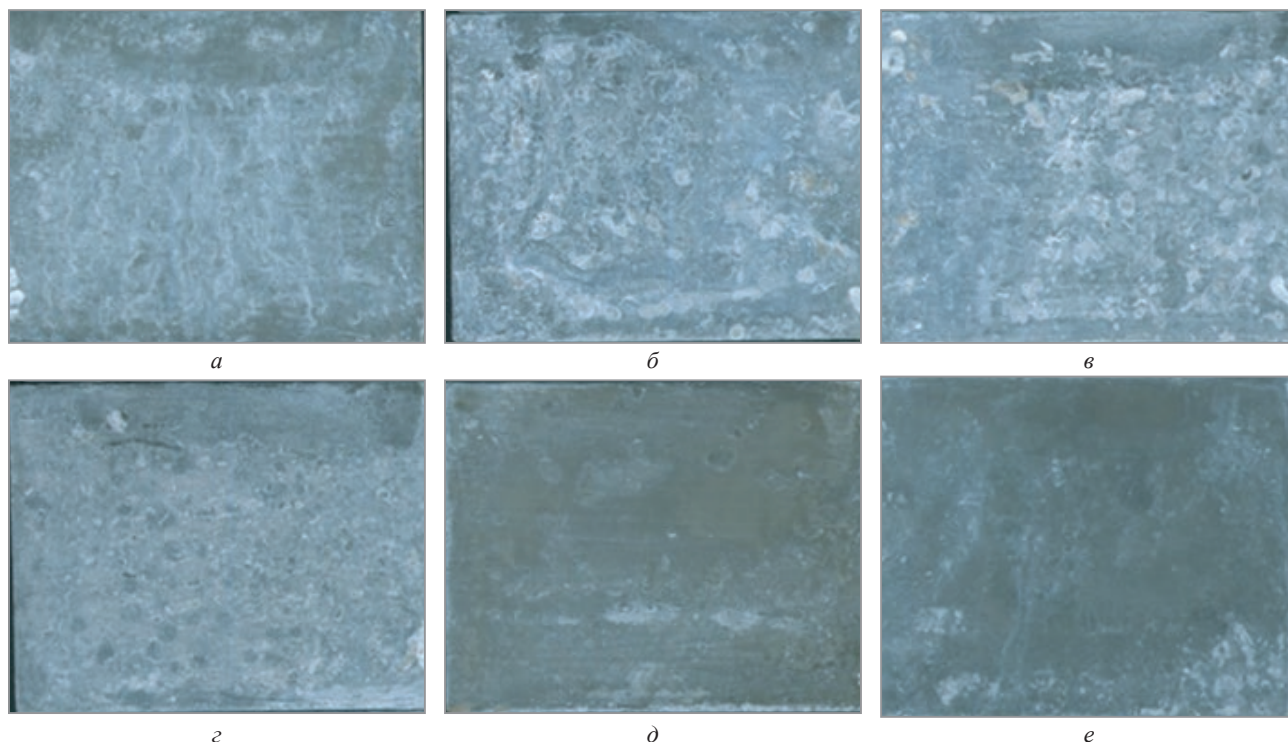


Рис. 3. Внешний вид образцов цинксодержащих покрытий после пребывания в камере солевого тумана в течение 48 ч и последующего удаления продуктов коррозии:

- а* – покрытие на базе порошкового цинка марки Inst 800 и акрилового связующего (образец № 1);
- б* – покрытие на базе дисперсного отхода горячего цинкования размером частиц 0–5 мкм и акрилового связующего (образец № 2);
- в* – покрытие на базе дисперсного отхода горячего цинкования размером частиц 0–15 мкм и акрилового связующего (образец № 3);
- г* – покрытие на базе дисперсного отхода горячего цинкования размером частиц 0–15 мкм с добавкой цинковых хлопьев швейцарской фирмы «Eckart» и акрилового связующего (образец № 4);
- д* – покрытие на базе порошкового цинка марки Inst 800 и литиевого жидкого стекла (образец № 5);
- е* – покрытие на базе дисперсного отхода горячего цинкования размером частиц 0–15 мкм и литиевого жидкого стекла (образец № 6)

Результаты по изменению массы образцов во времени после каждого цикла испытаний в камере солевого тумана приведены на рис. 4 для каждого состава покрытия.

Из рисунка видно, что после удаления продуктов коррозии на образцах покрытий, прошедших испытания в камере солевого тумана в течение 48 ч, масса их заметно уменьшается только для образцов № 1 и 2. Она становится меньше, чем была после 6 ч испытаний и последующего удаления продуктов коррозии. Это связано, вероятно, с тем, что на данных покрытиях образуются продукты коррозии таких составов, которые смываются травильным раствором. Это может быть гидратированный оксид и гидроксокарбонат цинка. На покрытиях образцов № 5 и 6 продукты коррозии с покрытий удаляются не полностью за счет получения плотного, хорошо удерживаемого на поверхности металла осадка, обладающего защитными свойствами. Такой осадок могут образовывать малорастворимые силикаты цинка, которые образуются при взаимодействии оксида цинка с оксидом кремния, входящим в состав литиевого жидкого стекла. Отметим, что на поверхности данных покрытий почти отсутствует «белая» коррозия, ржавчина, причем она не наблюдалась и до травления, и после травления образцов (см. рис. 3). У покрытия № 4 изменение массы за счет накопления продуктов коррозии носит менее интенсивный характер, чем у покрытия № 3. При этом следует отметить, что продукты коррозии данных покрытий также удаляются травильным раствором.

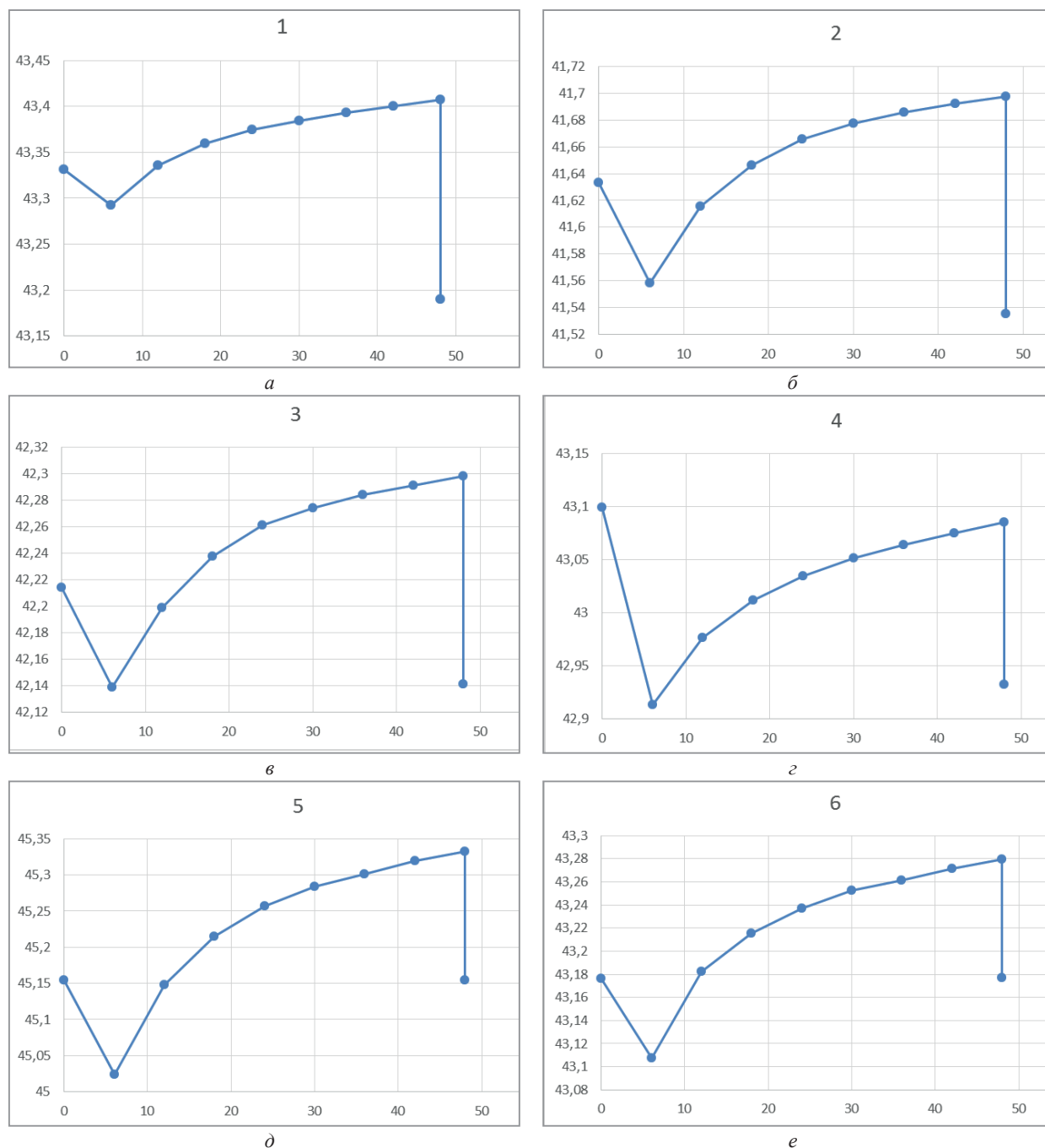


Рис. 4. Изменение массы образцов во времени после каждого цикла испытаний в камере солевого тумана:
 а – образец покрытия № 1; б – образец покрытия № 2; в – образец покрытия № 3;
 г – образец покрытия № 4; д – образец покрытия № 5; е – образец покрытия № 6

На рис. 5 показано изменение массы образцов покрытий в процессе испытаний в камере солевого тумана в течение 48 ч относительно их начальной массы перед испытаниями с последующим их травлением после испытаний. Травление проводили после первых 6 ч испытаний и после 48 ч.

Из рисунка видно, что зависимости носят примерно одинаковый характер. Пики, наблюдаемые на кривых после шести часов пребывания в камере солевого тумана, свидетельствуют об уменьшении массы образцов покрытий в результате их обработки травильным раствором. Далее идет подъем кривых, так как масса образцов увеличивается в связи с накоплением продуктов коррозии в покрытиях. После испытаний покрытий в течение 48 ч и последующего их травления заметное уменьшение массы произошло у образца № 4, покрытие которого, кроме дисперсного отхода горячего цинкования с размером частиц 0–15 мкм, имеет в своем составе чешуйки цинка. Такой результат, скорее всего, связан с тем, что активные цинковые частицы в виде чешуек имеют свойство интенсивнее растворяться в активной среде по сравнению с частицами сферической формы с образованием более смываемых продуктов

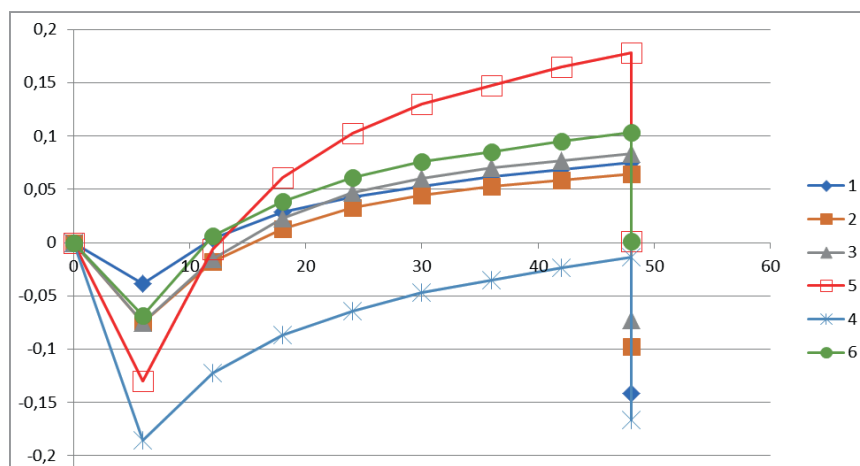


Рис. 5. Изменение массы образцов покрытий в процессе испытаний в камере солевого тумана в течение 48 ч относительно их массы перед испытаниями и последующего их травления после испытаний

коррозии. Несколько меньшие значения по потере массы по сравнению с покрытием № 4 имеют покрытия № 1, 2, 3. Следует отметить, что интенсивность наращивания массы данных покрытий примерно одинаковая, несмотря на то что наполнителем в одном случае служил дисперсный отход горячего цинкования (образцы покрытий № 2, 3), в другом – стандартный порошковый цинк (образец покрытия № 1). У образцов № 5 и 6, покрытия которых получены соответственно на основе порошка цинка марки Inst 800 и дисперсного отхода горячего цинкования, а связующим являлось литиевое жидкое стекло, отмечен рост массы, связанный с тем, что на данных покрытиях образуются малорастворимые силикаты цинка, которые плохо смываются травильным раствором.

Таким образом, проведенные сравнительные исследования электрохимическим методом и в солевом тумане на коррозионную стойкость цинксодержащих покрытий позволили установить, что покрытия, полученные на основе дисперсного отхода горячего цинкования, не уступают по защитным свойствам покрытиям на основе стандартного порошкового цинка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Feliu S. Mechanism of cathodic protection of zinc-rich paints by electrochemical impedance spectroscopy. II. Barrier stage / S. Feliu, R. Baraja, J. M. Bastidas, M. Morcollo // *J of coating technology*. 1989. Vol. 61. No 775. P. 71–76.
2. A new approach to the determination of the cathodic protection period in zinc-rich paints / Abreu C.M [and etc.] // *Corrosion*. 1999. Vol. 55. № 12. P. 1173–1181.
3. Iijima M. High corrosion resistance mechanism of chrome-free zinc-rich paint / M. Iijima // *National Association for Surface Finishing Annual International Technical Conference*. 2008. SUR/FIN 2008, P. 322–332.
4. Shreepathi S. Electrochemical impedance spectroscopy investigations of epoxy zinc rich coatings: Role of Zn content on corrosion protection mechanism / S. Shreepathi, P. Bajaj, B. P. Mallik // *Electrochimica Acta*. Vol. 55. P. 5129–5134.
5. Клименко В.Л. О качестве цинковых порошков / В.Л. Клименко // *Цветные металлы*. 1984. № 9. С. 34–37/
6. Латышев Ю.В. Антикоррозионные пигменты / Ю.В. Латышев, Л.М. Ленев, Н.Ф. Семенов // *ЛКМ и их применение*. 1997. № 2. С. 14–18.
7. Kruba L. Цинкнаполненный грунт на основе этилсиликата с пониженным содержанием цинка / L. Kruba, P. Stucker, T. Stucker // *Лакокрасочная промышленность*. 2007. № 1. С. 7–12.

REFERENCES

1. Feliu S. Mechanism of cathodic protection of zinc-rich paints by electrochemical impedance spectroscopy. II. Barrier stage. S. Feliu, R. Baraja, J. M. Bastidas, M. Morcollo *J of coating technology*. 1989, vol. 61, no. 775, pp. 71–76.
2. Abreu C.M [and etc.] A new approach to the determination of the cathodic protection period in zinc-rich paints. *Corrosion*. 1999, vol. 55, no. 12, pp. 1173–1181.
3. Iijima M. High corrosion resistance mechanism of chrome-free zinc-rich paint. M. Iijima. *National Association for Surface Finishing Annual International Technical Conference*. 2008. SUR/FIN 2008, pp. 322–332.
4. Shreepathi S. Electrochemical impedance spectroscopy investigations of epoxy zinc rich coatings: Role of Zn content on corrosion protection mechanism. S. Shreepathi, P. Bajaj, B. P. Mallik. *Electrochimica Acta*. Vol. 55, pp. 5129–5134.
5. Klimentenko V.L. O kachestve cinkovykh poroshkov [About the quality of zinc powders]. *Cvetnyye metally= Non-ferrous metals*, 1984, no. 9, pp. 34–37.
6. Latyshev Ju.V. et al. Antikorroziionnye pigmenty [Anti-corrosion pigments]. *LKM i ih primenenie=LKM and their application*. 1997, no. 2, pp. 14–18.
7. Kruba L. et al. Cinknapolnennyj grunt na osnove jetilsilikata s ponizhennym soderzhaniem cinka [Zinc-filled primer based on ethyl silicate with a reduced zinc content] *Lakokrasoch. Prom-st'=Paint and varnish industry*, 2007, no. 1, pp. 7–12.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-113-117>
УДК 539.2

Поступила 10.08.2020
Received 10.08.2020

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИСТАТИЧЕСКИХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТКАНИ 05С8-КВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ КЛАСТЕРАМИ МЕТАЛЛОВ

А. Г. АНИСОВИЧ, И. П. АКУЛА, А. П. ЛАСКОВНЕВ, М. И. МАРКЕВИЧ, Н. М. ЧЕКАН, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru

Разработаны режимы нанесения и созданы углеродные покрытия, модифицированные кластерами металлов, на ткани 05С8-КВ (производитель – ОАО «Моготекс»). Исследована морфология поверхности данной ткани с покрытиями. Показано, что при нанесении покрытий с мишени из стали 12Х18Н10Т на покрытиях присутствует капельная фаза (максимальный размер капель достигает 3,5 мкм). Исследовано парамагнитное поглощение системы углеродное покрытие – кластеры из мишени 12Х18Н10Т. Установлено, что на ЭПР спектре присутствует спектральная линия шириной 94,4 мТл (милитесла), что свидетельствует о высокой концентрации магниторезонансных центров; эффективное значение g-фактора составляет $2,26 \pm 0,01$. Кроме того, на спектре фиксируется узкая спектральная линия с эффективным значением g-фактора $2,04 \pm 0,01$. Ширина линии составляет 4,3 мТл, что связано с высокой локальной концентрацией неспаренных электронов в углеродных кластерах при слабом нерезонансном поглощении СВЧ-поля. Результат измерения удельного поверхностного сопротивления на ткани с данным покрытием (сторона 1/сторона 2) составляет $2,3 \cdot 10^9$ и $4,8 \cdot 10^9$ Ом соответственно, что несколько ниже, чем у чисто углеродного покрытия.

Ключевые слова. Лавсан, ткань, антистатическое покрытие, микроскопия, резонансное поглощение энергии СВЧ, поверхностное сопротивление.

Для цитирования. Анисович, А. Г. Создание и исследование антистатических углеродных покрытий на ткани 05С8-КВ, модифицированных кластерами металлов / А. Г. Анисович, И. П. Акула, А. П. Ласковнев, М. И. Маркевич, Н. М. Чекан // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 113–117. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-113-117>.

CREATION AND RESEARCH OF ANTISTATIC CARBON COATINGS ON FABRIC 05С8-KB, MODIFIED BY METAL CLUSTERS

A. G. ANISOVICH, I. P. AKULA, A. P. LASKOVNEV, M. I. MARKEVICH, N. M. CHEKAN, State Scientific Institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”, Minsk, Belarus, 10, Kuprevich Str. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru

Application modes have been developed and carbon coatings modified with metal clusters on 05S8-KV fabric (manufacturer OJSC Mogotex) were created. The surface morphology of this coated fabric was investigated. It was shown that during the deposition of coatings from 12X18H10T steel targets a droplet phase is present on the coatings (the maximum droplet size reaches 3.5 μm). The paramagnetic absorption of the system carbon coating – clusters from the 12X18H10T steel target is investigated. It was found that the EPR spectrum contains a spectral line 94.4 mT wide, which indicates a high concentration of magnetic resonance centers, the effective value of the g-factor is 2.26 ± 0.01 . In addition, a narrow spectral line with an effective g-factor of 2.04 ± 0.01 is recorded in the spectrum, the linewidth is 4.3 mT, which is associated with a high local concentration of unpaired electrons in carbon clusters with a weak nonresonant absorption at UHF (ultra-high frequency). The result of measuring the specific surface resistance on fabrics with this coating (side 1 / side 2) is $2.3 \cdot 10^9$ and $4.8 \cdot 10^9$ ohms, respectively, which is slightly lower than for a pure carbon coating.

Keywords. Lavsan, fabric, antistatic coating, microscopy, resonant absorption of UHF energy, surface resistance.

For citation. Anisovich A. G., Akula I. P., Laskovnev A. P., Markevich M. I., Chekan N. M. Creation and research of antistatic carbon coatings on fabric 05C8-KB, modified by metal clusters. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 113–117. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-113-117>.

Введение. В настоящее время технологическая антистатическая одежда необходима для различных отраслей производства: микроэлектроники, оптоэлектроники, а также фармацевтической, медицинской, ядерной, аэрокосмической, химической, пищевой и автомобильной промышленности. Ассортимент одежды из материалов с антистатическими свойствами весьма

разнообразен. Это комбинезоны, костюмы, бахилы и т.д. Специфика такой технологической одежды состоит в том, что она не служит средством защиты персонала, а является важной составляющей чистого помещения, которая защищает технологический процесс и производимую продукцию от загрязнений. Поэтому к материалам для изготовления одежды предъявляются особые требования [1–5]. Применяемые материалы должны обладать рядом свойств: минимальным пылеотделением, высокими барьерными свойствами (ткани, задерживающие частицы размером от 0,1 мкм), антистатичностью, определенными показателями удельного поверхностного сопротивления.

Лучшие прочностные показатели пылеотделения возможны только у тканей, имеющих в составе 100% синтетического волокна, но они не обладают антистатическим эффектом. Поэтому получение новых антистатических покрытий на полимерных тканях и исследование их свойств является актуальной задачей.

Цель работы – создание покрытий на ткани 05С8-КВ, снижающих статическое электричество, а также исследование свойств тканей с покрытием.

Материалы и методики эксперимента

Состав ткани 05С8-КВ – 100%-ный полиэфир (производитель – ОАО «Моготекс»). Она используется для пошива униформы, специальной одежды работников различных отраслей народнохозяйственного комплекса, а также для повседневной и спортивной одежды.

Предварительно перед формированием покрытий поверхность тканей обрабатывали высокоэнергетическими ионами аргона для удаления органических загрязнений в течение 15 мин при следующих параметрах: давление аргона в вакуумной камере – порядка $3,2 \cdot 10^{-2}$ Па, ускоряющее напряжение – 2000 В, ионный ток – 40 мА.

На поверхность ткани наносили металлическое покрытие; использовали мишени из стали 12Х18Н10Т и алюминия. Покрытия осаждали в вакууме с использованием источника стационарной металлической плазмы, работающего в режиме сепарации. Поскольку температура покрытия при его формировании на поверхности основы может достигать нескольких сотен градусов Цельсия, то процесс проводили путем чередования периодов работы источника плазмы (1 мин) и паузы для охлаждения ткани (1 мин). Формирование покрытий проходило при следующих параметрах: ток горения дуги – 55 А, 15 циклов «осаждение-охлаждение». Затем осаждали углеродное покрытие. Формирование углеродного покрытия проходило при следующих параметрах: давление углеводородного газа (ацетилен) – порядка 1,0 Па, ускоряющее напряжение на катоде – 300 В, емкость разрядной батареи – 2150 мкФ, частота следования импульсов – 2,5 Гц. Всего было сделано 10 000 разрядных импульсов.

Результирующее покрытие сформировано углеродом и кластерами металлов, входящих в состав стали 12Х18Н10Т.

Исследование поверхности волокна в исходном состоянии проводили с использованием металлографического комплекса на основе инвертированного микроскопа МИ-1 в отраженном свете при увеличениях от 2 до 1000 крат с освещением по методу светлого и темного поля [6]. Выбор оптического микроскопа для изучения волокна связан с тем, что в растровом электронном микроскопе образец за 2–3 с накапливает статический электрический заряд, что делает невозможным визуализацию поверхности.

Исследование морфологии поверхности ткани после нанесения покрытия было выполнено также на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMN, оснащенный катодом Шоттки высокой яркости в качестве источника электронов. Элементный состав определяли с помощью системы энергодисперсионного микроанализа AZtec для сканирующей электронной микроскопии и представляет собой программно-аппаратный комплекс с модульным программным обеспечением.

Исследования магнитного резонанса проводили на специализированном малогабаритном анализаторе ЭМР «Минск 22» при комнатной температуре. Рабочая длина волны – 3 см. Максимальное значение индукции магнитного поля – 450 мТл, частота модуляции – 30 кГц. Для калибровки интенсивности сигналов объектов исследования использовали образец из монокристалла рубина ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$). В процессе измерений дополнительный контроль стабильности работы спектрометра осуществляли путем измерения калибровочного материала двухвалентного марганца ($\text{MgO}:\text{Mn}^{2+}$) [7, 8].

Обсуждение результатов. В исходном состоянии ткань имеет полотняное плетение, размер ячейки составляет порядка 300 мкм (рис. 1, а). Толщина волокна – до 20 мкм (рис. 1, б).

Морфология поверхности ткани после нанесения покрытия углерод-сталь показана на рис. 2. На рис. 2, а показан характер плетения ткани. Поверхность покрытия ровная, без видимых дефектов (рис. 2, б). При увеличении 1000 крат на поверхности появляется капельная фаза (рис. 2, в).

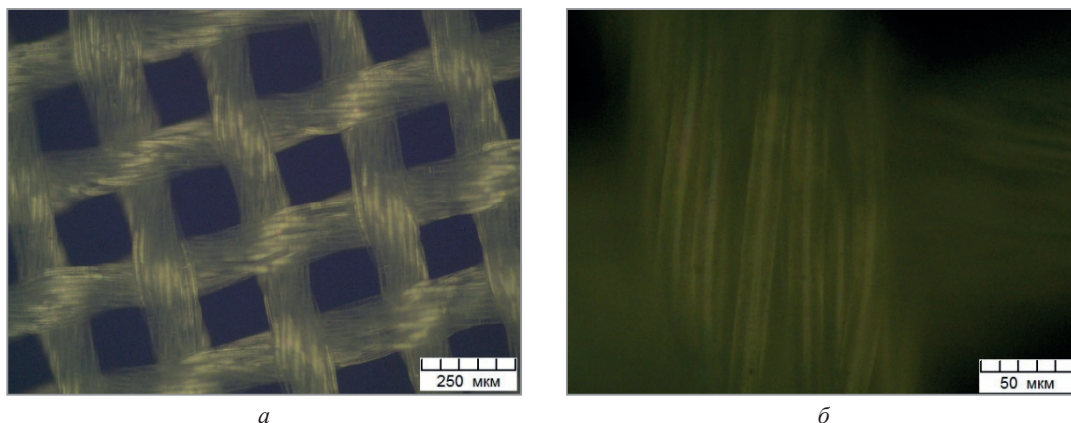


Рис. 1. Морфология поверхности ткани 05C8-KB в исходном состоянии; оптическая микроскопия, темнопольное освещение

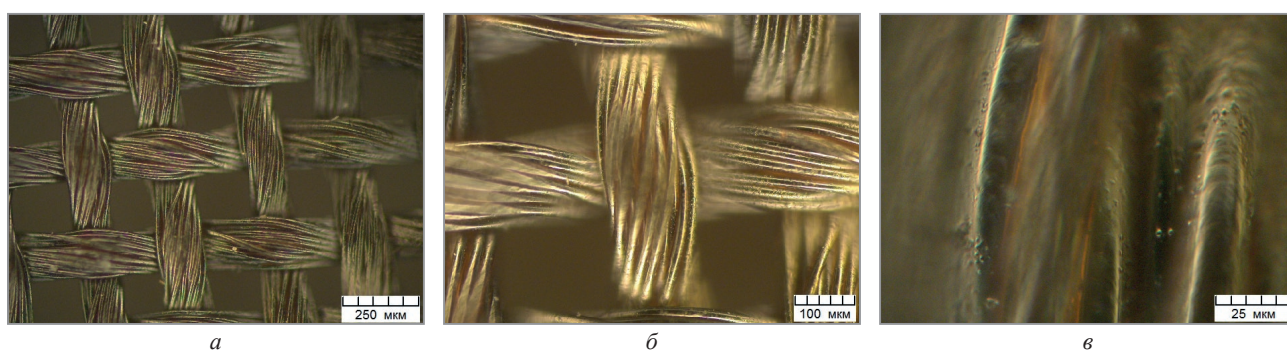


Рис. 2. Морфология поверхности ткани 05C8-KB с углеродным покрытием (мишень – сталь 12X18H10T) при различных увеличениях; оптическая микроскопия, темнопольное освещение

При исследовании поверхности волокна с покрытием в растровом микроскопе (рис. 3) в некоторых участках выявляются дефекты – разрушение волокна и участки без покрытия. Такие участки на растровом изображении выглядят светлыми в силу электризации непроводящей поверхности волокна.

Элементный состав покрытия приведен в табл. 1. В составе покрытия присутствуют элементы, входящие в состав стали 12X18H10T.

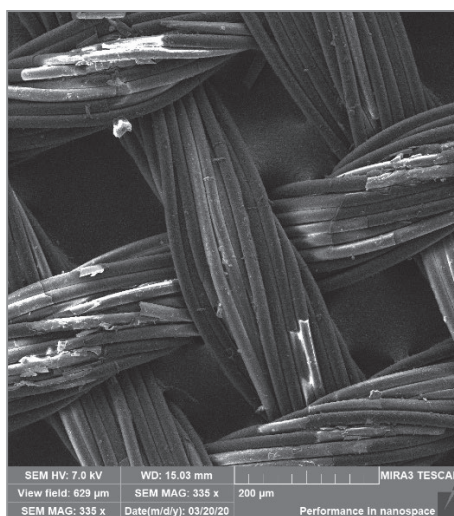


Рис. 3. Дефекты поверхности ткани 05C8-KB с покрытием сталь 12X18H10T-углерод; растровая микроскопия

Таблица 1. Элементный состав покрытия сталь 12X18H10T-углерод

Элемент	C	O	Cr	Fe	Ni
Содержание элементов, мас. %	78,83	3,85	0,08	12,88	1,83

На рис. 4 показан спектр магнитного резонанса ткани с комбинированным покрытием сталь 12X18H10T-углерод.

На спектре фиксируется широкая, спектральная линия шириной 94,4 мТл, что свидетельствует о высокой концентрации магниторезонансных центров; эффективное значение g -фактора составляет $2,26 \pm 0,01$. Значительное резонансное поглощение определяется кластерами железа, никеля, хрома при слабом нерезонансном поглощении. Кроме того, на спектре фиксируется узкая спектральная линия с эффективным значением g -фактора $2,04 \pm 0,01$, ширина линии составляет 4,3 мТл. Данное значение g -фактора соответствует графитоподобному углеродному покрытию. Результат измерения удельного поверхностного сопротивления на ткани с данным покрытием (сторона 1/сторона 2) составляет $2,3 \cdot 10^9$ и $4,8 \cdot 10^9$ Ом соответственно, что несколько ниже, чем у чисто углеродного покрытия.

На рис. 5, а–в приведена морфология поверхности покрытия алюминия и углерода. По цвету покрытие существенно не отличается от покрытия углерод-сталь, поскольку поверхность металлизирована углеродом.

В покрытии имеются протяженные дефекты длиной до 50 мкм и шириной 0,8 мкм. Ширина филаментов с покрытием составляет до 2 мкм (рис. 6).

Состав покрытия приведен в табл. 2. В составе присутствует железо, которое является естественной примесью алюминия. Также его присутствие может объясняться технологическим загрязнением.

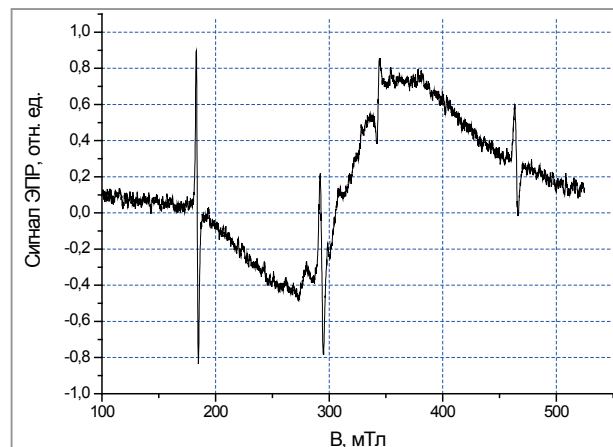


Рис. 4. Спектр магнитного резонанса ткани с комбинированным покрытием сталь 12X18H10T-углерод

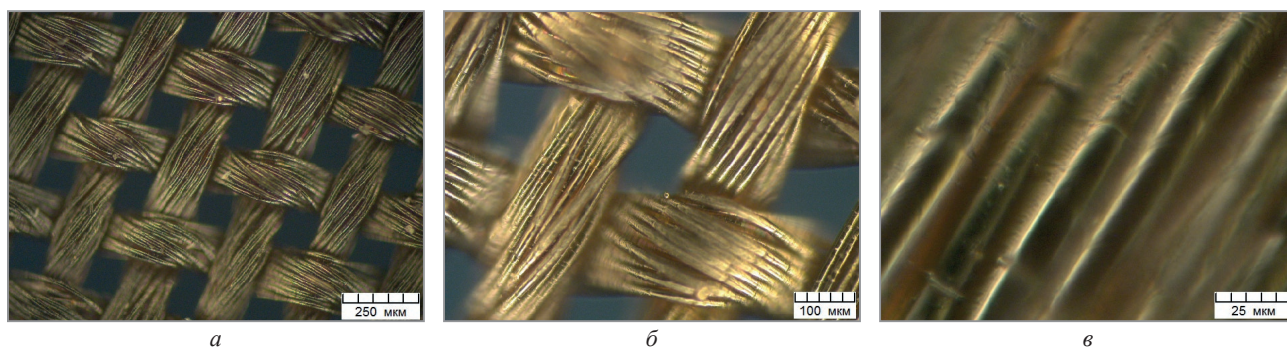


Рис. 5. Морфология поверхности ткани 05C8-КВ с покрытием алюминий-углерод; оптическая микроскопия, темнопольное освещение



Рис. 6. Дефекты поверхности ткани 05C8-КВ с покрытием алюминий – углерод; растровая микроскопия

Таблица 2. Элементный состав покрытия углерод-алюминий

Элемент	C	O	Al	Fe
Содержание элементов, мас. %	84,96	7,51	11,14	0,15

Результат измерения удельного поверхностного сопротивления на ткани с данным покрытием (сторона 1/сторона 2) составляет $3,3 \cdot 10^{10}$ и $6,8 \cdot 10^{10}$ Ом соответственно, что свидетельствует о плохих антистатических свойствах возможно вследствие образования диэлектрических оксидов алюминия.

Выводы

Исследована морфология поверхности ткани 05C8-KB с нанесенными комбинированными покрытиями из углерода, легированными кластерами металлов. Показано, что при нанесении покрытий на данный материал из углерода, легированного кластерами металлов из мишени нержавеющей стали, присутствует капельная фаза (размер капель составляет 2–3 мкм). Методом ЭМР установлено, что спектр ткани с покрытием из стали имеет широкую спектральную линию шириной 94,4 мТл, что свидетельствует о высокой концентрации магниторезонансных центров при ослабленном нерезонансном поглощении энергии СВЧ поля. Результат измерения удельного поверхностного сопротивления на ткани с данным покрытием (сторона 1/сторона 2) составляет $2,3 \cdot 10^9$ и $4,8 \cdot 10^9$ Ом соответственно, что несколько ниже, чем у чисто углеродного покрытия (сторона 1/сторона 2) ($3,7 \cdot 10^9$ и $8,8 \cdot 10^9$). Комбинированное покрытие из углерода и алюминия на ткани 05C8-KB антистатическими свойствами не обладает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горлов, М.И. Электростатические заряды в электронике / М.И. Горлов, А.В. Емельянов, В.И. Плебанович. Минск: Белорусская наука, 2006. 295 с.
2. Борзунов, И.Г. и др. Прядение хлопка и химических волокон: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1982. 376 с.
3. Анисович, А.Г. и др. Морфология поверхности, антистатические и магнитные свойства ткани 07C11-KB // Электроника плюс. 2019. № 4. С. 51–52.
4. Анисович, А.Г. и др. Воздействие лазерного излучения на лавсановую ткань, покрытую углеродом // Полимерные материалы и технологии. 2020. Т. 6. № 1. С. 72–77.
5. Гришанова И.А., Мигачева О.С. Состояние мирового и отечественного рынков синтетических волокон, нитей, нетканых материалов и его перспективы // Вестн. технолог. ун-та. 2015. Т. 18. № 9. С. 10–15.
6. Анисович, А.Г. Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2016. № 1. С. 36–42.
7. Адашкевич, С.В. и др. Магниторезонансная диагностика радиопоглощающих композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2015. Т. 1. № 1. С. 71–75.
8. Адашкевич С.В., Стельмах В.Ф., Маркевич М.И., Чапланов А.М. Патент «Способ измерения поглощения излучения СВЧ». Заявитель Белорусский государственный университет (BY).-№ U 19325; заявл. 15.10.12; опубл. 08.04.15 // Афіцыйны бюл. / Нац. Центр уласнасці. 2015.-BY(11) 19325 C1 (13)- G 01N 24/10.

REFERENCES

1. Gorlov M. I., Emel'janov A. V., Plebanovich V. I. *Elektrostaticheskie zarjady v jelektronike* [Electrostatic charges in electronics]. Minsk, Belarusskaja nauka Publ., 2006, 295 p.
2. Borzunov I. G., Badalov K. I., Goncharov V. G., Duginova T. A., Chernikov A. N., Shilova N. I. *Prjadenie hlopka i himicheskikh volokon* [Spinning of cotton and man-made fibers]. Moscow, Legkaja i pishhevaja promyshlennost' Publ., 1982, 376 p.
3. Anisovich A. G., Akula I. P., Laskovnev A. P., Markevich M. I., Stel'mah V. F., Chekan N. M. Morfologija poverhnosti, antistaticheskie i magnitnye svojstva tkani 07C11-KV [Surface morphology, antistatic and magnetic properties of fabric 07C11-KB]. *Jelettronika pljus = Electronics plus*, 2019, no. 4, pp. 51–52.
4. Anisovich A. G., Zalesskij V. G., Markevich M. I., Malyshko A. N., Zhuravleva V. I., Chekan N. M., Chao Chjen'. Vozdejstvie lazernogo izlucheniya na lavsanovuju tkan', pokrytuju uglerodom [Effect of laser radiation on carbon-coated lavsan fabric]. *Polimernye materialy i tehnologii = Polymer materials and technologies*, 2020, no. 1, vol. 6, pp. 72–77.
5. Grishanova I. A., Migacheva O. S. Sostojanie mirovogo i otechestvennogo rynkov sinteticheskikh volokon, nitej, netkanykh materialov i ego perspektivy [The state of the world and domestic markets for synthetic fibers, threads, nonwovens and its prospects]. *Vestnik tehnologicheskogo universiteta = Technological University Bulletin*, 2015, no. 9, vol. 18, pp. 10–15.
6. Anisovich A. G. Iskustvo metallografii: ispol'zovanie metodov opticheskogo kontrastirovaniya [The Art of Metallography: Using Optical Contrasting Techniques]. *Vesci NAN Belarusi. Ser. fiz.-tjehn. nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technic al Series*, 2016, no. 1, pp. 36–42.
7. Adashkevich S. V., Stel'mah V. F., Bakaev A. G., Gordienko A. I., Markevich M. I., Chaplanov A. M., Shherbakova E. N. Magnitarezonansnaja diagnostika radiopogloshhajushhih kompozicionnykh materialov [Magnetic resonance diagnostics of radio-absorbing composite materials]. *Polimernye materialy i tehnologii = Polymer materials and technologies*, 2015, no. 1, vol. 1, pp. 71–75.
8. Adashkevich S. V., Stel'mah V. F., Markevich M. I., Chaplanov A. M. *Sposob izmerenija pogloshhenija izlucheniya SVCh* [Method for measuring absorption of microwave radiation]. Patent (BY), no. U 19325, 2012.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-118-124>
УДК 669.13.017: 620.18

Поступила 17.09.2020
Received 17.09.2020

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ В ВЫСОКОПРОЧНОМ ЧУГУНЕ ПРИ ЕГО ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

М. С. КОВАЛЬКО, А. Т. ВОЛОЧКО, А. В. ЗИЗИКО, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»,
ул. Купревича, 10, г. Минск, Беларусь. E-mail: kovalko.m@mail.ru
В. В. РУБАНИК, ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», пр. Генерала Людникова, 13,
г. Витебск, Беларусь

В работе рассмотрена возможность интенсификации процессов изотермической выдержки при закалке высокопрочных чугунов за счет использования внешнего источника физического воздействия в виде ультразвуковых волн. Для экспериментальной оценки данного эффекта в условиях лаборатории МиАМ ФТИ НАН Беларуси в тигельной индукционной печи ИСВ 0,004 были отлиты опытные образцы из высокопрочных чугунов. В качестве жидкой охлаждающей среды при закалке использовалась смесь солей NaNO_2 и KNO_3 в соотношении 1:1. Ультразвуковую обработку расплава соли при охлаждении образцов проводили с помощью генератора УЗГ-20–15 совместно с ИТА НАН Беларуси. Механические свойства и структуру обработанных чугунов определяли как в литом состоянии, так и после изотермической закалки.

Для исследования влияния ультразвуковой обработки закалочной ванны на формирование структуры и свойств высокопрочных чугунов при их изотермической закалке был проведен ряд сравнительных экспериментов, заключающихся в охлаждении образцов с 910 до 350 °С с подводом и без использования динамических волн к ванне. С помощью металлографического анализа, измерений твердости и коэффициента трения показано благоприятное воздействие ультразвуковой обработки охлаждающей среды на структуру и свойства, что отражается в повышении равномерности распределения твердости по сечению чугуна и его износостойкости, а также сокращении времени изотермической выдержки до 2 раз.

Ключевые слова. Высокопрочный чугун, ультразвук, изотермическая закалка, аусферрит, превращение, коэффициент трения.

Для цитирования. Ковалько, М. С. Формирование структуры и свойств в высокопрочном чугуне при его изотермической закалке с использованием ультразвука / М. С. Ковалько, А. Т. Волочко, А. В. Зизико, В. В. Рубаник // *Литье и металлургия*. 2020. № 4. С. 118–124. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-118-124>.

STRUCTURE AND PROPERTIES FORMING IN DUCTILE IRON DURING ISOTHERMAL HARDENING USING ULTRASOUND

M. S. KOVALKO, A. T. VOLOCHKO, A. V. ZIZIKO, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 10, Kuprevich Str., Minsk, Belarus. E-mail: kovalko.m@mail.ru
V. V. RUBANIK, Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus,
13, General Lyudnikov Ave., Vitebsk, Belarus

The paper considers the possibility of intensifying isothermal holding processes during quenching of high-strength cast irons by using an external source of physical impact in the form of ultrasonic waves. For experimental evaluation of this effect in the laboratory of MiAM of the Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, prototypes of high-strength cast irons were cast in an ISV 0.004 crucible induction furnace. A mixture of NaNO_2 and KNO_3 salts in a 1:1 ratio was used as a liquid cooling medium during quenching. Ultrasonic treatment of the salt melt during the cooling of the samples was carried out using an UZG-20–15 generator in cooperation with the ITA of NAS of Belarus. The mechanical properties and structure of the treated cast irons were determined both in the cast state and after isothermal quenching.

To study the effect of ultrasonic treatment of the quenching bath on the formation of the structure and properties of high-strength cast irons during isothermal quenching, a number of comparative experiments were carried out, consisting in cooling the samples from 910 °C to 350 °C with and without the use of dynamic waves to the bath. With the help of metallographic analysis, measurements of hardness and friction coefficient, the beneficial effect of ultrasonic treatment of the cooling medium on the structure and properties is shown, which is reflected in an increase in the uniformity of the distribution of hardness over the cross section of cast iron and in its wear resistance, as well as a reduction in the isothermal holding time by up to two times.

Keywords. Ductile iron, ultrasound, isothermal hardening, ausferrite, transformation, friction coefficient.

For citation. Kovalko M. S., Volochko A. T., Ziziko A. V., Rubanik V. V. Structure and properties forming in ductile iron during isothermal hardening using ultrasound. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 118–124. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-6-124>.

Высокопрочные чугуны находят все большее применение в промышленности благодаря хорошему сочетанию прочностных и пластических свойств, а также относительно низкой себестоимости [1]. Комбинация достаточно высокой прочности (до 1000 МПа и выше) и удовлетворительной пластичности (относительное удлинение до 5–15 %) в данных чугунах может достигаться за счет специально проводимой термообработки – изотермической закалки. При закалочном охлаждении до температур промежуточных превращений (300–400 °С) и последующей выдержки в расплавах солей или металлов в высокопрочном чугуне образуются так называемые структуры аусферрита, состоящие из смеси игольчатого феррита и остаточного аустенита. Таким образом, после проведения изотермической закалки структура чугуна состоит из включений шаровидного графита и металлической матрицы в виде феррито-аустенитной смеси [2]. Данное сочетание структурных составляющих и позволяет достигать уникальных для чугунов показателей механических свойств.

При использовании закалки отливок с толщиной стенки более 10 мм рекомендуется использовать чугуны с добавками различных легирующих элементов, увеличивающих их прокаливаемость [3]. В случае изотермической обработки чугунных отливок с небольшими толщинами (менее 10 мм) использование легирования нерентабельно, однако при этом закалка в жидкие среды может сопровождаться некоторыми трудностями. Нагретые до 900 °С отливки могут повышать температуру закалочной ванны расплава металла или соли, причем наибольший градиент температур возникает около границ «отливка-охлаждающая жидкость». В связи с этим приповерхностные слои чугуна закаляются при более высокой температуре, что негативно сказывается на получаемой структуре и свойствах отливки в целом. Для устранения этого явления обычно используют закалочные ванны значительно больших объемов, чем объем закаливаемого чугуна, а также увеличивают время изотермической выдержки для выравнивания температуры по всему объему ванны или же применяют в конструкциях печей-ванн контролируемое охлаждение [4].

Эффективным средством, позволяющим интенсифицировать и ускорить процесс закалки высокопрочных чугунов в жидких охлаждающих средах, может стать ультразвуковая обработка используемых сред. Известно, что распространение динамических волн в жидких средах сопровождается возникновением в них эффектов ультразвуковой кавитации и звукового ветра [5,6]. Данные явления могут быть эффективно использованы для воздействия на тепломассообменные процессы в расплавах солей или металлов при изотермической закалке.

Известно [7], что ультразвуковая обработка жидких охлаждающих сред позволяет разрушать «паровую рубашку» на стадии так называемого пленочного кипения при закалке соответственно, увеличивая скорость теплообмена между закаливаемым материалом и охлаждающей жидкостью. Это приводит к значительному увеличению скорости охлаждения при температурах 500–650 °С, при которых, как правило, устойчивость переохлажденного аустенита минимальна, а также позволяет повысить равномерность закалочного охлаждения.

Звуковой ветер при обработке жидкости также приводит к макроперемешиванию ее объемов, позволяя более быстро выровнять температуру вблизи поверхностей закаливаемых сплавов. Это явление эффективно и при дальнейшей изотермической выдержке, так как приводит к постоянной циркуляции микрообъемов охлаждающей жидкости [7, 8].

Таким образом, изучение влияния ультразвуковой обработки жидких охлаждающих сред при закалке на характер превращения и уровень получаемых свойств в чугунах является весьма актуально.

Методика исследований

В качестве жидкой охлаждающей среды при изотермической закалке использовали наиболее часто применяемую смесь солей 50 % NaNO_2 и 50 % KNO_3 . Также были подготовлены чугунные образцы (методом индукционной плавки) диаметром 30 мм и толщиной 5 мм. Химический состав и микроструктура в литом состоянии исследуемого материала приведены в табл. 1.

Полученные образцы подвергали аустенизации при 910 °С в камерной печи СНОЛ-1,6,2,5.1/11 в течение 20 мин. Дальнейшее закалочное охлаждение и выдержку при 350 °С проводили в расплаве соли в шахтной печи СШО-1.1,6/11 как без использования УЗ колебаний, так и с применением УЗ обработки жидкой среды. УЗ колебания генерировали с помощью генератора УЗГ 20–15 с частотой 22,4 кГц и мощностью 0,7 кВт. Подвод колебаний осуществляли через металлический волновод путем его ввода

Т а б л и ц а 1. Химический состав и микроструктура чугуна

Химический состав						Микроструктура (по ГОСТ 3443–87)
массовая доля элементов, %						
C	Si	Mn	P	S	Mg	ШГф5-ШГд15-ШГр1-ШГ4-П20(Ф80)
3,21	2,43	0,25	0,020	0,007	0,05	

непосредственно в ванну с расплавом соли (рис. 1, *а*). Для оценки кинетики структурообразования чугуна при промежуточном превращении время выдержки образца варьировалось от 1 до 5 мин (по 1 мин на 1 мм сечения).

Твердость исходных и термообработанных при различном времени выдержки образцов измеряли методом Бринелля (ГОСТ 9012–59) в пяти точках (с шагом 6 мм от торца) на поверхности приготовленных шлифов.

Оценку триботехнических свойств проводили путем определения коэффициента трения на испытательном стенде по схеме «сфера (ШХ15) – диск (чугун)» со следующими параметрами: время испытаний – 1800 с, нагрузка – 1,0 Н, радиус трассы трения – 7 мм.

Микроструктуру оценивали на травленных и нетравленных шлифах на металлографическом комплексе МИКРО-200. Травление проводили 4%-ным раствором HNO_3 в этиловом спирте.

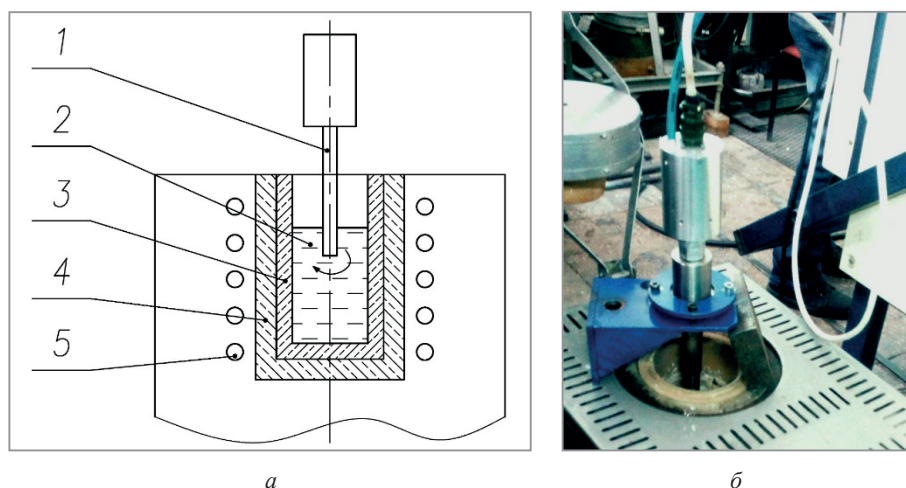


Рис. 1. Схема (*а*) и общий вид (*б*) ультразвуковой обработки расплава соли:
1 – волновод; 2 – расплав соли; 3 – керамический стакан; 4 – футеровка печи; 5 – нагреватели

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены структуры металлической матрицы чугунов, для которых время выдержки при закалке составляло 1 мин.

В случае использования ультразвуковой обработки в структуре отмечается появление ориентации феррита к игольчатому типу (рис. 2, *б*), а его рост происходит перпендикулярно плоскости среза графитового сфероида, что характерно для начала образования аусферритных структур в чугуне. Без применения УЗ обработки охлаждающей среды в матрице заметно преобладают структуры зернистого типа с зернами остаточного аустенита (рис. 2, *а*). Так как структуры зернистого типа в чугуне при закалке образуются при выдержке выше 450 °С, можно заключить, что погружение нагретого до 910 °С в расплав соли способствует повышению температуры ванны вблизи поверхности образца, а сравнительно небольшая выдержка (1 мин) не привела к достаточному выравниванию температуры закалочной среды. Таким образом, следует отметить, что ультразвуковое воздействие позволяет значительно ускорить процесс формирования структур промежуточного типа в чугунах при изотермической закалке уже на ранних стадиях выдержки за счет быстрого выравнивания градиента температур у поверхности обрабатываемого материала и закалочной среды в целом.

Дальнейшее увеличение изотермической выдержки приводит к постепенному возрастанию степени промежуточного превращения (т.е. формирования игольчатых структур феррита в аустенитной матрице). Так, на рис. 3 представлены структуры чугунов после 5 мин выдержки без и с ультразвуковой обработкой.

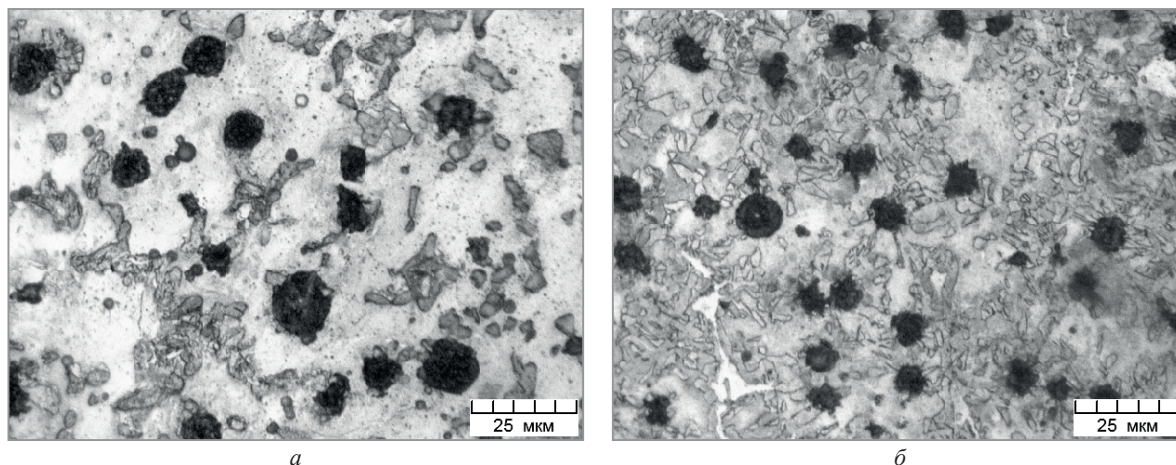


Рис. 2. Микроструктура чугуновых образцов после изотермической закалки без (а) и с УЗ обработкой (б), время выдержки – 1 мин. х500

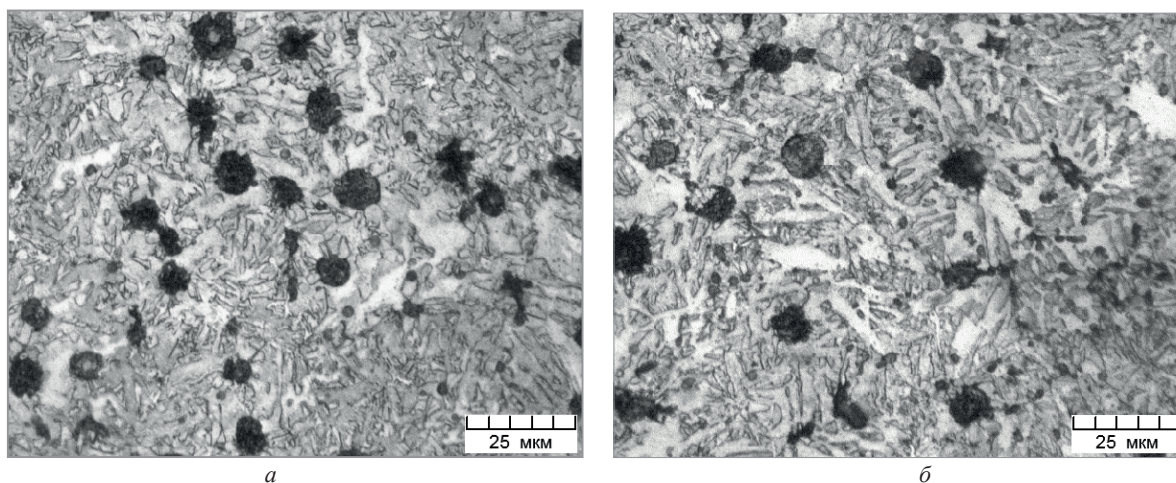


Рис. 3. Микроструктура чугуновых образцов после изотермической закалки без (а) и с УЗ обработкой (б), время выдержки – 5 мин. х 500

В данном случае необходимо отметить, что микроструктура как при обычной, так и при ультразвуковой закалке представляет собой смесь игольчатых структур феррита и остаточного аустенита, отличается лишь степень промежуточного превращения структуры в целом, так как в случае ультразвуковой обработки соли наблюдается более выраженная игольчатая морфология феррита в околографитовых объемах (рис. 3, а). Следовательно, увеличение времени выдержки хоть и приводит к выравниванию температуры в объеме закалочной ванны, но интенсификация процесса охлаждения за счет УЗ обработки позволяет значительно ускорить данный процесс.

Для количественной оценки степени изотермического превращения при различных видах закалки были проведены исследования механических свойств данных образцов. Твердость изотермически закаленных чугунов при различном времени выдержки (с УЗ обработкой и без) приведена на рис. 4.

Как видно из рисунка, при закалке с использованием ультразвуковой обработки закалочной ванны наблюдается более быстрое увеличение и более равномерное распределение твердости чугунов. Ультразвуковые колебания в этом случае создают благоприятные условия для перемешивания объемов охлаждающей среды, что соответственно сказывается на ее охлаждающей способности и твердости закаливаемого материала. Без применения ультразвуковых волн в начальный момент охлаждения образуется так называемая паровая рубашка, препятствующая интенсивному охлаждению поверхности, что сказывается на неравномерной закалке поверхности образца (рис. 4, а). Дальнейшее увеличение времени изотермической выдержки позволяет выровнять твердость по сечению чугуна (рис. 4, з, д), однако уже не приводит к такому же повышению твердости чугуна, как в случае использования ультразвуковой обработки за этот период времени. Применение озвучивания охлаждающей среды позволяет добиться более равномерного охлаждения образца, а также более значительного повышения твердости закаливаемого чугуна при небольшом времени выдержки. Общее изменение твердости

закаленных чугуновых образцов с использованием ультразвука и без в зависимости от времени выдержки показано на рис. 5.

Из рисунка видно, что в целом с постепенным увеличением времени выдержки твердость образцов закаленных без ультразвукового воздействия практически выравнивается с твердостью образцов, закаленных в среде ультразвука. Однако, как отмечалось ранее, за счет интенсификации процесса охлаждения на ранних стадиях выдержки и образования морфологически более совершенных игол феррита время

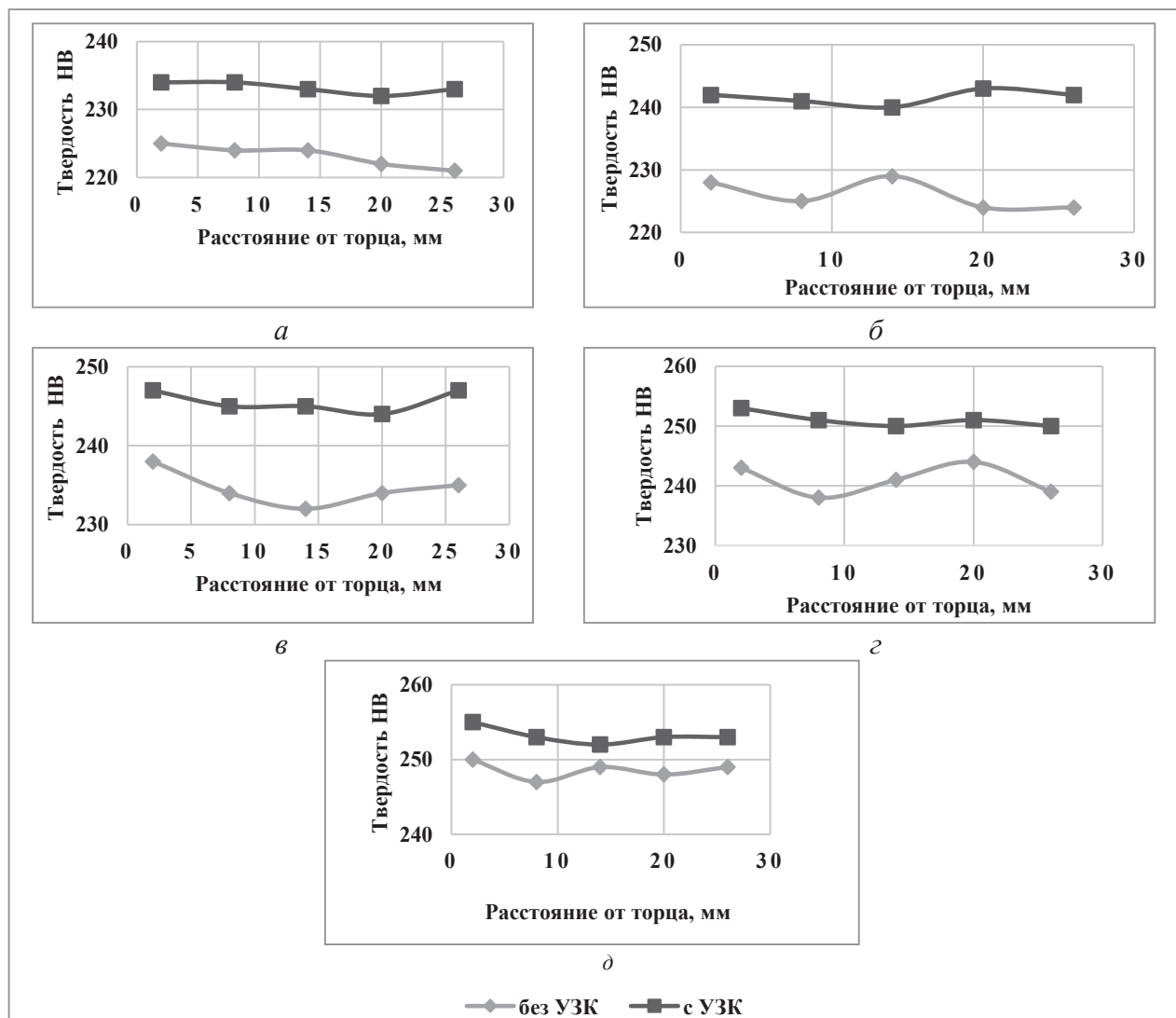


Рис. 4. Изменение твердости в плоскости шлифа изотермически закаленных образцов из высокопрочного чугуна при различном времени выдержки: а – 1 мин; б – 2; в – 3; г – 4; д – 5 мин

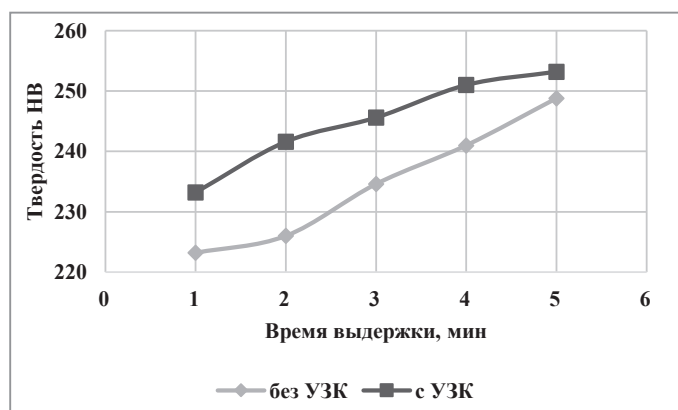


Рис. 5. Изменение твердости различно закаленных чугуновых образцов в зависимости от времени выдержки

изотермической выдержки при использовании УЗ обработки может уменьшаться до 2 раз (твердость 241 НВ достигается через 4 мин, а при дополнительной УЗ обработке ванны уже через 2 мин). На рис. 6 показаны результаты проведенных триботехнических испытаний.

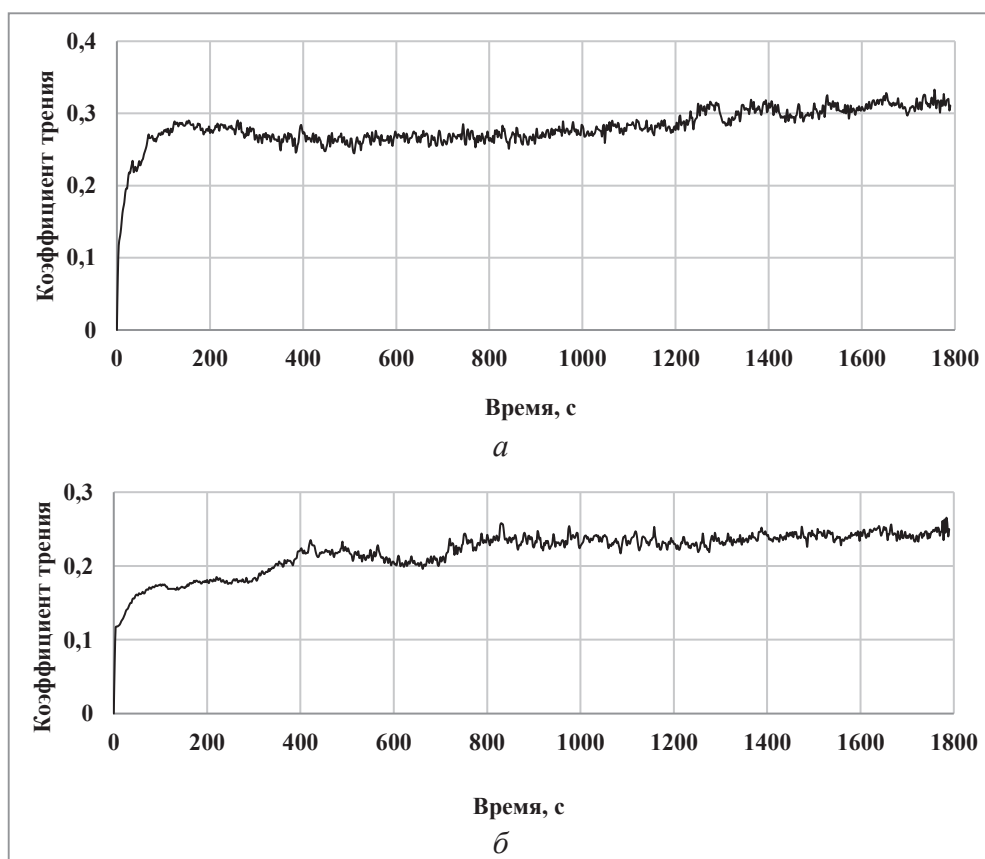


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от времени после изотермической закалки чугуна при 350 °С, 5 мин: а – без УЗ обработки соли; б – с УЗ обработкой соли

По изменению коэффициента трения можно судить о степени изотермического превращения в чугуне, так как известно, что чугуны с аусферритной металлической матрицей обладают более высокими антифрикционными свойствами. Из рис. 6 видно, что в обоих случаях наблюдается начальный участок с существенным приростом коэффициента трения (0–50 с). Данный участок соответствует времени притирки трибопары, причем для чугуна, закаленного без УЗ обработки соли (рис. 6, а), этот период занял больше времени, чем для чугуна, закаленного с УЗ обработкой соли (рис. 6, б). Можно отметить, что использование УЗ обработки расплава соли позволяет снизить коэффициент трения с 0,33 до 0,25 в сравнении с традиционной изотермической закалкой. К тому же значения в этом случае сохраняются на стабильном уровне в узком интервале на всем промежутке времени с 800 с, что говорит об увеличении износостойкости чугунов после ультразвуковой изотермической закалки.

Выводы

1. Использование ультразвуковой обработки охлаждающей среды при изотермической закалке высокопрочных чугунов в соляных ваннах является эффективным средством интенсификации процесса, позволяющим значительно увеличить скорость тепломассобмена между закаленным чугуном и расплавом соли, что приводит к ускорению аусферритного превращения при 350 °С.
2. Ультразвуковая обработка расплава соли при закалке приводит к более равномерному распределению и увеличению твердости чугуна, снижая при этом уровень закалочных напряжений и коэффициент трения. Получение более высоких показателей свойств при ультразвуковой закалке на более ранних стадиях изотермической выдержки позволяет сократить время термообработки до 2 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ланда, А. Ф.** Основы получения чугуна повышенного качества: состав, структура, термообработка. М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроительной литературы, 1960. 237 с.
2. **Ковалько, М. С.** Анализ возможностей получения аусферритных структур в высокопрочных чугунах без применения жидких охлаждающих сред / М. С. Ковалько, А. Т. Волочко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. В 3-х кн. Кн. 1. Материаловедение. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2018. С. 85–93.
3. Влияние термической обработки на структуру и свойства экономнолегированного высокопрочного чугуна / А. Н. Крутилин [и др.] // Литье и металлургия. 2008. № 1 (45). С. 102–108.
4. **Бобро, Ю. Г.** Изотермическая закалка чугуна / Ю. Г. Бобро, В. М. Пивоваров. Харьков: Прапор, 1968. 112 с.
5. **Эскин, Г. И.** Ультразвуковая обработка расплавленного алюминия. М.: Металлургия, 1988. 231.
6. **Марукович, Е. И.** Применение ультразвука при литье силуминов в кристаллизатор / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. П. Гутев и др. // МНК «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы». 6–29 сентября 2016 г. Витебск, Беларусь, 2016. С. 34–36.
7. **Биронт, В. С.** Теория термической обработки металлов. Комбинированные методы: учеб. пособ. Красноярск: СФУ: ИЦМиЗ, 2007. 152 с.
8. **Абрамов, О. В.** Ультразвуковая обработка материалов / О. В. Абрамов, И. Г. Хорбенко, Ш. Швегла. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.

REFERENCES

1. **Landa A. F.** *Osnovy poluchenija chuguna povyshennogo kachestva: sostav, struktura, termoobrabotka* [The basics of obtaining high quality cast iron: composition, structure, heat treatment]. Moscow, Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noj literatury Publ., 1960, 237 p.
2. **Koval'ko M. S., Volochko A. T.** Analiz vozmozhnostej poluchenija ausferritnyh struktur v vysokoprochnyh chugunah bez primeneniya zhidkih ohlazhdajushhih sred [Analysis of the possibilities of obtaining ausferritic structures in high-strength cast irons without the use of liquid cooling media]. *Sovremennye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov. V 3 kn. Kn. 1 = Modern methods and technologies for creating and processing materials: collection of scientific papers*, Minsk, FTI NAN Belarusi Publ., 2018, pp. 85–93.
3. **Krutilin A. N. et al.** Vlijanie termicheskoy obrabotki na strukturu i svojstva jekonomnolegirovannogo vysokoprochnogo chuguna [Effect of heat treatment on the structure and properties of economically alloyed ductile iron]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2008, no. 1(45), pp. 102–108.
4. **Bobro Ju. G., Pivovarov V. M.** *Izotermicheskaja zakalka chuguna* [Isothermal quenching of cast iron]. Har'kov, Prapor Publ., 1968, 112 p.
5. **Jeskin G. I.** *Ul'trazvukovaja obrabotka rasplavlennogo aljuminija* [Ultrasonic treatment of molten aluminum]. Moscow, Metallurgija Publ., 1988, 231 p.
6. **Marukovich E. I., Stecenko V. Ju., Gutev A. P., Rubanik V. V., Lucko V. F.** *Primenenie ul'trazvuka pri lit'e siluminov v kristallizator* [The use of ultrasound when casting silumins into a crystallizer]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Tehnicheskaja akustika: razrabotki, problemy, perspektivy»* 6–29 sentjabrja 2016 g. Vitebsk, Belarus' [Materials of the International Scientific Conference "Technical acoustics: developments, problems, prospects" (September 6–29, 2016 Vitebsk, Belarus). UO «VGTU» Publ., Vitebsk, 2016, pp. 34–36.
7. **Biront V. S.** *Teorija termicheskoy obrabotki metallov. Kombinirovannye metody* [Theory of heat treatment of metals.— Combined methods]. Krasnojarsk, SFU ICMiZ Publ., 2007, 152 p.
8. **Abramov O. V., Horbenko I. G., Shveгла Sh.** *Ul'trazvukovaja obrabotka materialov* [Ultrasonic material processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 280 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-125-130>
УДК 621.7.044

Поступила 20.10.2020
Received 20.10.2020

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Д. В. МИНЬКО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,
пр. Независимости, 65. E-mail: dminko@bntu.by

Механические свойства металлов изменяются временно или постоянно под действием электрического тока высокой плотности в зоне деформации. Это явление называется электропластичностью и его использование позволяет интенсифицировать процесс обработки давлением электропроводящих материалов, в том числе труднообрабатываемых с помощью существующих технологий. К настоящему времени нет устоявшейся точки зрения на физическую природу проявления электропластичности, хотя сам по себе этот эффект уже нашел практическое применение. Электропластичность металлов и их сплавов изучалась при различных условиях нагружения, включая испытания на растяжение, сжатие, изгиб. В статье анализируются описанные в научных публикациях теоретические механизмы возникновения электропластичности, результаты исследований электропластических свойств различных металлов или металлических сплавов и рекомендации по практическому применению электропластического эффекта.

Ключевые слова. Электропластичность, электрический ток, импульс, деформация, предел текучести, растяжение, сжатие, изгиб.

Для цитирования. Минько, Д. В. Анализ перспектив применения электропластического эффекта в процессах обработки металлов давлением / Д. В. Минько // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 125–130. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-125-130>.

ANALYSIS OF THE PROSPECTS OF THE APPLICATION OF THE ELECTROPLASTIC EFFECT IN THE PROCESSES OF PROCESSING METALS WITH PRESSURE

D. V. MINKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty Ave. E-mail: dminko@bntu.by

The mechanical properties of metals change temporarily or permanently under the influence of a high density electric current in the deformation zone. This phenomenon is called electroplasticity, and its use makes it possible to intensify the process of pressure treatment of electrically conductive materials, including those that are difficult to machine using existing technologies. By now, there is no established point of view on the physical nature of the manifestation of electroplasticity, although this effect itself has already found practical application. The electrical plasticity of metals and their alloys was studied under various loading conditions, including tensile, compression, and bending tests. The article analyzes the theoretical mechanisms of the occurrence of electroplasticity described in scientific publications, the results of studies of the electroplastic properties of various metals or metal alloys, and recommendations for the practical application of the electroplastic effect.

Keywords. Electroplasticity, electric current, impulse, deformation, yield point, tension, compression, bending.

For citation. Minko D. V. Analysis of the prospects of the application of the electroplastic effect in the processes of processing metals with pressure. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 125–130. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-125-130>.

Введение

Применение методов воздействия на материалы импульсных электрических токов дает возможность существенно повысить эффективность производства, что вызывает в последнее время большой научный интерес и, как следствие, появление большого количества теоретических и экспериментальных работ по данной тематике. Обработка материалов давлением, дополняющаяся электроимпульсным воздействием, является комплексным процессом, поскольку на его протекание оказывают влияние скорость деформации, температура и параметры электрических импульсов. Высокая скорость деформации приводит к увеличению сопротивления деформированию материала. С другой стороны, с увеличением температуры сопротивление материала деформированию снижается. Электроимпульсное воздействие

при определенных условиях может приводить как к увеличению сопротивления деформированию материала, так и его снижению. При высоких плотностях тока на процесс деформации оказывает влияние электропластический эффект (ЭПЭ) [1], который наряду с нагревом джоулевым теплом приводит к снижению сопротивления материала деформированию и улучшению его структурной однородности.

Результаты анализа

ЭПЭ был обнаружен в 1969 г. советским ученым О. А. Троицким [2], который установил, что воздействие одиночных импульсов электрического тока плотностью $\sim 10^5 \text{ А/см}^2$ и длительностью $\sim 10^{-4} \text{ с}$ во время деформации кристаллов цинка при растяжении-сжатии скачкообразно снижало напряжение пластического течения. Воздействие тока не сопровождалось каким-либо существенным тепловым эффектом. Максимальное действие импульсного электрического тока проявляется на пределе текучести металлов [3]. Под действием одиночного импульса тока на кривой течения возникает скачок деформирующего напряжения. Величина скачка зависит от амплитуды импульса тока. При пропускании серии импульсов формируется характерная скачкообразная кривая деформации. В последующие годы ЭПЭ был детально исследован в металлах, а его технологические приложения – в процессах обработки практически значимых металлов и сплавов давлением: при волочении (Университет Гонконга, Китай) [4], прокатке (Университет Цинхуа, Шэньчжэнь, КНР) [5], вытяжке, штамповке (Университет Клемсона, Гринвилл, США) [6], твердофазном спекании (Технический университет Дармштадта, Германия) [7] и сварке (Университет Нова-де-Лиссабон, Капарик, Португалия) [8].

В настоящее время существуют три основные теории, которые направлены на объяснение ЭПЭ в металлах: электронно-дислокационное взаимодействие, джоулевый нагрев и магнитопластичность.

Согласно теории электронно-дислокационного взаимодействия, в результате электроимпульсного воздействия могут возникать два эффекта: «электронный ветер» и разрушение металлических связей. В случае «электронного ветра» электроны протекают через металл со скоростью дрейфа, определяемой величиной прикладываемой разности потенциалов, плотности тока и характеристиками металла, что приводит к увеличению подвижности дислокаций и снижению внутренних напряжений [3]. Практическим результатом электроимпульсного воздействия является увеличение пластичности, уменьшение усилия деформирования и снижение упругого последействия. Чрезмерное присутствие электронов в кристаллической решетке при определенных условиях может также способствовать усилению пластической деформации за счет ослабления металлических связей [9], образующихся в кристаллической решетке за счет обмена электронами в электронном облаке, которое окружает положительно заряженные ионы. Появление дополнительных электронов в результате электроимпульсного воздействия приводит к снижению интенсивности обмена электронами и к ослаблению связей между ионами. Этот эффект может проявляться в случае чрезвычайно высокой плотности тока, когда ионы получают возможность перемещаться через кристаллическую решетку, что приводит к ее разрушению и значительному уменьшению усилия деформирования, напряжения пластической деформации и упругого последействия.

Теория джоулева нагрева также делится на две части: теорию объемного гомогенного джоулева нагрева и теорию гетерогенного микромасштабного джоулева нагрева. Объемный гомогенный джоулевый нагрев вызывается теплом, генерируемым при протекании электрического тока через материал в результате рассеяния электронов на ионных ядрах, дефектах решетки и дислокациях [3]. Он приводит к термическому размягчению металла, увеличению его пластичности и сопровождается уменьшением напряжения пластической деформации, усилия деформирования и упругого последействия. Таким образом, механизмы объемной гомогенной теории джоулева нагрева аналогичны механизмам объемного изотермического нагрева от внешнего источника. Однако для того чтобы объяснить уменьшение напряжения пластической деформации, превышающее достигнутое при изотермическом нагреве, в эту теорию был включен микромасштабный джоулевый нагрев. Предполагается, что повышенное удельное сопротивление, обусловленное дислокациями, дефектами решетки, дефектами укладки, смещением решетки и границами зерен, приводит к образованию локализованных областей повышенной температуры вокруг неоднородностей и способствует увеличению подвижности дислокаций в этих областях [10]. Результатом такого неоднородного нагрева являются наблюдаемые при электроимпульсном воздействии скачки напряжения пластической деформации. По разным оценкам предполагается, что возникновение ЭПЭ только 40–70 % зависит от объемного джоулева нагрева [11], остальное приходится на микромасштабный джоулевый нагрев.

В теории магнитоупругости утверждается, что пропускание импульсного электрического тока приводит к возникновению собственного магнитного поля, вызывающего два эффекта: так называемое спиновое разупрочнение металла [12] и пинч-эффект [13], способствующих более легкому перемещению дислокаций и, следовательно, уменьшению напряжения пластической деформации. В основе спинового разупрочнения металлов лежит преобразование магнитным полем синглетного в триплетное состояние реакционных пар, составленных из электронов, локализованных на заstopоренных примесными атомами дислокациях и на самих парамагнитных примесных атомах. Триплетные состояния находятся на более высоком энергетическом уровне и обеспечивают более легкое движение и преодоление дислокационных препятствий, что приводит к увеличению скорости перемещения дислокации и уменьшению напряжения пластической деформации. Действие пинч-эффекта основано на возникновении давления собственного магнитного поля импульсного тока, вызывающего вибрацию кристаллической решетки деформируемого материала за счет упругих колебаний ее узлов по типу ультразвуковых колебаний, что обеспечивает снижение напряжения пластической деформации.

В настоящее время электроупругий эффект обнаружен и экспериментально исследован у многих металлов и сплавов, которые в отсутствие импульсов электрического тока демонстрируют гладкие (без скачков) кривые деформации, и, несмотря на продолжающуюся дискуссию относительно механизмов этого явления, электроимпульсная обработка используется на практике в технологиях обработки металлов давлением [1]. Для уточнения теоретических моделей различными группами исследователей проводились испытания на растяжение, сжатие и изгиб в процессе ЭПЭ. Результаты испытаний показывают уменьшение напряжения текучести, энергии пластической деформации и упругого пружинения при воздействии электрического тока разной интенсивности и частоты.

Целью исследований [14, 15] являлась оценка особенностей ЭПЭ при растяжении стальной и титановой проволоки и установление связи между видом тока и химическим составом материала проволоки. Исследовали сварочную проволоку марок ПСГ 0301 (углеродистая сталь), ER 308LSi (нержавеющая сталь) и ВТ1–0 (технически чистый титан) диаметром 0,8, 1,0 и 0,8 мм соответственно, полученную многостадийной деформационной обработкой, включающей прокатку, волочение и промежуточные отжиги. Образцы из стальной проволоки перед растяжением отжигали на воздухе при температуре 1000 °С и охлаждали в печи, чтобы создать равновесную структуру феррит + перлит (стальная проволока) и аустенит (нержавеющая проволока). Титановую проволоку исследовали в состоянии до и после вакуумного отжига при 850 °С. Результаты показывают, что введение одиночных импульсов тока при растяжении вызывает скачки кривой на диаграмме напряжения, направленные вниз. Прочность и относительное удлинение образцов при всех режимах тока изменяются аналогичным образом и не зависят от вида тока. Амплитуда скачка в отожженной проволоке на 20–30 % выше, чем в неотожженной, что может быть связано с длиной свободного пробега дислокаций. Ассиметричный характер отдельного скачка предположительно объясняется мгновенной скоростью нагрева проволоки при введении импульса тока и последующим медленным ее охлаждением на воздухе. Одиночные импульсы тока практически повторяют форму кривой без тока, не влияют на прочность проволоки и в меньшей степени снижают пластичность до разрушения. С увеличением интенсивности вводимого тока прочность уменьшается, особенно сильно в отожженном состоянии, для многоимпульсного и постоянного тока. Анализ показывает, что причиной является образование шейки при растяжении образцов проволоки, в результате чего резко повышается плотность тока и соответственно температура, достигающая 50 °С при одиночных импульсах, 280 °С – при многоимпульсном токе и 250 °С – при постоянном токе. Сравнивая поведение кривых для разных режимов тока и максимальные температуры в процессе растяжения, можно предположить, что влияние тока в первую очередь связано с тепловым эффектом, который максимален для постоянного тока и минимален для одиночных импульсов. Таким образом, подтверждено, что результат проявления ЭПЭ зависит от химического состава материала и режимов вводимого тока. Вклад ЭПЭ увеличивается с уменьшением интенсивности тока (одноимпульсный ток) и практически замещается тепловым эффектом при ее повышении (многоимпульсный ток и постоянный ток).

Показано, что при сжатии и растяжении существует явление, известное как пороговая плотность тока. Ниже определенной плотности тока (в зависимости от материала и процесса) ЭПЭ будет незначительным, после достижения порогового значения эффекты будут большими. Предельные плотности тока проще фиксируются при сжатии для различных материалов, чем при растяжении. Во время двухстороннего сжатия образцов магния марки AZ31В было установлено, что при плотности тока 30 А/мм² металл растрескивался, а выше этой пороговой плотности трещины не были зафиксированы [16]. Кроме того,

установлено, что величина снижения напряжения при сжатии положительно коррелирует с размером зерна. Большие размеры зерен меди при испытании на сжатие меньше подвержены влиянию электропластичности, чем мелкие зерна из-за малой площади поверхности границ зерен [17].

При простом и сложном изгибе аналогично испытаниям на растяжение и сжатие воздействие импульсного электрического тока приводит к возникновению ЭПЭ. Изгибающие силы могут быть уменьшены, а пластичность – увеличена. Без электроимпульсного воздействия при изгибе на боковой поверхности образцов титана наблюдалось трещинообразование, при введении импульсного тока трещины исчезали. Было показано, что электрический ток оказывает значительное влияние на снижение упругого возврата в высокоуглеродистых легированных сталях, повышая точность изготовления изделий. Упругость материала может быть эффективно уменьшена путем введения электрического тока через площадь концентрации остаточного напряжения. По мере увеличения плотности тока и уменьшения длительности импульса упругий возврат снижался до 77 % до тех пор, пока плотность тока не достигла порогового значения 120 А/мм² [18].

На примере соединения пары металлов сталь 20 + медь М1, сжатых давлением на уровне 50 МПа, определен наиболее предпочтительный диапазон изменения параметров импульсного тока, в котором можно эффективно управлять процессами пластического деформирования поверхностей, а значит, формированием сварного соединения [19].

Некоторые рекомендации по практическому применению ЭПЭ при любом виде обработки металлов давлением сформулированы автором его открытия [20]:

- в процессе обработки материала деформирующие напряжения должны превышать его предел текучести;
- для усиления ЭПЭ зона деформации, кроме действия импульсов тока, может подвергаться действию СВЧ-излучения;
- длительность импульсов тока прямоугольной и трапецеидальной формы должна быть близка к характерным временам скачков деформации 10^{-4} – 10^{-3} с и не превышать $(1,5\text{--}2,5) \cdot 10^{-2}$ с, если нежелательны значительные тепловые процессы;
- амплитудная плотность тока должна быть не менее 10^5 – 10^6 А/см² с тем, чтобы электроны проводимости передавали на дислокации и другие подвижные дефекты структуры импульсы силы и энергии достаточной величины для их продвижения и стимулирования пластической деформации металла;
- частота следования импульсов должна быть достаточной (как правило, сотни герц) для того, чтобы все участки движущейся сквозь зону деформации заготовки успевали прорабатываться током.

Действие ЭПЭ во время обработки металлов давлением приводит к следующим основным результатам:

- снижению сопротивления металла деформированию на 25–30 %;
- увеличению пластичности металла во время обработки;
- увеличению остаточной пластичности до 30 %;
- повышению степени совершенства аксиальной текстуры проволоки при волочении, приводящему к снижению ее электрического сопротивления на 15 %;
- улучшению структуры и фазового состава материала проволоки;
- при прокатке, волочении и вытяжке нержавеющей сталей практически полностью подавляется аустенитно-мартенситное фазовое $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение, что делает ненужными операции дорогостоящих и энергоемких аустенизирующих отжигов;
- уменьшению вероятности хрупкого разрушения материала во время обработки.

Выводы

Большинство экспериментальных исследований ЭПЭ выполнено на монокристаллах и поликристаллах, чистых металлах и их сплавах и посвящено проверке влияния джоулевого нагрева. Это объясняется трудностями прямого выявления на микромасштабном или атомном уровне таких динамических эффектов, как разрушение металлических связей, «электронного ветра» или возникновение магнитоэластичности, в то время как изменения напряжения пластической деформации при нагреве легко регистрируются. Вместе с тем, новые материалы, например, порошковые, композиционные, нанокристаллические, сплавы с метастабильными фазовыми состояниями остаются слабо или вообще не исследованными. Ограниченное применение ЭПЭ на практике связано с недостаточно понимаемой природой (механизма) этого явления и не исследованностью параметров, регулирующих процесс и влияющих на физические свойства

и эксплуатационные характеристики обрабатываемых материалов. Фундаментальной и нерешенной проблемой остается вопрос о соотношении теплового джоулевого нагрева и электроимпульсного воздействия, возможность регулирования вклада каждого из них в ЭПЭ. Важным также является выяснение роли характера (постоянный, переменный, импульсный) и режимов (плотность, длительность, частота) воздействующего электрического тока, фазового состояния и зеренной структуры исходного материала. В связи с этим установление механизмов возникновения ЭПЭ в порошковых композиционных материалах, структурно-фазовое состояние которых возможно регулировать химическим составом, дисперсностью спекаемых частиц и технологическими режимами получения, является важной и практически значимой научной задачей, решение которой позволит приблизиться к раскрытию природы электропластичности.

Технический прогресс и требования экологии, особенно в автомобильной, атомной и аэрокосмической промышленности, привели к разработке и получению новых легких, высокопрочных, жаростойких материалов, которые зачастую являются труднообрабатываемыми с помощью существующих технологий. Понимание природы ЭПЭ позволит более эффективно моделировать результаты его применения, разработать и внедрить в производство новые технологические процессы, понять и сформулировать требования к процессам управления энергосиловыми параметрами оборудования, прогнозировать стойкость и износ инструмента, а также взаимосвязь давления и деформации при таких широко распространенных процессах формообразования, как штамповка, прокатка и волочение. Применение ЭПЭ может значительно повысить энергоэффективность и уменьшить затраты на производство за счет увеличения производительности труда и снижения стоимости продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы и технологии обработки современных материалов. Теория, технология, структура и свойства. В 2-х т. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004.
2. Троицкий О.А. Электромеханический эффект в металлах. Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 2. № 10. С. 18–22.
3. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985. 160 с.
4. Guan L., Tang G., Chu P.K. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals // J. Mater. Res., 2010. Vol. 25. No. 7. P. 1215–1224.
5. Li X., Wang F., Tang G., Zhu J. Improvement of formability of Mg-3Al-1Zn alloy strip by electroplastic-differential speed rolling. Materials Science & Engineering, 2014. Vol. A 618. P. 500–504.
6. Jones J.J., Mears L., Roth J.T. Electrically-assisted forming of magnesium AZ31: Effect of current magnitude and deformation rate on forge ability // Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2012. Vol. 134(3), P. 034504.
7. Langer J., Hoffmann M.J., Guillon O. Direct comparison between hot pressing and electric field-assisted sintering of submicron alumina // Acta Materialia, 2009. Vol. 57(18). P. 5454–5465.
8. Santos T.G., Miranda R., Vilaca P. Friction stir welding assisted by electrical joule effect // Journal of Materials Processing Technology, 2014. Vol. 214(10). P. 2127–2133.
9. Salandro W., Jones J., Bunget C., Mears L., Roth J. Electrically assisted forming: Modeling and control. NY: Springer. 2014. 317 p.
10. Fan R., Magargee J., Hu P., Cao J. Influence of grain size and grain boundaries on the thermal and mechanical behavior of 70/30 brass under electrically-assisted deformation // Materials Science and Engineering A, 2013. Vol. 574. P. 218–225.
11. Sprecher A., Mannan S., Conrad H. Overview no. 49: On the mechanisms for the electroplastic effect in metals // Acta Metallurgica, 1986. Vol. 34(7). P. 1145–1162.
12. Molotskii M., Fleurov V. Magnetic effects in electroplasticity of metals. Physical Review B, 1995. Vol. 52(22). P. 15829–15834.
13. Троицкий О.А. Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом // Изв. АН СССР. Сер. Физическая. 1977. № 6. С. 118–122.
14. Белявин К.Е., Минько Д.В., Пономарев Т.С. и др. Электропластический эффект при растяжении стальной проволоки. 60-я Междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы прочности», 14–18 мая 2018 г. Витебск: УО «ВГТУ», 2018. С. 401–403.
15. Пономарев Т.С., Белявин К.Е., Минько Д.В. и др. Электропластический эффект при растяжении титановой проволоки // Перспективные материалы и технологии: сб. материалов междунар. симпозиума. Брест, 27–31 мая 2019 г. Витебск: УО «ВГТУ», 2019. С. 507–509.
16. Dzialo C., Siopis M., Kinsey B., Weinmann K. Effect of Current Density and Zinc Content during Electrical-Assisted Forming of Copper Alloys, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010. V. 59. No. 1. P. 299–302.
17. Siopis M.S., Kinsey B.L. Experimental Investigation of Grain and Specimen Size Effects during Electrical-Assisted Forming. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010. Vol. 132. No. 2.
18. Kim M.-S., Vinh N.T., Yu H.-H., et al. Effect of Electric Current Density on the Mechanical Property of Advanced High Strength Steels under Quasi-Static Tensile Loads. Int. J. Precis. Eng. Manuf., 2014. Vol. 15. No. 6. P. 1207–1213.
19. Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Половинка В.Д. Влияние параметров импульсов тока на развитие физического контакта при сварке металлов давлением // Электронная обработка материалов. 2013. № 49(4). С. 30–34.
20. Троицкий О.А. Электропластический эффект в металлах // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и эконом. информации. 2018. № 9. С. 65–76.

REFERENCES

1. Troitsky O.A., Baranov Yu.V., Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D. *Fizicheskie osnovy i tekhnologii obrabotki sovremennykh materialov. Teoriya, tekhnologiya, struktura i svoystva*. [Physical foundations and technologies of processing modern materials. Theory, technology, structure and properties]. Moscow-Izhevsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 2004. 590 p.
2. Troickij O.A. *Elektromekhanicheskij effekt v metallah* [Electromechanical effect in metals]. Pis'ma v ZHETF Publ., 1969, vol. 2, no. 10, pp. 18–22.
3. Spicyn V.I., Troickij O.A. *Elektroplasticheskaya deformatsiya metallov* [Electroplastic deformation of metals]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 160 p.
4. Guan L., Tang G., Chu P.K. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals. *J. Mater. Res.*, 2010, vol. 25, no. 7, pp. 1215–1224.
5. Li X., Wang F., Tang G., Zhu J. Improvement of formability of Mg-3Al-1Zn alloy strip by electroplastic-differential speed rolling. *Materials Science & Engineering*, 2014, vol. A 618, pp. 500–504.
6. Jones J.J., Mears L., Roth J.T. Electrically-assisted forming of magnesium AZ31: Effect of current magnitude and deformation rate on forge ability. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2012, vol. 134(3), pp. 034504.
7. Langer J., Hoffmann M.J., Guillon O. Direct comparison between hot pressing and electric field-assisted sintering of submicron alumina. *Acta Materialia*, 2009, vol. 57(18), pp. 5454–5465.
8. Santos T.G., Miranda R., Vilaca P. Friction stir welding assisted by electrical joule effect. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214(10), pp. 2127–2133.
9. Salandro W., Jones J., Bunget C., Mears L., Roth J. *Electrically assisted forming: Modeling and control*. NY: Springer, 2014. 317 p.
10. Fan R., Magargee J., Hu P., Cao J. Influence of grain size and grain boundaries on the thermal and mechanical behavior of 70/30 brass under electrically-assisted deformation. *Materials Science and Engineering A*, 2013, vol. 574, pp. 218–225.
11. Sprecher A., Mannan S., Conrad H. Overview no. 49: On the mechanisms for the electroplastic effect in metals. *Acta Metallurgica*, 1986, vol. 34(7), pp. 1145–1162.
12. Molotskii M., Fleurov V. Magnetic effects in electroplasticity of metals. *Physical Review B*, 1995, vol. 52(22), pp. 15829–15834.
13. Troickij O.A. Plasticheskaya deformatsiya metalla, vyzvannaya pinch-effektom [Plastic deformation of metal caused by the pinch effect]. *Izv. AN SSSR. Ser. Fizicheskaya*, 1977, no. 6, pp. 118–122.
14. Belyavin K.E., Minko D.V., Ponomarev T.S. et al. Elektroplasticheskij effekt pri rastyazhenii stal'noj provoloki [Electroplastic effect of tensile steel wire]. *60th International Scientific Conference «Aktual'nye problemy prochnosti»*, May 14–18, 2018. Vitebsk, UO «VGTU» Publ., 2018, pp. 401–403.
15. Ponomarev T.S., Belyavin K.E., Minko D.V. et al. Elektroplasticheskij effekt pri rastyazhenii titanovoj provoloki [Electroplastic effect of tensile titanium wire]. *Perspektivnye materialy i tekhnologii: collection of materials of the international symposium*. Brest, May 27–31, 2019. Vitebsk, UO «VGTU» Publ., 2019, pp. 507–509.
16. Dzialo C., Siopis M., Kinsey B., Weinmann K. Effect of Current Density and Zinc Content during Electrical-Assisted Forming of Copper Alloys, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, vol.59, no.1, pp. 299–302.
17. Siopis M.S., Kinsey B.L. Experimental Investigation of Grain and Specimen Size Effects during Electrical-Assisted Forming. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2010, vol. 132, no. 2, paper No. 021004.
18. Kim M.-S., Vinh N.T., Yu H.-H., et al. Effect of Electric Current Density on the Mechanical Property of Advanced High Strength Steels under Quasi-Static Tensile Loads. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 2014, vol. 15, no. 6, pp. 1207–1213.
19. Vovchenko A.I., Demidenko L.YU., Polovinka V.D. Vliyanie parametrov impul'sov toka na razvitie fizicheskogo kontakta pri svarke metallov davleniem [Influence of current pulse parameters on the development of physical contact during pressure welding of metals]. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2013, no. 49(4), pp. 30–34.
20. Troickij O.A. Elektroplasticheskij effekt v metallah [Electroplastic effect in metals]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii*, 2018, no. 9, pp. 65–76.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-131-138>
УДК 621.702

Поступила 29.10.2020
Received 29.10.2020

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИФФУЗИОННОГО ЦИНКОВАНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННЫХ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

*В. М. КОНСТАНТИНОВ, И. А. БУЛОЙЧИК, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: vm.konstantinov@bntu.by*

В статье представлены данные о влиянии способа термодиффузионного цинкования в порошковых насыщающих средах на эксплуатационные свойства термически упрочненных стальных изделий. Определены границы температурных интервалов влияния термодиффузионного цинкования на изменение предела прочности при растяжении термообработанных деталей. Показано, что в условиях циклического усталостного нагружения обработка способом термодиффузионного цинкования может приводить к разупрочнению стальных изделий, что связано с формированием высокопрочных интерметаллидных фаз в поверхностной зоне диффузионного слоя.

Ключевые слова. Цинкование в порошковых насыщающих смесях, цинковые покрытия, предел прочности, усталость металла.

Для цитирования. Константинов, В. М. Влияние термодиффузионного цинкования на эксплуатационные свойства термически обработанных стальных изделий / В. М. Константинов, И. А. Булойчик // Литие и металлургия. 2020. № 4. С. 131–138. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-131-138>.

INFLUENCE OF SHERARDIZING ON WORKING PROPERTIES OF METAL PARTS SUBJECTED TO PRIOR HEAT TREATMENT

*V. M. KONSTANTINOV, I. A. BULOICHYK, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65,
Nezavisimosti ave. E-mail: vm.konstantinov@bntu.by*

The article reveals the data concerning the mechanical properties changes of heat-treated steel articles subjected to thermo diffusion pack cementation. The temperature frames of thermo diffusion influence on tensile strength were determined for heat-treated steel articles. Results of tensile test of high strength bolts treated using thermo diffusion pack cementation at 420 °C show no any effect from the side of pack cementation treatment on working properties of the tested samples. It is shown that in conditions of cyclic fatigue loading thermo diffusion pack cementation of heat treated article may leads to strength loss that can be explained by formation of solid intermetallic phases in a surface area of the article.

Keywords. Thermo diffusion pack cementation, zinc coatings, tensile strength, metal fatigue

For citation. Konstantinov V. M., Bulovich I. A. Influence of sherardizing on working properties of metal parts subjected to prior heat treatment. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 131–138. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-131-138>.

Введение

Одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности технологий термодиффузионного цинкования (ТДЦ) является их внедрение в общий цикл термической обработки изделий [1]. Температурный интервал процессов ТДЦ составляет от 300 до 700 °С в зависимости от времени выдержки и ряда особых технологических параметров процесса. Такой широкий интервал рабочих температур позволяет подобрать необходимый режим цинкования с учетом предварительной термической обработки изделий [2]. Наибольшую перспективу при реализации указанных технологий представляют крепежные изделия, обрабатываемые закалкой с последующим отпуском. Ряд таких изделий представлен на рис. 1.

Следует также принять во внимание тот факт, что при использовании данного способа цинкования для обработки изделий с регламентированными прочностными показателями, а также для изделий, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, могут возникнуть проблемы, связанные с потерей изделиями эксплуатационных свойств в связи с разупрочняющим воздействием температур ТДЦ на структуру стали [3]. Так, согласно данным [4], где представлены исследования влияния цинкования в расплаве

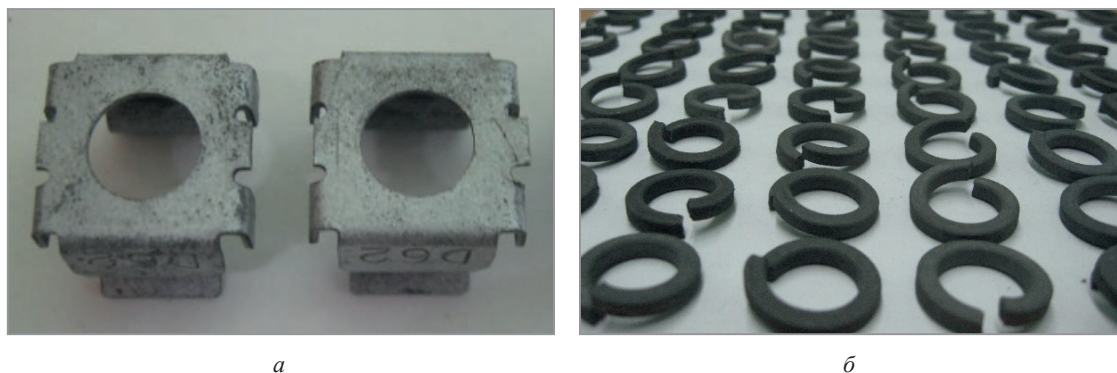


Рис. 1. Крепежные изделия, обработанные в соответствии с совмещенной технологией термической и антикоррозионной обработки с применением термодиффузионного цинкования: а – гайка квадратная, кузовная, клетьевая; б – граверная шайба

и электролитического цинкования на усталостную прочность сталей после различного типа термической обработки, отмечено снижение прочностных показателей для образцов, оцинкованных в расплаве, что связано с зарождением и распространением усталостных трещин в зоне формирования твердых интерметаллидных фаз диффузионного слоя. В свою очередь данных о исследовании влияния процессов диффузионного цинкования в порошковых насыщающих средах на изменение прочностных характеристик термически обработанных стальных изделий не достаточно.

Таким образом, существует необходимость в исследовании влияния процессов термодиффузионного цинкования на изменение прочностных свойств стальных изделий, подверженных термической обработке, а также определении допустимых значений класса прочности и условий эксплуатации стальных изделий, целесообразных для цинкования данным способом.

Материалы и методика исследований

Для проведения экспериментов использовали два типа образцов. 1. Крепеж, прошедший окончательную термическую обработку, оцинкованный способом ТДЦ и электролитическим цинкованием, подвергали испытаниям на разрыв согласно ГОСТ 1759.4–87 [5]. В ходе проведения испытаний разрушение всех образцов крепежных элементов происходило по резьбе (рис. 2).



Рис. 2. Образцы крепежных элементов с диффузионным цинковым слоем после испытания

2. С целью определения влияния формирования цинкового диффузионного слоя на усталостные характеристики стальных изделий проводили сравнительное исследование механических свойств при циклических нагрузках термически обработанных образцов из стали 45 и 65Г с дополнительной обработкой способом ТДЦ и без антикоррозионной обработки. Режимы термической обработки исследуемых образцов для усталостных испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1. Термическая обработка образцов перед проведением испытаний

Тип образцов	Режимы термической обработки	
	закалка	отпуск
Диффузионный слой отсутствует	Нагрев под закалку до 850 °С – в защитной атмосфере. Выдержка 30 мин Охлаждение вертикально – в воду	Отпуск 450 °С, 180 мин (3 ч)
Обработанные способом ТДЦ		ТДЦ в стационарном тигле при 450 °С, 120 мин

Испытания проводили ускоренным методом ступенчатого нагружения согласно СТБ 1233–2000 [6] по схеме, представленной на рис. 3, 4.

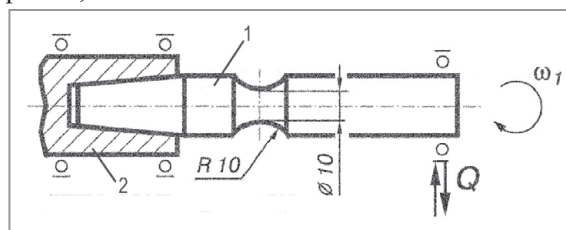


Рис. 3. Общая схема испытаний на консольный изгиб с вращением:

1 – образец; 2 – шпиндель испытательной машины; Q – нагрузка на образец; ω – частота вращения образца

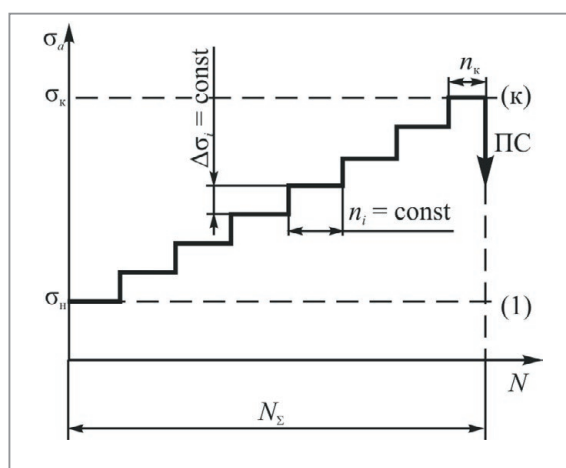


Рис. 4. Графическое представление режима испытаний

Частота вращения образца составляла 3000 мин^{-1} . Заданное значение начального уровня амплитуды напряжений при изгибе (σ_n) – 200 МПа. Интервал приращения амплитуды напряжений при изгибе ($\Delta\sigma_i$) приняли равным 50 МПа. Длительность ступени нагружения (n_i) составляла 10^5 циклов. Число циклов n_k на последней ступени нагружения определяли достижением предельного состояния (изломом образца). Переход на каждую ступень нагружения осуществляли без промежуточных пауз. По результатам испытаний определяли предельное напряжение при изгибе σ_k и долговечность образца N_Σ .

Результаты и обсуждение

Результаты испытания на растяжение (табл. 2) не выявили изменения эксплуатационных характеристик диффузионно-оцинкованного крепежа в сравнении с крепежом, оцинкованным электролитическим способом цинкования.

Таблица 2. Результаты испытания болтов на растяжение

Номинальный диаметр резьбы, мм	Вид обработки болта	Временное сопротивление σ_b после испытания, Н/мм ²
1	2	3
8	Закалка + отпуск + ТДЦ (1)	552
8	Закалка + отпуск + ТДЦ (2)	601
8	Закалка + отпуск + ТДЦ (3)	612
8	Закалка + отпуск + гальваника (1)	519
8	Закалка + отпуск + гальваника (2)	525
8	Закалка + отпуск + гальваника (3)	607
6	Закалка + отпуск + ТДЦ (1)	627
6	Закалка + отпуск + ТДЦ (2)	647
6	Закалка + отпуск + ТДЦ (3)	587
6	Закалка + отпуск + гальваника (1)	677
6	Закалка + отпуск + гальваника (2)	706
6	Закалка + отпуск + гальваника (3)	617

Данный факт свидетельствует об исключении влияния температур реализации процессов ТДЦ порядка 420 °С на прочностные характеристики изделий. Следует отметить, что с повышением температуры диффузионного цинкования свыше 420 °С вероятность разупрочнения термически обработанного крепежа возрастает. Для сравнения на рис. 5 приведены данные механических характеристик высокопрочного крепежа после диффузионного цинкования и модельного отжига при 450 °С. В ходе испытаний для образцов с различными классами прочности, подверженных термодиффузионному цинкованию (450 °С, 1 ч) и отпуску (450 °С, 1 ч), наблюдали снижение значений предела прочности σ_B и условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, что связано с изменением структуры изделия при дополнительном термическом воздействии.

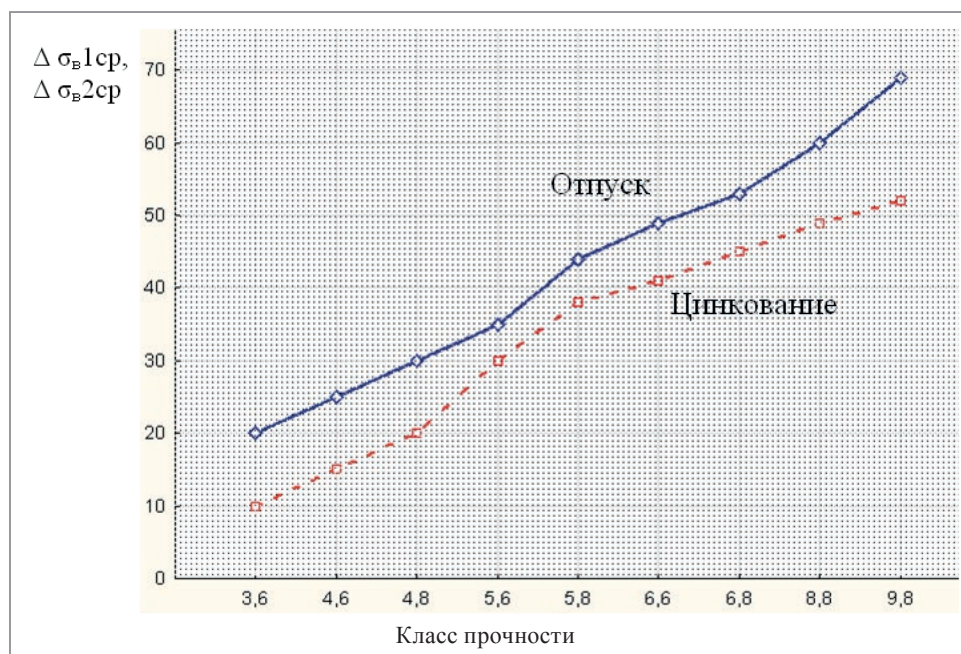


Рис. 5. Зависимость изменения разности среднего значения предела прочности при цинковании (450 °С, 1ч) – $\Delta\sigma_{B1cp}$ и отпуске (450 °С, 1ч) – $\Delta\sigma_{B2cp}$ от значения класса прочности

Установлено, что для образцов с классами прочности вплоть до 8.8 снижение указанных характеристик не выходит за пределы допустимых значений, оговоренных соответствующей нормативно-технической документацией. Однако при обработке деталей с различными габаритами и массой возможно изменение допустимого значения класса прочности изделия, подходящего для обработки способом термодиффузионного цинкования, что связано с изменением температурно-временных параметров процесса. Несмотря на то что в отличие от классических способов нанесения защитных покрытий на основе цинка для термодиффузионного цинкования возможно разупрочнение изделий, прошедших предварительную термическую обработку, рациональный подход к выбору температурных режимов, а также учет класса прочности обрабатываемого изделия позволяет эффективно применять данный способ в качестве антикоррозионной защиты. В случае если требуется произвести антикоррозионную защиту деталей, прошедших окончательную термообработку, например, после закалки и отпуска, процесс термодиффузионного цинкования целесообразно проводить при температурах ниже температуры отпуска с выдержкой, обеспечивающей формирование диффузионного слоя необходимой толщины, но не достаточной для существенного разупрочнения обрабатываемого изделия.

Фактическое значение временного сопротивления для данной группы образцов, оцинкованных способом ТДЦ, сопоставимо с данными временного сопротивления для образцов с электролитическим цинковым покрытием. Данный факт свидетельствует об исключении влияния температур реализации процессов ТДЦ порядка 420 °С на прочностные характеристики изделий. Следует отметить, что с повышением температуры диффузионного цинкования свыше 420 °С вероятность разупрочнения термически обработанного крепежа возрастает [7].

По результатам фрактографического анализа для всех типов образцов характерен вязкий излом. Отличительной особенностью разрушения образцов, оцинкованных электролитическим способом, является отслоение гальванического покрытия на удлиненном после испытания участке (рис. 6 а, б).

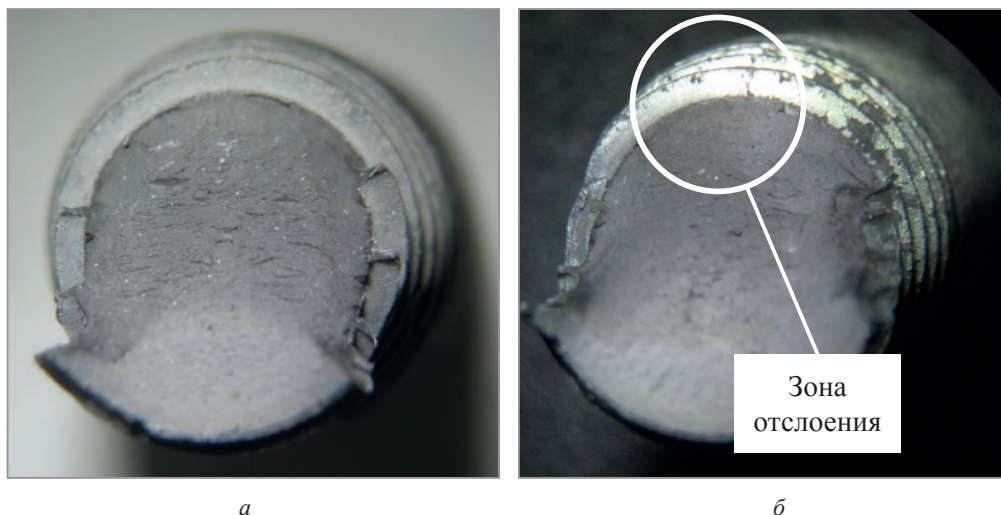


Рис. 6. Фрактография изломов крепежных элементов с диффузионным (а) и электролитическим (б) типом цинкового покрытия после испытания на растяжение. $\times 10$

На образцах, обработанных способом ТДЦ, следов отслоения слоя цинка не обнаружено, что связано с повышенной адгезионной прочностью такого типа защитного покрытия за счет диффузионного взаимодействия атомов цинка и стальной основы.

Согласно данным результатов усталостных испытаний, представленных в табл. 3, 4, образцы с цинковым диффузионным слоем продемонстрировали меньшую долговечность и меньшее предельное напряжение при изгибе в сравнении со стальными образцами без защитного цинкового покрытия.

Таблица 3. Результаты испытаний образцов на механическую усталость для стали 45

Номер образца	Предельное напряжение при изгибе σ_k , МПа	Долговечность образца N_{Σ} , цикл
Образцы с диффузионным слоем		
1	350	332350
2	300	253523
3	350	353364
Образцы без защитного покрытия		
4	400	484016
5	400	436715
6	400	458241

Таблица 4. Результаты испытаний образцов на механическую усталость для стали 65Г

Номер образца	Предельное напряжение при изгибе σ_k , МПа	Долговечность образца N_{Σ} , цикл
Образцы с диффузионным слоем		
1	250	362186
2	250	334692
3	250	357462
Образцы без защитного покрытия		
4	350	528871
5	350	495309
6	350	525662

Данный факт может быть обусловлен формированием хрупких интерметаллидных фаз (Г-фаза) в переходной зоне от стальной основы к диффузионному слою в исследуемых образцах. Они являются концентраторами напряжений, которые при увеличении знакопеременной внешней нагрузки могут являться причиной зарождения усталостной трещины [8].

На основании данных фрактографического анализа (рис. 7, 8) для обеих марок сталей характерен вязкий излом. Отличительной особенностью изломов, характерных для стали 65Г с цинковым диффузионным слоем, является формирование сразу нескольких очагов разрушения в приповерхностной зоне

образца. Данный факт может быть объяснен большим количеством структурных напряжений за счет большей твердости образцов из стали 65Г в сравнении с образцами из стали 45, что послужило более активному зарождению усталостных трещин.

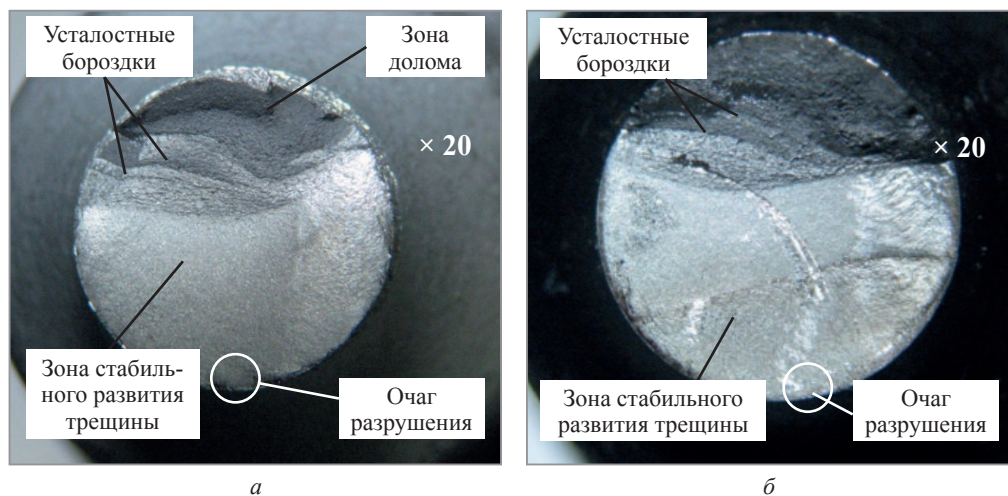


Рис. 7. Характер изломов образцов после проведения испытаний для стали 45:
а – образец с цинковым диффузионным слоем; б – образец без защитного покрытия

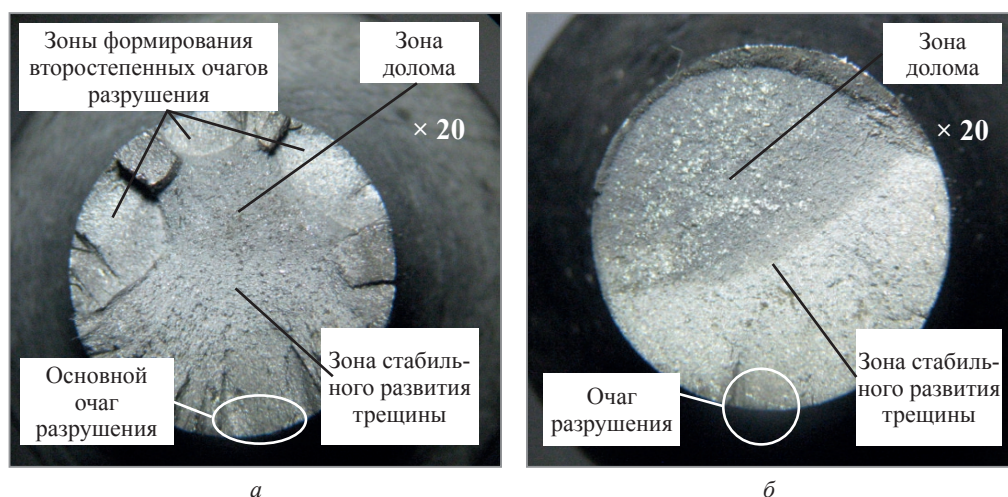


Рис. 8. Характер изломов образцов после проведения испытаний для стали 65Г:
а – образец с цинковым диффузионным слоем; б – образец без защитного покрытия

Следует отметить, что в условиях коррозионно-усталостного воздействия число циклов до полного разрушения (долговечность N_{Σ}) для образцов с цинковым диффузионным слоем было сопоставимо со значениями для образцов без защитного покрытия (табл. 5). Данный факт можно объяснить созданием дополнительных концентраторов напряжений по периметру образцов без защитного диффузионного слоя, сформировавшихся под воздействием коррозии (рис. 9, 10).

Таблица 5. Результаты испытаний образцов на механическую усталость для стали 65Г (после коррозионных испытаний)

Номер образца	Предельное напряжение при изгибе $\sigma_{\text{кр}}$, МПа	Долговечность образца N_{Σ} , цикл
Образцы с диффузионным слоем		
1	250	365159
2	300	398041
3	300	419716
Образцы без защитного покрытия		
4	300	395994
5	300	396893
6	300	439398

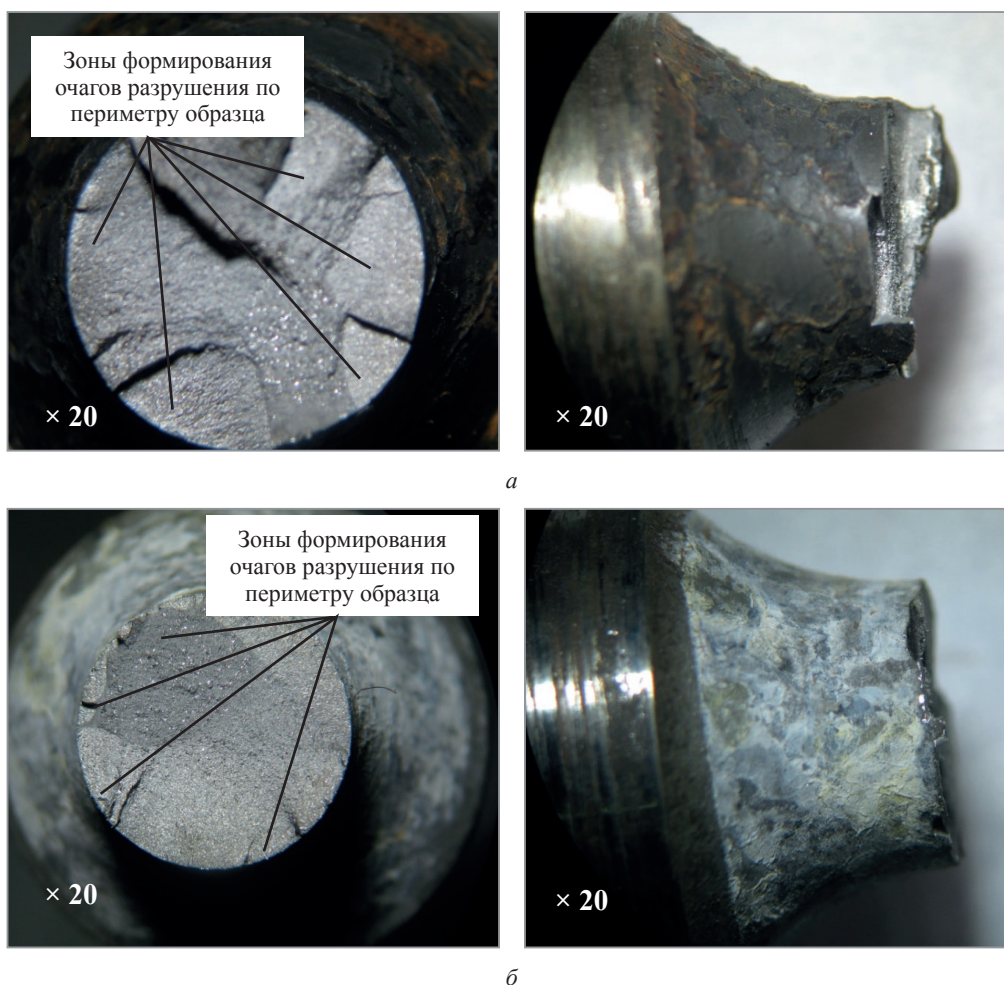


Рис. 9. Характер изломов образцов после проведения коррозионно-усталостных испытаний для стали 65Г без защитного диффузионного слоя (а) и с защитным диффузионным слоем (б).

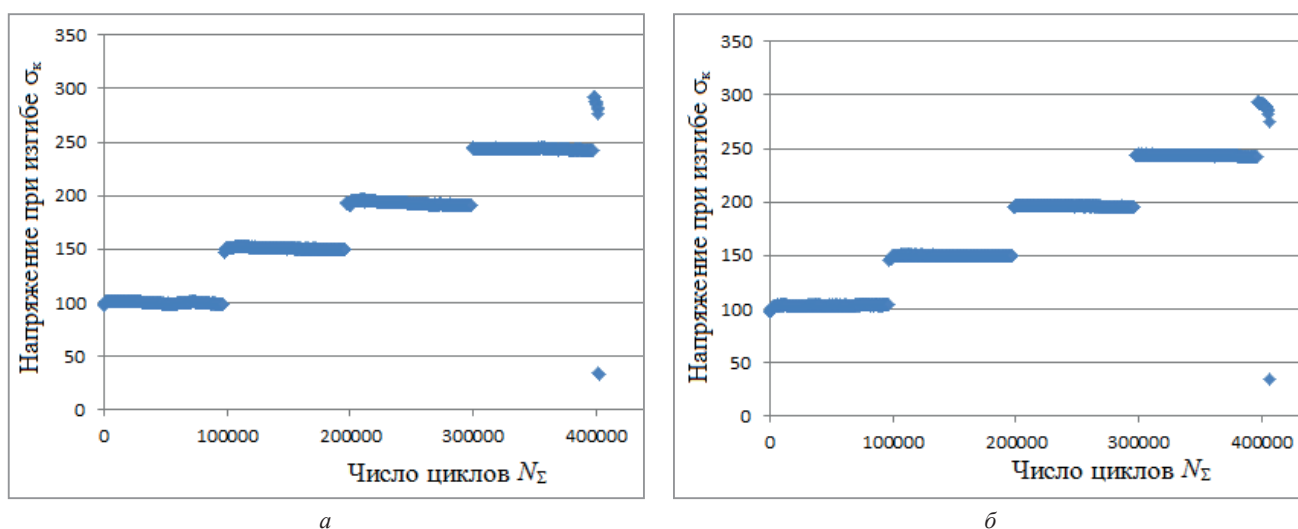


Рис. 10. Сравнение зависимостей напряжений при изгибе от числа циклов испытаний для образцов с защитным диффузионным слоем (а) и без защитного слоя (б)

Выводы

Применяя технологии ТДЦ для антикоррозионной защиты деталей с регламентируемыми прочностными параметрами, следует учитывать влияние температур реализации процесса ТДЦ на структуру и эксплуатационные свойства изделий. Фактическое значение временного сопротивления образцов, оцинкованных способом ТДЦ, сопоставимо с данными временного сопротивления для образцов

с электролитическим цинковым покрытием. Данный факт свидетельствует об исключении влияния температур реализации процессов ТДЦ до (420 °С) на прочностные характеристики изделий. С повышением температуры диффузионного цинкования свыше 420 °С вероятность разупрочнения термически обработанного крепежа возрастает.

Для деталей, работающих в условиях повторно статического (малоциклового) и усталостного (многоциклового) нагружений, испытывающих при эксплуатации свыше 10^4 циклов нагружений, антикоррозионная защита способом ТДЦ может стать причиной снижения усталостных свойств за счет наличия высокотвердых хрупких фаз в цинковом диффузионном слое. В свою очередь, в условиях коррозионно-усталостного нагружения при абразивном воздействии коррозионно-активной среды обработка способом ТДЦ не снижает долговечность обработанных данным способом деталей.

Несмотря на то что в отличие от классических способов нанесения защитных покрытий на основе цинка для термодиффузионного цинкования возможно разупрочнение изделий, прошедших предварительную термическую обработку, рациональный подход к выбору температурных режимов, а также учет класса прочности обрабатываемого изделия позволяет эффективно применять данный способ в качестве антикоррозионной защиты. В случае если требуется произвести антикоррозионную защиту деталей, прошедших окончательную термообработку, например, после закалки и отпуска, процесс термодиффузионного цинкования целесообразно проводить при температурах ниже температуры отпуска с выдержкой, обеспечивающей формирование диффузионного слоя необходимой толщины, но не достаточной для существенного разупрочнения обрабатываемого изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булойчик, И. А. Термодиффузионное цинкование улучшаемых и пружинных сталей / И. А. Булойчик // Литье и металлургия. 2013. № 4. С. 121–125.
2. Патент РБ на изобретение № 20319 С23С 10/02 от 26.04.2016 «Способ термодиффузионного цинкования стальных упругих элементов». В. М. Константинов, И. А. Булойчик, А. М. Скибарь.
3. Проскуркин, Е. В. Диффузионные цинковые покрытия / Е. В. Проскуркин, Н. С. Горбунов М.: Металлургия, 1972. 248 с.
4. Swanger W. H. Влияние цинковых покрытий на усталостные характеристики стали / W. H. Swanger, R. D. France // Бюро стандартов и научно-исследовательских журналов. Вашингтон, 30.04.1932.
5. ГОСТ 1759.4–87 Болты, винты и шпильки. Механические свойства и методы испытаний.
6. СТБ 1233–2000 Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость.
7. Some aspects of sherardizing implementation during anticorrosive defence of heat-treated metal parts [Электронный ресурс] / V. M. Konstantinov, I. A. Bulojchik. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering № 71, 2015 Article ID: 012063. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/71/1/012063>. – Дата доступа: 08.05.17.
8. Константинов, В. М. Исследование влияния термодиффузионного цинкования на усталостную прочность сталей / В. М. Константинов, И. А. Булойчик // XII Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». ФТИ НАН Беларуси. Минск, 2017. С. 100–101.

REFERENCES

1. Bulojchik I. A. Termidiffuzionnoe cinkovanie uluchshaemyh i pruzhinnyh stalej [Sherardizing for hardened spring steels]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 4, pp. 121–125
2. Konstantinov V. M., Bulojchik I. A., Skibar' A. M. *Sposob termidiffuzionnogo cinkovaniya stal'nyh uprugih jelementov* [Method of thermal diffusion galvanizing of steel elastic elements]. Patent RB, no. 20319 S23S 10/02 ot 26.04.2016.
3. Proskurkin E. V., Gorbunov N. S. *Diffuzionnye cinkovye pokrytija* [Zinc diffusion coatings]. Moscow, Metallurgija Publ., 1972, 248 p.
4. Swanger W. H., France R. D. *Vlijanie cinkovyh pokrytij na ustalostnye harakteristiki stali* [Influence of zinc coatings on metal fatigue] Bjuro standartov i nauchno-issledovatel'skih zhurnalov. Vashington, 30.04.1932.
5. GOST 1759.4–87 Bolty, vinty i shpil'ki. *Mehanicheskie svojstva i metody ispytanij* [Bolts, screws and studs of specified property classes with coarse and fine pitch thread].
6. STB 1233–2000 Tribofatika. *Metody iznosoustalostnyh ispytanij. Uskorennye ispytaniya na kontaktno-mehanicheskiju ustalost'* [Tribo-fatigue. Wear-fatigue test methods. Accelerated mechanical contact fatigue tests].
7. Some aspects of sherardizing implementation during anticorrosive defence of heat-treated metal parts. Available at: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/71/1/012063>. – Date of access: 08.05.17
8. Konstantinov V. M., Bulojchik I. A. *Issledovanie vlijaniya termidiffuzionnogo cinkovaniya na ustalostnuju prochnost' stalej* [Influence of sherardizing on metal fatigue]. *XII Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Sovremennye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov»* [XII International Scientific and Technical Conference “Modern Methods and Technologies of Creation and Processing of Materials”]. FTI NAN RB Publ., Minsk, 2017, pp. 100–101.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-139-147>
УДК 621.785.53

Поступила 15.11.2020
Received 15.11.2020

ПОВЫШЕНИЕ ЖАРОСТОЙКОСТИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ТЕРМОДИФФУЗИОННЫМ НАСЫЩЕНИЕМ И НАНЕСЕНИЕМ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ

А. В. КОВАЛЬЧУК, Е. К. ПАЦЕКО, Г. А. ТКАЧЕНКО, Н. А. ВЕРЕЩАК,

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

E-mail: a-v-kov@yandex.com, kate.patseko@mail.ru

В данной статье обоснована гипотеза о возможности повышения жаростойкости доэвтектидных углеродистых сталей путем предварительного термодиффузионного легирования с последующим нанесением вакуумных нитридных покрытий. Установлено, что наибольшей жаростойкостью, определяемой по относительному приросту массы, обладают термодиффузионные слои, полученные в результате бороалитирования, далее в порядке уменьшения жаростойкости: слои, полученные в результате боросилицирования, борохромирования, бороазотирования и борирования. Разработаны новые составы жаростойких покрытий композиционного типа «термодиффузионный слой – вакуумное ионно-плазменное покрытие», которые также являются твердыми, износостойкими, коррозионностойкими в условиях атмосферной коррозии, растворах солей и некоторых кислот. Проведена оценка влияния ионно-плазменных покрытий на дополнительное повышение жаростойкости сталей с полученными термодиффузионными слоями, в ходе которой определены наиболее эффективные составы разработанных покрытий для повышения жаростойкости поверхности. Приведены результаты расчета прогнозной жаростойкости разработанных композиций «диффузионный слой – ионно-плазменное покрытие» на углеродистых доэвтектидных сталях.

Ключевые слова. Термодиффузионное насыщение, жаростойкость, вакуумное ионно-плазменное покрытие, бороалитирование, коррозионная стойкость.

Для цитирования. Ковальчук, А. В. Повышение жаростойкости углеродистых сталей термодиффузионным насыщением и нанесением вакуумных покрытий / А. В. Ковальчук, Е. К. Пацек, Г. А. Ткаченко, Н. А. Верещак // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 139–147. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-139-147>.

INCREASE IN THE HEAT RESISTANCE OF CARBON STEELS BY THERMODIFFUSION TREATMENT AND VACUUM COATING APPLICATION

A. V. KOVALCHUK, E. K. PATSEKO, G. A. TKACHENKO, N. A. VERESHCHAK,

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

E-mail: a-v-kov@yandex.com, kate.patseko@mail.ru

In this article is substantiated the hypothesis of the possibility of increasing the heat resistance of hypoeutectoid carbon steels by preliminary thermal diffusion alloying followed by the application of vacuum nitride coatings. It was established that thermal diffusion layers obtained as a result of saturation with boron and aluminum have the greatest heat resistance in terms of relative mass gain, then in order of decreasing heat resistance: layers obtained as a result of saturation with boron and silicon, boron and chromium, boron and nitrogen, and as a result of boriding. New composite coatings of heat-resistant compositions “thermodiffusion layer – vacuum ion-plasma coating” have been developed, which are also solid, wear-resistant, and corrosion-resistant under atmospheric corrosion, solutions of salts and certain acids. The influence of ionic-plasma coatings on additional increase in heat resistance of steels with the produced thermodiffusion layers, during which the most efficient compositions of the developed coatings are defined and given to improve the temperature resistance of the surface, was assessed. The results of the calculation of the predicted heat resistance of the developed compositions “diffusion layer – ion-plasma coating” on hypoeutectoid carbon steels are given in the article.

Keywords. Thermochemical treatment, diffusion layer, heat resistance, vacuum ion-plasma coating, corrosion resistance, saturation powder mixture.

For citation. Kovalchuk A. V., Patseko E. K., Tkachenko G. A., Vereshchak N. A. Increase in the heat resistance of carbon steels by thermodiffusion treatment and vacuum coating application. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 139–147. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-139-147>

Введение

Вакуумные ионно-плазменные покрытия широко применяются в различных областях техники [1]. В последние годы в инженерии поверхности сформировалась концепция повышения долговечности вакуумных покрытий путем дополнительного термодиффузионного упрочнения стальной основы [2–4]. Разработанные композиционные слои обладают высоким комплексом трибомеханических характеристик [5]. Есть основания полагать, что указанный комплексный подход может быть эффективен для обеспечения других защитных свойств, в частности жаростойкости конструкционных углеродистых сталей.

Жаростойкость стальных деталей с вакуумными ионно-плазменными покрытиями на базе традиционных систем (Ti-Al-N, Ti-Al-C-N, Ti-Al-Si-N, Cr-Ti-N и др.) не всегда полностью определяется защитными свойствами самих покрытий [1–4]. Протекание процессов структурной деструкции может иметь место под покрытием – в стальной подложке, при отсутствии визуальных признаков на поверхности детали. Отсутствие развитой когезионной связи покрытия со стальной подложкой, а также существенная разница в кристаллической природе нитридного покрытия и стальной основы способствуют подповерхностному окислению.

Одним из наиболее эффективных способов повышения жаростойкости поверхности сталей является их химико-термическая обработка, которая позволяет сформировать на поверхности когезионно-связанный с основным сплавом жаростойкий диффузионный слой. Эффективными и наиболее изученными процессами термодиффузионного насыщения, повышающими жаростойкость сталей и сплавов на основе железа, являются силицирование, алитирование, хромирование, боросилицирование, борохромирование, бороалитирование, в меньшей степени – бороазотирование, а также менее распространенные и технологичные процессы – вольфрамирование, ванадирование, титанирование, а также процессы многокомпонентного насыщения такими элементами, как V, W, Mo, Ti, Cr и др. [6–13].

В данной работе реализована гипотеза о возможности повышения жаростойкости углеродистых конструкционных сталей с вакуумными нитридными покрытиями путем предварительного термодиффузионного насыщения рядом легирующих элементов поверхности стали, а также предложены составы новых жаростойких покрытий композиционного типа «термодиффузионный слой – вакуумное ионно-плазменное покрытие».

Материалы и методики исследования

Химико-термическую обработку (ХТО) проводили в порошковых насыщающих средах. Для проведения процессов ХТО использовали шахтную электрическую печь с селитовыми нагревателями. Насыщение проводили в порошковых средах в контейнерах, герметизируемых плавким затвором. Исходная микроструктура стальных образцов перед ХТО представляла собой квазиравновесную, полученную в результате нормализации. Поверхность образцов перед ХТО обезжиривали, шероховатость R_a поверхности образцов перед ХТО не превышала значений 3,0–3,2 мкм. Вакуумные нитридные покрытия на сталях получали реактивным магнетронным нанесением.

Распределение микротвердости по толщине термодиффузионных слоев определяли на микрошлифах с углом среза к поверхности 45° с шагом 5–20 мкм, расстоянием между дорожками измерения не менее 30–40 мкм, количество измерений на точку – 3.

Жаростойкость оценивали по методике, приведенной в ГОСТ 6130-71, скорректированной с учетом времени и температуры разогрева подложек при реактивном магнетронном нанесении на них ионно-плазменных покрытий, а также с учетом традиционных температур работы ионно-плазменных покрытий на базе нитрида и алюминитрида титана, составляющих 400–700 °С. Для исследования жаростойкости применяли плоские образцы размерами 3×30×45 мм. Грани образцов были скруглены радиусом не менее 1 мм. Температура проведения испытаний – до 700 °С, время испытаний – 10 ч. Для испытаний на жаростойкость использовали камерную печь без защитной атмосферы СНОЛ-1,6,2,5.1/11-И2М. Образцы загружали в печь, разогретую до температуры испытаний. Началом испытания считали момент достижения в рабочей зоне печи заданной температуры после загрузки образцов, концом испытаний – момент выключения печи. Перед испытанием тигли были прокалены до постоянной массы, использовали керамические тигли, не препятствующие проникновению окислительной атмосферы и обеспечивающие сохранение возможных осыпавшихся оксидов. Жаростойкость оценивали сравнением величины относительного набора массы образцов после испытания. Изменение массы образцов определяли по разности результатов взвешивания холодных образцов до испытания и взвешивания после охлаждения образцов в тиглях, предварительно закрытых крышками из жаростойкого материала. Измерения проводили на аналитических весах RADWAG AS 310/X, погрешность ±0,0005 г.

Результаты и их обсуждение

В результате ХТО были получены диффузионные боридные, силицированные, боросилицированные, бороалитированные, борохромированные и бороазотированные термодиффузионные слои общей толщиной 60–230 мкм и микротвердостью поверхности 6920–15800 МПа (табл. 1). Толщину термодиффузионных слоев определяли как расстояние от поверхности образца, на котором происходит резкое падение микротвердости, либо по наличию характерной границы, разделяющей компактный монофазный или многофазный слой на поверхности и переходную зону или зону внутреннего насыщения.

Таблица 1. Характеристики полученных диффузионных слоев на углеродистых доэвтектоидных сталях в результате различных видов ХТО

Вид ХТО	Температура насыщения, °С	Время выдержки, ч	Общая толщина диффузионного слоя, мкм	Микротвердость поверхности, МПа
Борирование	930	6	200–230	14600–15800
Силицирование	1000	4	60–80	—*
Бороазотирование	950	4	80–100	9200–11300
Борохромирование	950	4	80–90	8400–10050
Бороалитирование	1000	4	100–120	6920–8460
Боросилицирование	920	6	90–100	8040–8860

* Пористая поверхность.

Полученные термодиффузионные слои имели традиционное строение (рис. 1), согласующееся с результатами работ [7–16]. При этом следует отметить, что в результате силицирования образовался диффузионный слой с высокой пористостью поверхности, что не позволяет корректно оценить микротвердость поверхности и построить распределение микротвердости по толщине слоя из-за занижения значений микротвердости в приповерхностной пористой зоне и малой общей толщины полученного силицированного слоя. В результате борохромирования на поверхности образуется не сплошной диффузионный слой, бороазотированный слой также имеет участки «пятнистой» микротвердости.

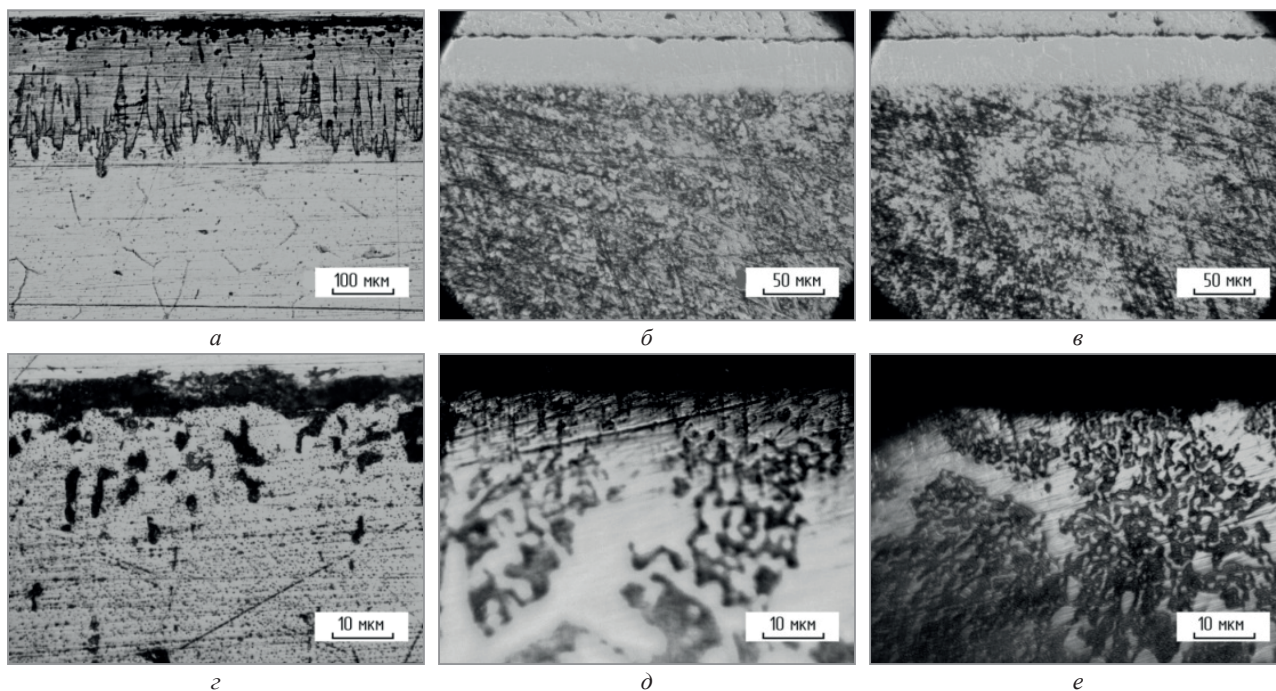


Рис. 1. Микроструктура термодиффузионных слоев на углеродистых доэвтектоидных сталях, полученных в результате борирования (а), бороазотирования (б), борохромирования (в), бороалитирования (г), боросилицирования (д) и силицирования (е) в порошковой среде

Как известно, распределение микротвердости по толщине двухфазного диффузионного боридного слоя является ступенчатым с протяженными участками постоянной микротвердости, равными длине боридных игл фаз FeB с поверхности и Fe_2B ближе к основе, под которыми располагается подборидная

зона [7]. Такое распределение микротвердости обеспечивает наибольшую эффективную толщину упрочненного слоя подложки в системе «диффузионный слой – покрытие» по сравнению с другими термодиффузионными слоями. Важно, что боридный слой и покрытия на базе систем Ti-N и Ti-Al-N, наносимые в условиях среднего или сильного вакуума, будут иметь схожую столбчатую морфологию (иглоподобное строение для боридного слоя) [1, 8].

Распределение микротвердости по толщине бороазотированного, бороалитированного, борохромированного и боросилицированного диффузионных слоев (рис. 2) по сравнению с боридным слоем отличается отсутствием участка с постоянной микротвердостью в приповерхностной зоне, а также является более плавным и не имеет резких перепадов микротвердости, что связано с большей дисперсностью структуры диффузионных слоев и связанным с этим равномерным уменьшением объемного количества упрочняющих фаз на основе боридов железа в направлении от поверхности образца к сердцевине. В сочетании с высокотвердым вакуумным ионно-плазменным покрытием такое распределение микротвердости по толщине слоев должно обеспечить высокие демпфирующие свойства стальной подложки, возможно, позволит частично релаксировать термические напряжения при высокотемпературной эксплуатации стального изделия.

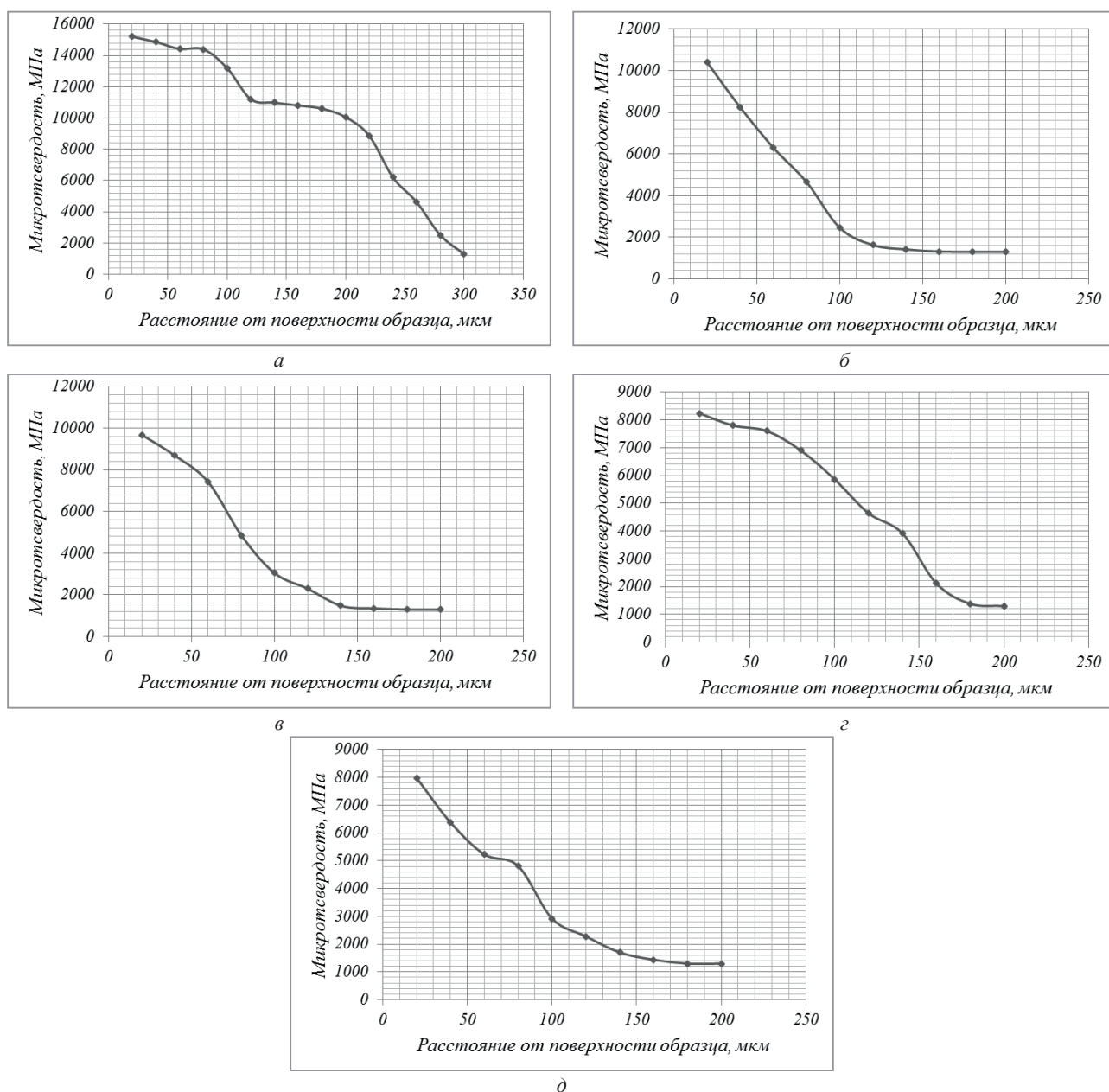


Рис. 2. Распределение микротвердости по толщине полученных термодиффузионных слоев на углеродистых доэвтектоидных сталях после различных видов ХТО:
а – борирование; б – бороазотирование; в – борохромирование; г – бороалитирование; д – боросилицирование

Первоначально были проведены исследования жаростойкости стальных образцов (сталь 10) только с термодиффузионными слоями. Установлено, что наибольшей жаростойкостью, определяемой по относительному приросту массы, обладают термодиффузионные слои, полученные в результате бороалитирования. Далее в порядке уменьшения жаростойкости: слои, полученные в результате боросилицирования, борохромирования, бороазотирования и борирования (рис. 3). Наибольшая жаростойкость бороалитированного термодиффузионного слоя связана, как известно, с образованием алитированного слоя на основе алюминидов железа FeAl и Fe_3Al [17, 18], на что указывает микротвердость поверхности бороалитированного слоя на уровне 6920–8460 МПа и расположенного под ним слоя иглообразных кристаллов на основе боридов железа. Кроме того, стальные образцы, подвергнутые бороалитированию, имели тонкий сплошной оксидный слой, хорошо сцепленный с поверхностью, который скалывался лишь частично в процессе микроиндентирования вокруг отпечатка индентора. Тонкий оксидный слой на поверхности бороалитированных образцов также мог способствовать более медленному их окислению [19, 20].

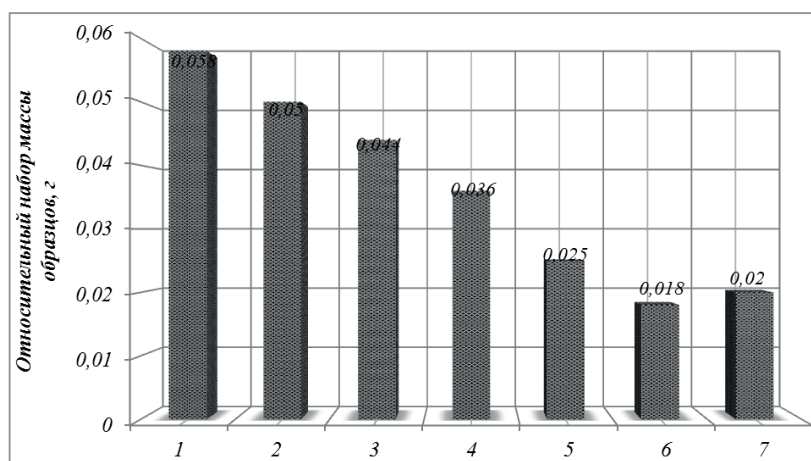


Рис. 3. Результаты оценки жаростойкости образцов из стали 10, подвергнутых различной химико-термической обработке: 1 – нормализация; 2 – борирование; 3 – силицирование; 4 – бороазотирование; 5 – борохромирование; 6 – бороалитирование; 7 – боросилицирование

Повышение жаростойкости стальных образцов в результате бороалитирования при испытаниях 700 °С, 10 ч в атмосфере воздуха составило 68% по сравнению с нормализованными образцами и 40% по сравнению с борированными образцами. Следует полагать, что при традиционной продолжительности проведения испытаний на жаростойкость (50, 100, 200 ч и более) повышение жаростойкости в результате бороалитирования в сравнении с нормализованными и борированными образцами будет более существенным.

На следующем этапе были проведены исследования жаростойкости стальных образцов с вышеуказанными термодиффузионными слоями с дополнительным нанесением вакуумных нитридных слоев (табл. 2). Составы ионно-плазменных покрытий для нанесения их на стальные подложки с термодиффузионным жаростойким слоем выбирали исходя из наибольшей температуры окисления покрытий среди аналогичных нитридных и карбонитридных систем, а также с учетом возможности протекания процессов вторичного структурообразования для дополнительного повышения адгезии покрытий и механических свойств на границе покрытие-подложка.

Таблица 2. Разработанные составы жаростойких композиций на основе термодиффузионных слоев на сталях и вакуумных ионно-плазменных покрытиях

Тип диффузионного слоя	Толщина диффузионного слоя, мкм		Тип вакуумного покрытия	Толщина вакуумного покрытия, мкм
	общая	зона химического соединения		
Борирование	200–230	150–160	TiAlN, TiCN	1–7
Силицирование	60–80	45–60*	TiAlN, TiAlSiN	1–4
Бороазотирование	80–100	30–50	TiAlN, TiAlCN	1–7
Борохромирование	80–90	25–40	CrN, TiAlN, TiAlCrYN	1–7
Бороалитирование	100–120	60–80	TiAlN, TiCN, TiAlSiN	1–7
Боросилицирование	90–100	15–40	TiAlN, TiAlSiN	1–4

* Пористая структура.

На основе анализа результатов жаростойкости диффузионных слоев и данных об окислительной стойкости рассматриваемых ионно-плазменных покрытий с уровнем их гидростатической плотности и кислородной проницаемости при традиционной толщине покрытий 1–3 мкм до температуры 700 °С [1, 5, 20–22] была проведена прогнозная оценка жаростойкости предложенных покрытий композиционного типа «термодиффузионный слой – ионно-плазменное покрытие», получаемых в результате бороалитирования, боросилицирования, борохромирования, бороазотирования, силицирования или борирования подложки из доэвтектоидной углеродистой стали с последующим нанесением ионно-плазменного покрытия TiAlN, TiCN, TiAlCN, TiAlSiN, CrTiN, CrN или TiAlCrYN. Для этого проводили расчет поправочных коэффициентов к результатам жаростойкости термодиффузионных слоев на сталях с учетом химического состава, плотности, кислородной проницаемости, температуры окисления и толщины наносимого на их поверхность ионно-плазменного покрытия по множественной регрессионной модели. Это позволило получить расчетные значения относительного набора массы образцов фиксированным объемом с анализируемыми термодиффузионными слоями и вакуумными покрытиями (табл. 3, 4, рис. 4).

Таблица 3. Характеристики разработанных жаростойких композиций на основе термодиффузионных слоев на сталях и вакуумных ионно-плазменных покрытий

Номер композиции	Тип композиционного покрытия «диффузионный слой – ионно-плазменное покрытие»	Микротвердость диффузионного слоя HV0.1, МПа	Микротвердость покрытия HV0.1, МПа	Минимальная жаростойкость, °С
1	Боридный слой – покрытие TiAlN	14600–15800	28000–32000	600
2	Боридный слой – покрытие TiCN		27000–35000	400
3	Силицидный слой – покрытие TiAlN	2900–3450*	28000–32000	760
4	Силицидный слой – покрытие TiAlSiN		32500–38000	650
5	Бороазотированный слой – покрытие TiAlN	9200–11300	28000–32000	580
6	Бороазотированный слой – покрытие TiAlCN		26000–31000	500
7	Борохромированный слой – покрытие CrN	8400–10050	18000–20000	600
8	Борохромированный слой – покрытие TiAlN		28000–32000	620
9	Борохромированный слой – покрытие TiAlCrYN		27000–32000	650
10	Борохромированный слой – покрытие CrTiN		30000–34000	600
11	Бороалитированный слой – покрытие TiAlN	6920–8460	28000–32000	800
12	Бороалитированный слой – покрытие TiCN		27000–35000	400
13	Бороалитированный слой – покрытие TiAlSiN		32500–38000	650
14	Боросилицидный слой – покрытие TiAlN	8040–8860	28000–32000	760
15	Боросилицидный слой – покрытие TiAlSiN		32500–38000	600

* Пористая поверхность образца.

Таблица 4. Расчет прогнозной жаростойкости разработанных композиций «диффузионный слой – ионно-плазменное покрытие» на углеродистых доэвтектоидных сталях (номера композиций из табл. 3)

Номер композиции	Тип покрытия	Температура начала интенсивного окисления поверхности, °С	Увеличение массы образца с диффузионным слоем	Поправочный коэффициент регрессионной модели	Прогнозный относительный набор массы, г
1	TiAlN	600	0,05	0,86	0,0430
2	TiCN	400	0,05	0,88	0,0440
3	TiAlN	760	0,044	0,86	0,0378
4	TiAlSiN	650	0,044	0,82	0,0361
5	TiAlN	580	0,036	0,86	0,0340
6	TiAlCN	500	0,036	0,85	0,0306
7	CrN	600	0,025	0,91	0,0228
8	TiAlN	620	0,025	0,86	0,0215
9	TiAlCrYN	650	0,025	0,65	0,0163
10	CrTiN	600	0,025	0,78	0,0195
11	TiAlN	800	0,018	0,86	0,0155
12	TiCN	400	0,018	0,88	0,0158
13	TiAlSiN	650	0,018	0,82	0,0148
14	TiAlN	760	0,02	0,86	0,0172
15	TiAlSiN	600	0,02	0,82	0,0164

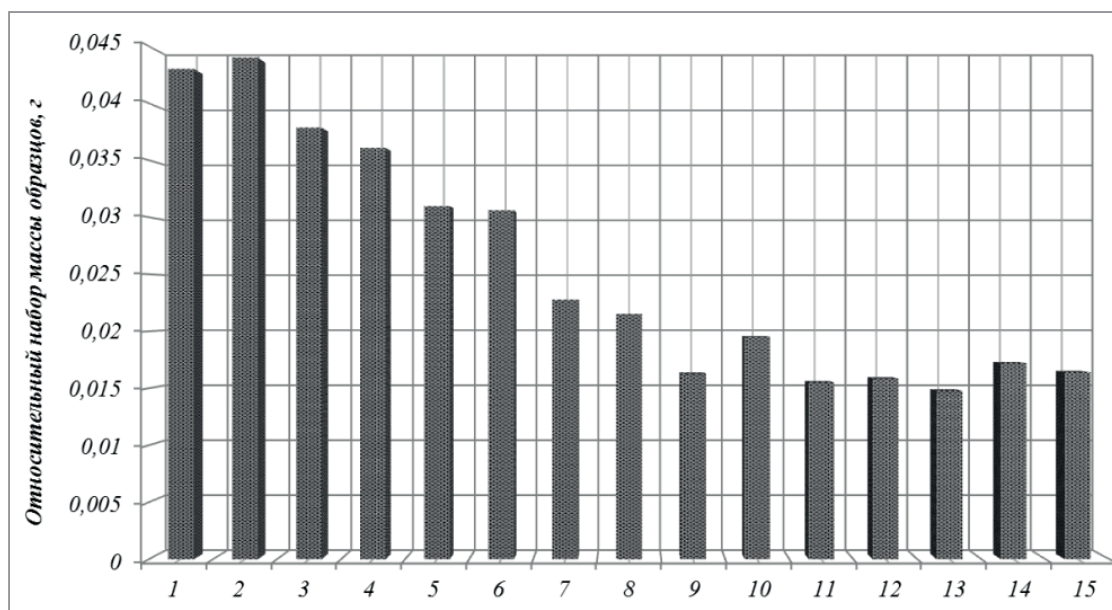


Рис. 4. Результаты прогнозной оценки жаростойкости разработанных композиций по данным жаростойкости диффузионных слоев и окислительности покрытий с уровнем их кислородной проницаемости при толщине 1–3 мкм до температуры 700 °С:

Диффузионные слои: 1, 2 – боридный; 3, 4 – силицидный; 5, 6 – бороазотированный; 7–10 – борохромированный; 11–13 – бороалитированный; 14, 15 – боросилицидный.

Покрытия: 1, 3, 5, 8, 11, 14 – TiAlN; 2, 12 – TiCN; 4, 13, 15 – TiAlSiN; 6 – TiAlCN; 7 – CrN; 9 – TiAlCrYN; 10 – CrTiN

Установлено, что наиболее жаростойкими являются двухслойные композиционные покрытия на углеродистых сталях, полученные в результате предварительного бороалитирования, боросилицирования и борохромирования, в меньшей степени бороазотирования, силицирования или борирования стальной подложки. Оценка влияния ионно-плазменных покрытий на дополнительное повышение жаростойкости сталей с полученными термодиффузионными слоями показала, что наиболее эффективными для повышения жаростойкости поверхности являются следующие составы покрытий: TiAlCrYN, CrTiN, TiAlSiN, TiAlCN, TiAlN, в меньшей степени – TiCN, CrN.

Показано, что сочетание борохромирования, бороалитирования и боросилицирования с последующим нанесением одинаковых вакуумно-плазменных покрытий толщиной более 1 мкм повышает жаростойкость поверхности не пропорционально жаростойкости термодиффузионных слоев. Повышение жаростойкости поверхности с диффузионным слоем от нанесения вакуумного покрытия тем больше, чем выше жаростойкость диффузионного слоя и такое повышение жаростойкости носит не аддитивный характер.

Установлено, что наибольшая прогнозная жаростойкость поверхности у стальных образцов с термодиффузионным бороалитированным слоем и покрытием бороалитированный слой – покрытие TiAlSiN, которая по относительному набору массы в окислительной атмосфере при температурах до 600 °С в 2,9 раза выше, чем наименее жаростойкой композиции, получаемой на стали в результате борирования и нанесения покрытия TiAlN. Наиболее высокую температуру начала интенсивного окисления поверхности демонстрируют композиции, получаемые в результате силицирования, бороалитирования и боросилицирования, однако пористость силицидных слоев на стали приводит к значительному их окислению и повышению относительного набора массы, а также к существенному снижению микротвердости и качества поверхности с вакуумно-плазменным покрытием.

Выводы

Проанализирована жаростойкость нитридных вакуумных покрытий, а также ряда многокомпонентных термодиффузионных слоев на углеродистых сталях. Обоснована гипотеза о возможности повышения жаростойкости доэвтектидных углеродистых сталей путем предварительного термодиффузионного легирования с последующим нанесением вакуумных нитридных покрытий.

Исследована жаростойкость покрытий композиционного типа «термодиффузионный слой – вакуумное ионно-плазменное покрытие». Установлено корреляционное влияние различных типов

предварительного термодиффузионного легирования стальной основы на жаростойкость композиционных покрытий.

Разработаны составы ряда новых жаростойких композиций типа «термодиффузионный слой – вакуумное ионно-плазменное покрытие» на основе бороалитированных, боросилицированных, борохромированных, бороазотированных, силицированных и боридных слоев и вакуумных покрытий TiAlN, TiCN, TiAlCN, CrN, CrTiN, TiAlSiN и TiAlCrYN для повышения жаростойкости углеродистых доэвтектоидных сталей. Обоснованы составы и допустимые температуры обеспечения минимальной жаростойкости разработанных композиций.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Хоккинг, М.** Металлические и керамические покрытия: получение, свойства и применение / М. Хоккинг, В. Вассантари, П. Сидки: Пер. с англ. М.: Мир, 2000. 518 с.
2. **Ткаченко, Г. А.** Повышение коррозионной стойкости стальных деталей комплексной обработкой / Г. А. Ткаченко, А. В. Ковальчук // Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий: материалы 3-го Респ. науч.-техн. семинара. Минск, 5–6 декабря 2013 г. Минск: БГТУ, 2013. С. 119–122.
3. **Константинов, В. М.** Свойства двухслойных износостойких покрытий «термодиффузионный слой – TiAlN» на сталях / В. М. Константинов, А. В. Ковальчук, В. Г. Дашкевич // Журнал физики и инженерии поверхности. 2016. Т. 1. № 2. С. 213–224.
4. **Константинов, В. М.** Разработка аддитивных технологий упрочнения конструкционных сталей на основе химико-термической обработки и нанесения ионно-плазменных покрытий / В. М. Константинов, Ф. Ф. Комаров, А. В. Ковальчук, С. В. Константинов // Актуальные проблемы прочности. В 2-х т. Т. 2. Витебск: УО «ВГТУ», 2018. С. 377–401.
5. **Komarov, F. F.** The effect of steel substrate pre-hardening on structural, mechanical, and tribological properties of magnetron sputtered TiN and TiAlN coatings / F. F. Komarov, V. M. Konstantinov, A. V. Kovalchuk, S. V. Konstantinov, H. A. Tkachenko // Wear. 2016. Vol. 352–353. P. 92–101.
6. **Елагина, О. Ю.** Технологические методы повышения износостойкости деталей машин: учеб. пособие / О. Ю. Елагина. М.: Логос, 2009. 488 с.
7. **Ляхович, Л. С.** Многокомпонентные диффузионные покрытия / Л. С. Ляхович, Л. Г. Ворошнин, Г. Г. Панич, Э. Д. Щербаков. Минск: Наука и техника, 1974. 288 с.
8. **Крукович, М. Г.** Пластичность борированных слоев / М. Г. Крукович, Б. А. Прусаков, И. Г. Сизов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 384 с.
9. **Ляхович, Л. С.** Силицирование металлов и сплавов / Л. С. Ляхович, Л. Г. Ворошнин, Э. Д. Щербаков, Г. Г. Панич. Минск: Наука и техника, 1972. 280 с.
10. **Ворошнин, Л. Г.** Современные износостойкие диффузионные покрытия / Л. Г. Ворошнин // Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов: сборник науч. тр., посвященный 40-летию кафедры «Материаловедение в машиностроении». Минск: БНТУ, 2004. С. 10–21.
11. **Берлин, Е. В.** Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей / Е. В. Берлин, Н. Н. Коваль, Л. А. Сейдман. М.: Техносфера, 2012. 464 с.
12. **Земсков, Г. В.** Многокомпонентное диффузионное насыщение металлов и сплавов / Г. В. Земсков, Р. Л. Коган. М.: Металлургия, 1978. 208 с.
13. **Ворошнин, Л. Г.** Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Спр. / Под ред. Л. С. Ляховича. М.: Металлургия, 1981. 424 с.
14. **Кайдаш, Н. Г.** Структура и свойства боридосилицидных покрытий на железе и стали / Н. Г. Кайдаш, Л. Н. Четверикова // Вест. Черкас. нац. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2007. № 114. С. 89–115.
15. **Раднаев, Б. В.** Жаростойкость слоев боридов переходных металлов на углеродистой стали 20 / Б. В. Раднаев, А. С. Милонов, Н. Н. Смирнягина // Вест. Бурят. гос. ун-та. 2011. № 3. С. 199–203.
16. **Галынская, Н. А.** Упрочняющая обработка штампов для глубокой вытяжки / Н. А. Галынская, Н. Г. Кухарева, С. Н. Петрович, Г. В. Стасевич // Вест. Белорус. нац. техн. ун-та. 2010. № 4. С. 30–34.
17. **Макеев, Д. Н.** Влияние вводимых легирующих элементов на свойства стали / Д. Н. Макеев // Вест. СГТУ. 2012. № 3(67). С. 92–98.
18. **Быкова, Т. М.** Влияние химического состава стали на структуру и свойства диффузионных боридных покрытий: Дисс. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2016. 164 с.
19. **Бирке, Н.** Введение в высокотемпературное окисление металлов / Н. Бирке, Д. Майер. М.: Металлургия, 1987. 189 с.
20. **Kutz, M (Ed.)** Mechanical Engineers' Handbook: Manufacturing and Management / 3rd ed. – ASM International, 2006. Vol. 3. 880 p.
21. **Gleiter, H.** Nanostructured Materials: Basic Concepts and Microstructure / H. Gleiter // Acta Materialia. 2000. Vol. 48, No. 1. Pp. 1–29.
22. **Douglas, B. E.** Structure and chemistry of crystalline solids. New York: Springer, 2006. 346 p.

REFERENCES

1. **Hokking M. et al.** *Metallicheskie i keramicheskie pokrytiya: poluchenie, svojstva i primenenie* [Metal and ceramic coatings: production, properties and application]. Moscow, Mir Publ., 2000, 518 p.
2. **Tkachenko G. A., Kovalchuk A. V.** *Povyshenie korrozionnoj stojkosti stal'nyh detalej kompleksnoj obrabotkoj* [Improving corrosion resistance of steel parts by integrated treatment]. *Materialy 3-go respublikanskogo nauchno-tekhnicheskogo seminar, Minsk, 5–6 dekabrya* = *Materials of the third national scientific and technical seminar, Minsk, December 5–6*, BGTU, 2013, pp. 119–122.
3. **Konstantinov V. M. et al.** *Svojstva dvuslojnyh iznosostojkih pokrytij «termodiffuzionnyj sloj – TiAlN» na stalyah* [Properties of two-layer wear-resistant coatings «thermodiffusion layer – TiAlN» on steels]. *Zhurnal fiziki i inzhenerii poverhnosti = Journal of Surface Physics and Engineering*, 2016, vol. 1, no. 2, pp. 213–224.

4. **Konstantinov V. M. et al.** Razrabotka additivnykh tekhnologiy uprochneniya konstruktsionnykh stalej na osnove himiko-termicheskoy obrabotki i naneseniya ionno-plazmennyykh pokrytij [Development of additive technologies of strengthening for structural steels based on chemical-thermal treatment and plasma-ion coating]. *Aktual'nye problemy prochnosti: = Current strength problems*, Vitebsk, UO «VGTU» Publ., 2018, vol. 2, pp. 377–401.
5. **Komarov F. F. et al.** *The effect of steel substrate pre-hardening on structural, mechanical, and tribological properties of magnetron sputtered TiN and TiAlN coatings*. Wear, Elsevier Science Publishing Company Publ., Inc, 2016, vol. 352–353, pp. 92–101.
6. **Elagina O. Y.** *Tekhnologicheskie metody povysheniya iznosostojkosti detalej mashin* [Technological techniques for improving the wear resistance of machine parts]. Moscow, Logos Publ., 2009, 488 p.
7. **Lyahovich L. S.** *Mnogokomponentnye diffuzionnye pokrytiya* [Multi-component diffusion coatings]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1974, 288 p.
8. **Krukovich M. G. et al.** *Plastichnost' borirovannykh sloev* [Plasticity of borided layers] Moscow, FIZMATLIT Publ., 2010, 384 p.
9. **Lyahovich L. S. et al.** *Silicirovanie metallov i spлавov* [Silification of metals and alloys] Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1972, 280 p.
10. **Voroshnin L. G.** *Sovremennyye iznosostojkie diffuzionnye pokrytiya* [Modern wear-resistant diffusion coatings]. *Perspektivy razvitiya poverhnostnogo i ob'emnogo uprochneniya spлавov: sbornik nauch. tr., posvyashchennyj 40-letiyu kafedry "Materialovedenie v mashinostroenii" = Prospects for surface and volumetric reinforcement of alloys: collection of scientific works dedicated to the 40th anniversary of the Department "Materials Science in Mechanical Engineering"*. Minsk, BNTU Publ., 2004, pp. 10–21.
11. **Berlin E. V. et al.** *Plazmennaya himiko-termicheskaya obrabotka poverhnosti stal'nykh detalej* [Plasma thermo-chemical surface treatment of steel parts]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2012, 464 p.
12. **Zemskov G. V. et al.** *Mnogokomponentnoe diffuzionnoe nasyschenie metallov i spлавov* [Multi-component diffusion of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 208 p.
13. **Voroshnin L. G.** *Himiko-termicheskaya obrabotka metallov i spлавov* [Thermo-chemical treatment of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981, 424 p.
14. **Kajdash N. G. et al.** *Struktura i svoystva boridosilicidnykh pokrytij na zheleze i stali* [Structure and properties of boridesilicided coatings iron and steel]. *Vestnik Cherkasskogo nacional'nogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki = Bulletin of Cherkassy National University, Physics and Mathematics Series*, 2007, no. 114, pp. 89–115.
15. **Radnaev B. V. et al.** *Zharostojkost' sloev boridov perekhodnykh metallov na uglirodistoj stali 20* [Heat resistance of transition metal boride layers on carbon steel 20]. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Buryat State University*, 2011, no. 3, pp. 199–203.
16. **Galynskaya N. A. et al.** *Uprochnyayushchaya obrabotka shtampov dlya glubokoj* [Strengthening of deep extraction stamps]. *Vestnik Belorusskogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Belarusian National Technical University*, 2010, no. 4, pp. 30–34.
17. **Makeev D. N.** *Vliyanie vvodimyykh legiruyushchih elementov na svoystva stali* [Effect of introduced alloying elements on steel properties]. *Vestnik SGTU = Bulletin of SGTU*, 2012, no. 3(67), pp. 92–98.
18. **Bykova T. M.** *Vliyanie himicheskogo sostava stali na strukturu i svoystva diffuzionnykh boridnykh pokrytij*. Diss. kand. tekhn. nauk [Influence of the chemical composition of steel on the structure and properties of diffuse borided coatings. Ph.D. tech. sci. diss.], Ekaterinburg, 2016, 164 p.
19. **Birke N., Mayer D.** *Vvedenie v vysokotemperaturnoe okislenie metallov* [Introduction of metals to high temperature oxidation]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 189 p.
20. **Kutz M.** *Mechanical Engineers Handbook: Manufacturing and Management*, 3rd ed, ASM International, 2006, vol. 3, 880 p.
21. **Gleiter H.** *Nanostructured Materials: Basic Concepts and Microstructure*, Acta Materiali Publ., 2000, vol. 48, no. 1, pp. 1–29.
22. **Douglas B. E.** *Structure and chemistry of crystalline solids*. New York, Springer Publ., 2006, 346 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-148-151>
УДК 539.26: 621.785.78

Поступила 06.10.2020
Received 06.10.2020

О ВЛИЯНИИ УПРУГИХ МЕЖФАЗОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ШИРИНУ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ВЫДЕЛЯЮЩЕЙСЯ ФАЗЫ В ДИСПЕРСИОННО-ТВЕРДЕЮЩИХ СПЛАВАХ

А. В. ТОЛСТОЙ, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: labmetal@rambler.ru

Изучено влияние полей упругих межфазовых деформаций на величину уширения отражений от фазы выделения. Установлено, что в сильно искаженных кристаллах упругие межфазовые деформации оказывают существенное влияние на величину уширения отражений от фазы выделения. В связи с тем что по уширению дифракционных линий судят о размерах частиц выделения, это приводит к значительной ошибке в оценке их истинной величины. Поэтому влияние полей упругих межфазовых деформаций, несомненно, должно приниматься во внимание при определении размеров частиц из рентгеновских данных.

Ключевые слова. Рентгеноструктурный анализ, старение сплавов, поля упругих межфазовых деформаций, уширение дифракционных линий.

Для цитирования. Толстой, А. В. О влиянии упругих межфазовых деформаций на ширину отражений от выделяющейся фазы в дисперсионно-твердеющих сплавах / А. В. Толстой // *Литье и металлургия*. 2020. № 4. С. 148–151. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-148-151>.

ON THE INFLUENCE OF ELASTIC INTERPHASE DEFORMATIONS ON THE WIDTH OF REFLECTIONS FROM THE RELEASED PHASE IN DISPERSION HARDENING ALLOYS

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 influence of fields of elastic interphase deformations on the amount of broadening of reflections from the separation phase is studied. It is established that elastic interphase deformations in strongly distorted crystals have a significant effect on the amount of broadening of reflections from the separation phase. Due to the fact that the broadening of the diffraction lines is used to judge the size of the selection particles, this leads to a significant error in estimating their true value. Therefore, the influence of elastic interphase strain fields should certainly be taken into account when determining particle sizes from x-ray data.

Keywords. X-ray analysis, aging of alloys, the fields of elastic interphase deformations, the broadening of the diffraction lines.

For citation. Tolstoy A. V. On the influence of elastic interphase deformations on the width of reflections from the released phase in dispersion hardening alloys. *Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 4, pp. 148–151. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-148-151>.

В работах [1, 2] было показано, что поля упругих атомных смещений, образующиеся из-за несоответствия атомных объемов матричной и выделяющейся фаз, вызывают ряд особенностей в распределении интенсивности матричных отражений, в частности таких, как их уширение и образование своеобразных дублетов, обусловленных одновременным присутствием правильных (I0) и диффузных (I1) максимумов. Вместе с тем, остается неясным, влияют ли и в какой степени упругие межфазовые деформации на вид отражений от выделяющейся фазы. Речь идет об упругих деформациях, которым подвергаются сами частицы выделяющейся фазы.

Как известно [1], упругая деформация частиц включает в себя упругую однородную деформацию (однородное сжатие, если $\Delta v/v > 0$, или однородное расширение, если $\Delta v/v < 0$) и неоднородную упругую деформацию, вызываемую упругими атомными смещениями, исходящими от окружающих частиц и убывающих обратно пропорционально квадрату расстояния от их центров. Для случая слабо искаженных кристаллов вопрос о роли таких неоднородных полей в формировании отражений от фазы

выделения был теоретически рассмотрен М. А. Кривоглазом. Причем было установлено, что слабые неоднородные поля практически не влияют на вид отражений от выделяющейся фазы [1]. В случае же кристаллов с сильными искажениями вопрос о влиянии неоднородных полей упругих межфазовых деформаций на характер отражений от выделяющейся фазы теоретически не рассматривался.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение этого вопроса. Его решение имеет не только научное, но и важное практическое значение, поскольку по уширению дифракционных линий выделяющейся фазы, как известно, судят о размере ее частиц. Однако, как будет показано ниже, упругие межфазовые деформации вносят существенный вклад в величину уширения дифракционных линий выделяющейся фазы. Поэтому оценка размера частиц выделения, выполненная без учета этого факта, неизбежно приводит к ошибочным результатам.

Методика эксперимента

Для исследования был взят типичный дисперсионно-твердеющий сплав типа нимоник (Ni-Cr-Al-Ti) промышленной марки ХН77ТЮР, содержащий Cr – 20,22%; Ti – 2,60; Al – 0,82; остальное – Ni. Как известно, при его старении выделяется дисперсная фаза состава $Ni_3(Al, Ti)$ со структурой, изоморфной матрице. Частицы фазы выделения имеют равноосную форму и хаотически распределены в матрице сплава. Вследствие различия атомных объемов выделяющейся и матричной фаз (фактор объемного несоответствия $\Delta v/v = (v_B - v_A)/v_A$, где v_B и v_A – атомные объемы соответственно фазы выделения и матрицы для этого сплава составляют 0,02 [3]) и упругого характера распада в сплаве образуются мощные упругие межфазовые деформации.

Образцы для исследования диаметром 26 мм и толщиной 6 мм изготавливали из прокованных прутков сплава. Термообработка образцов состояла из гомогенизационного отжига при 1080 °С, 8 ч, закалки на воздухе и старении при различных режимах (750 °С, выдержки от 15 до 300 ч, 850 °С, выдержки от 10 до 300 ч). Удаление оксидного слоя с поверхности термообработанных образцов проводили путем механической шлифовки и последующего электрополирования на глубину 0,2 мм. Изолирование от матрицы выделяющейся при старении γ' -фазы проводили методом электрохимического разделения фаз в электролите состава: аммоний серноокислый – 10 г, лимонная кислота – 10 г, вода – 1200 мл.

Рентгенографическое изучение фазы выделения проводили на дифрактометре ДРОН-УМ1 в кобальтовом излучении. Дифрагированный пучок монохроматизировался с помощью графитового кристалла марки МГП-РД. Регистрировали сверхструктурные отражения от γ' -частиц, находящихся как в твердом растворе, так и в изолированном от него состоянии. Выбор для анализа сверхструктурных отражений обусловлен тем, что при съемке неэкстрагированной от матрицы γ' -фазы ее структурные линии практически совпадают с отражениями от твердого раствора. Дифракционные линии записывали в режиме сканирования с интервалом 0,1 ° при времени счета в каждой точке 100 с. В связи с тем что регистрируемые сверхструктурные отражения γ' -фазы в неизолированном от матрицы состоянии имели очень малую интенсивность, применяли метод многократного (20-кратного) сканирования линии с последующим суммированием числа импульсов в каждой точке интервала сканирования. Уширение дифракционных линий находили методом гармонического анализа. В качестве эталона применяли порошок γ' -фазы исследуемого сплава, эффективный размер частиц которой превышает 200 нм. Расчеты проводили с помощью ЭВМ.

Результаты и их обсуждение

Результаты определения уширения дифракционной линии 321 γ' -фазы, находящейся в неизолированном и изолированном от матрицы состоянии, приведены в таблице. Из таблицы видно, что в случае съемки изолированных порошков γ' -фазы уширение ($\beta_{\text{изол}}$) ее дифракционной линии 321 с ростом продолжительности старения последовательно уменьшается и после 300 ч выдержки при 850 °С падает до нуля.

При записи отражений от неизолированной γ' -фазы уширение ($\beta_{\text{неиз}}$) линии 321 также уменьшается, но если при температуре старения 750 °С ширина линии изолированной и неизолированной γ' -фазы одинакова, то при 850 °С и выдержках свыше 10 ч величина уширения отражения от неизолированной фазы оказывается выше уширения от порошка фазы, изолированной из того же образца. Например, если после 100 ч старения при 850 °С уширение линии 321 от изолированной фазы составляет $3,3 \cdot 10^3$ рад, то неизолированной – $7,4 \cdot 10^3$ рад. Еще более существенное различие наблюдается после выдержки длительностью 300 ч. Уширение линии на порошковой рентгенограмме уменьшается до нуля, тогда как у неизолированной фазы имеет значение $7,0 \cdot 10^3$ рад.

Влияние продолжительности старения на уширение дифракционной линии (321) γ' -фазы и структурные параметры сплава

Режим старения	L	Неизолированная γ' -фаза		Изолированная γ' -фаза		$\beta_n \cdot 10^3$, рад	$\beta_d \cdot 10^3$, рад
		$\beta \cdot 10^3$, рад	D , нм	$\beta \cdot 10^3$, рад	D , нм		
750 °C, 15 ч	0,9	31,0	16	31,0	16	0	31,0
750 °C, 150 ч	3,0	15,4	32	15,4	32	0	15,4
750 °C, 300 ч	3,7	13,7	36	13,7	36	0	13,7
850 °C, 10 ч	1,6	15,2	27	15,2	27	0	15,2
850 °C, 25 ч	5,1	10,7	50	9,0	55	1,2	9,0
850 °C, 100 ч	24	7,4	68	3,3	150	4,1	3,3
850 °C, 300 ч	40	7,0	71	0	>200	7,0	0

Аналогичная картина наблюдается и при записи отражений 210 и 110 γ' -фазы. Различие заключается лишь в абсолютных значениях величины уширения линий. Поэтому ограничимся рассмотрением данных, полученных при записи линии 321.

Для объяснения наблюдаемого характера изменения уширения дифракционных линий фазы выделения обратимся к результатам работ [4, 5]. В частности, в [5] изучена кинетика выделения дисперсной фазы при старении исследуемого сплава и показано, что распад сплава сопровождается ростом частиц выделяющейся фазы. Поскольку при съемке порошков γ' -фазы уширение ее дифракционных линий определяется размером частиц выделения, то наблюдаемое изменение ширины отражений от изолированной γ' -фазы отражает изменение размеров частиц выделения. С другой стороны, как показано в [4, 5], старение сплава ХН77ТЮР вызывает образование в его матрице вокруг частиц выделения сильных полей упругих атомных смещений. Естественно предположить, что наблюдаемое в эксперименте более высокое уширение линий неизолированной фазы по сравнению с экстрагированной из его матрицы обусловлено тем, что на уширение линий γ' -фазы оказывают влияние поля упругих атомных смещений. В пользу этого говорит следующий факт. Как известно [1, 2], мощность полей упругих атомных смещений в сплаве характеризуется величиной фактора L , определяющего ослабление интенсивности правильных отражений $I_0(I_0 \sim e^L)$. Из приведенных в таблице данных видно, что чем больше значение L , т.е. чем сильнее искажения решетки, тем больше различие в величине уширения линий неизолированной и изолированной γ' -фазы. Причем это различие начинает проявляться при значениях $L > 4$.

Здесь следует подчеркнуть принципиальное различие в поведении уширения дифракционных линий фазы выделения и твердого раствора в зависимости от мощности упругих полей. Так, вид профиля и ширина линий твердого раствора претерпевают существенные изменения лишь при малых значениях L ($L \leq 3-4$). Когда значение L достигает величины ~ 4 , линии твердого раствора принимают однородно уширенную форму и при дальнейшем увеличении мощности полей упругих межфазовых деформаций (по крайней мере в интервале значений $L = 4-40$) ширина линий твердого раствора остается неизменной. В случае же отражений от фазы выделения наблюдается прямо противоположная картина. При малых значениях L искажения решетки не оказывают влияния на уширение ее линий. Однако когда величина L становится больше ~ 4 , влияние упругих полей на уширение отражений от γ' -фазы становится заметным. Причем это влияние тем больше, чем больше величина L , т.е. чем сильнее искажения решетки.

Данные, иллюстрирующие влияние полей упругих атомных смещений на уширение дифракционного максимума неизолированной γ' -фазы, приведены в таблице. Здесь β_n обозначает долю уширения, обусловленную полями упругих атомных смещений, а β_d – связанную с дисперсностью частиц выделения. Видно, что при больших искажениях решетки доля уширения от полей упругих атомных смещений весьма существенна. Например, при $L = 24$ она составляет $\sim 60\%$ от общего уширения линии, а при $L = 40$ все уширение дифракционной линии обусловлено лишь этими полями.

Таким образом, полученные экспериментальные данные показывают, что в сильно искаженных кристаллах упругие межфазовые деформации оказывают существенное влияние на величину уширения отражений от фазы выделения. В связи с тем что по уширению дифракционных линий судят о размерах частиц выделения, это приводит к значительной ошибке в оценке их истинной величины. Так, после старения 850 °C, 300 ч размер частиц выделения, измеренный по уширению дифракционной линии 321 γ' -фазы, находящейся в неизолированном от матрицы состоянии, равен $D = 71$ нм, тогда как в действительности частицы выделения после указанной термообработки имеют размер, превышающий 200 нм. Поэтому влияние полей упругих межфазовых деформаций, несомненно, должно приниматься во внимание при определении размеров частиц из рентгеновских данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кривоглаз, М. А.** Теория рассеяния рентгеновских лучей и тепловых нейтронов реальными кристаллами / М. А. Кривоглаз. М.: Наука, 1967. 336 с.
2. **Кривоглаз, М. А.** Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах / М. А. Кривоглаз. Киев: Наукова думка, 1983. 286 с.
3. **Гитгарц, М. И.** К вопросу о природе уширения дифракционных линий при старении сплавов / М. И. Гитгарц // Физика металлов и металловедение. 1965. Т. 19. № 3. С. 381–388.
4. **Гитгарц, М. И.** Упругие напряжения и деформации в выделении и матрице при распаде твердого раствора сплава ЭИ437А // Физика металлов и металловедение. 1966. Т. 22. № 2. С. 221–226.
5. **Гитгарц, М. И.** О природе упрочнения стареющих сплавов типа нимоник / М. И. Гитгарц, В. В. Ивашин // Физика металлов и металловедение. 1975. Т. 39. № 6. С. 1226–1232.

REFERENCES

1. **Krivoglaz M.A.** *Teoriya rassejaniya rentgenovskih luchej i teplovyh nejtronov real'nyimi kristallami* [Theory of X-ray and thermal neutron scattering by real crystals]. Moscow, Nauka Publ., 1967, 336 p.
2. **Krivoglaz M.A.** *Difrakcija rentgenovskih luchej i nejtronov v neideal'nyh kristallah* [X-ray and neutron diffraction in non-ideal crystals]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1983, 286 p.
3. **Gitgarc M.I.** K voprosu o prirode ushirenija difrakcionnyh linij pri starenii splavov [On the nature of the broadening of diffraction lines during aging of alloys]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of metals and metal science*, 1965, vol. 19, no. 3, pp. 381–388.
4. **Gitgarc M.I.** Uprugie naprjazhenija i deformacii v vydelenii i matrice pri raspa-de tverdogo rastvora splava JeI437A [Elastic stresses and strains in the precipitate and matrix during the decomposition of the solid solution of the EI437A alloy]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of metals and metal science*, 1966, vol. 22, no. 2, pp. 221–226.
5. **Gitgarc M.I., Ivashin V.V.** O prirode uprochnenija starejushhih splavov tipa nimonik [On the nature of hardening of aging alloys of the nimonic type]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of metals and metal science*, 1975, vol. 39, no. 6, pp. 1226–1232.



Уважаемые читатели!

Предлагаем Вашему вниманию серию статей, посвященных важнейшей научно-технической проблеме XXI века, которую многие называют нанореволюцией, – наноматериалам, нанотехнологиям и их применению в литейном производстве.

1. Общие проблемы развития и внедрения нанотехнологий и наноматериалов.
2. Возможности использования нанотехнологий и наноматериалов в материаловедении, металлургии и литейном производстве.
3. Результаты исследований в области наноматериалов и нанотехнологий в Республике Беларусь.

Dear Readers!

We bring to your attention a series of articles devoted to the most important scientific and technical problem of the XXI century, which many call the nanorevolution, – nanomaterials, nanotechnologies and their application in foundry:

1. General problems of development and implementation of nanotechnologies and nanomaterials.
2. Possibilities of using nanotechnology and nanomaterials in materials science, metallurgy and foundry.
3. Results of research in the field of nanomaterials and nanotechnology in the Republic of Belarus.

<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-152-162>

УДК 620.3; 621.74

Поступила 09.11.2020

Received 09.11.2020

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ И ВНЕДРЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Ю. А. НИКОЛАЙЧИК, Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: foundry@bntu.by

Д. В. КУИС, Н. А. СВИДУНОВИЧ, Белорусский государственный технологический университет,

г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а. E-mail: KuisDV@belstu.by

С. Л. РОВИН, Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65

Настоящая статья является первой статьей цикла, посвященного вопросам создания и применения наноматериалов и технологий в современной промышленности в целом и в металлургии, материаловедении и литейном производстве в частности. Рассматриваются уникальные свойства наноматериалов и связанные с этими свойствами преимущества и недостатки, области применения этих материалов, а также проблемы и направления развития нанотехнологий, перспективы и последствия широкого применения наноматериалов в различных сферах, их влияние на развитие общества, производства, экономику и экологию.

Ключевые слова. Наноматериалы, нанотехнологии, свойства материалов, экология, энергоэффективность, ресурсосбережение.

Для цитирования. Николайчик, Ю. А. Общие проблемы развития и внедрения наноматериалов и нанотехнологий /

Ю. А. Николайчик, Д. В. Куис, Н. А. Свидунович, С. Л. Ровин // *Литье и металлургия*. 2020. № 4. С. 152–162.

<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-152-162>.

GENERAL PROBLEMS OF DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

Yu. A. NIKALAICHYK, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.

E-mail: foundry@bntu.by

D. V. KUIS, N. A. SVIDUNOVICH, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.

E-mail: KuisDV@belstu.by

S. L. ROVIN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.

This article is the first in a cycle devoted to the creation and application of nanomaterials and technologies in modern industry, in general, and in metallurgy, materials science and foundry, in particular. The article discusses the unique properties of nanomaterials and the associated advantages, disadvantages and areas of their application, as well as the problems and directions of the development of nanotechnologies, the prospects and consequences of the widespread use of nanomaterials in various fields, their influence on the development of society, industry, economy and ecology.

Keywords. Nanomaterials, nanotechnology, material properties, ecology, energy efficiency, resource conservation.

For citation. Nikalaichyk Yu. A., Kuis D. V., Svidunovich N. A., Rovin S. L. General problems of development and implementation of nanomaterials and nanotechnologies. *Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 4, pp. 152–162. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-152-162>.

Сравнительно недавно лишь очень немногие ученые и инженеры работали в области исследования наноструктур и разработки нанотехнологий, и далеко не все специалисты смежных областей имели представление об этой сфере, не говоря уже об обычных людях. Сегодня интерес к наноматериалам достиг настоящего ажиотажа, в котором могут потеряться ориентиры и ключевые результаты исследований.

В научном сообществе до сих пор нет единого мнения о перспективах развития нанотехнологий. Некоторые уверены в безграничных возможностях нанотехнологий и предсказывают революционный прорыв в промышленном производстве и социально-экономической сфере. Другие, и среди них есть весьма серьезные ученые, с явным неодобрением относятся к поднятой вокруг нанотехнологий суете и рассматривают это как неизбежное зло, всегда сопровождающее крупные проекты. Есть и те, кто считает крикливые заявления и оголтелую рекламу признаками очередного околonaучного «пузыря», основной задачей которого является выкачивание бюджетных средств для финансирования своих лабораторий и исследований, проводившихся в общем то и до нанотехнологического бума [1].

Однако большинство экспертов в области стратегического планирования, научно-технической политики и инвестирования уверены, что в ближайшее десятилетие нас ждет новая научно-техническая революция – нанореволюция, которая затронет все области науки, производства, национальной безопасности, медицины, быта, отдыха и развлечений. Последствия ее будут не менее значимыми, чем изменения, вызванные компьютерной революцией последней трети XX века. И этому уже есть весомые подтверждения в самых разных сферах жизни. Сегодня в государственных программах практически всех экономически развитых стран в качестве приоритетных направлений научно-технического развития указаны исследования в области нанотехнологий, что призвано обеспечить скорейшее преодоление последствий кризиса и стабильный рост экономики на ближайшие десятилетия [4, 5].

Важнейшей тенденцией и требованием современного этапа развития техники и технологии является сокращение доли сырья и материалов, а также энергии в себестоимости готового продукта при значительном увеличении затрат на предварительные исследования, проектирование, разработку оборудования и технологии. Расширение объемов и областей применения наноматериалов является одним из факторов, обеспечивающих реализацию этих тенденций.

Согласно мнению многих авторитетных экспертов, так называемый блок NBIC (нано-, био-, информ- и когнитивные технологии) может успешно развиваться только в условиях прогресса в трех связанных и взаимозависимых сферах: 1) фундаментальная наука; 2) образование и просвещение; 3) инновационные разработки и бизнес.

Для успешного развития нанотехнологий и их внедрения во все сферы жизни необходимо углублять представления о структуре и свойствах нанобъектов и наноматериалов, фундаментальных принципах и закономерностях их поведения, разрабатывать специальные технологии их получения и применения, а также системно и комплексно оценивать последствия их глобального внедрения во все сферы жизни человека (рис. 1).

Чтобы не оказаться на обочине мировой цивилизации, необходимо соответствующим образом выстраивать инфраструктуру экономики и управления, совершенствовать систему образования, разумно инвестировать в фундаментальную науку и поддерживать инновационные разработки, быстро доводя их до рынка.

Гармоничное и безопасное развитие нанотехнологий невозможно без налаживания кооперации между их потенциальными пользователями и разработчиками. Только в этом случае инвестиции будут оправданными и успешными, а нежелательные последствия вовремя обнаружены, проанализированы и погашены.

Действительно, наночастицы обладают уникальными свойствами и могут быть чрезвычайно полезны для создания новых материалов, электроники, лекарств, но, с другой стороны, они могут проникать через все биологические мембраны, кожу, накапливаться в тканях, самоорганизовываться в более

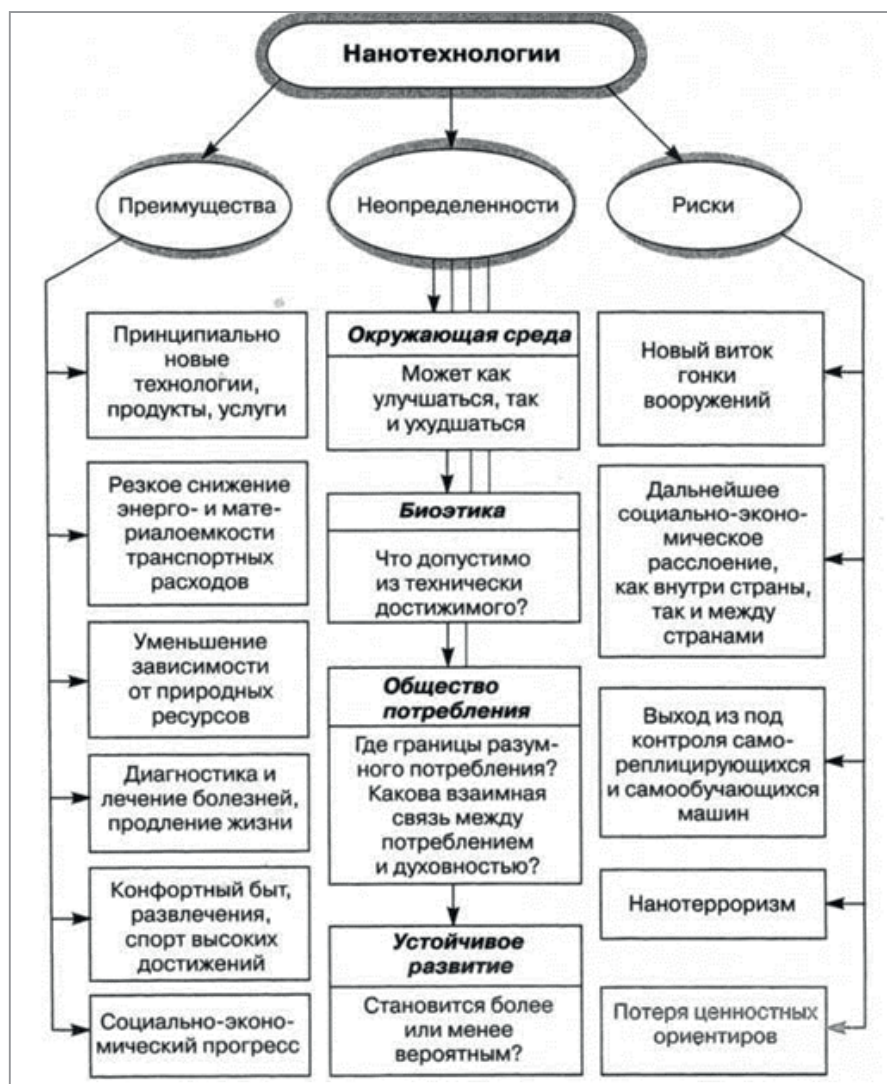


Рис. 1. Анализ прогнозируемых последствий научно-технической нанореволюции [4]

сложные структуры, влиять на протекание биохимических реакций в организме и т.д. Еще более радикальные изменения (на генетическом уровне) могут произойти в процессе модифицирования ДНК. Уже сейчас возникают этические проблемы, касающиеся окружающей среды, здоровья людей, безопасности на индивидуальном и государственном уровне.

Необходимо принимать во внимание и косвенное влияние развития нанотехнологий, подобно тому как это происходит при разработке технологий двойного назначения (военных, аэрокосмических, информационных). Строительство интеллектуальных наносистем, трансгенная инженерия, развитие нанобиотехнологий и наномедицины, широкое использование генномодифицированных растений и животных в сельском хозяйстве, нетрадиционная энергетика, оптимальное природопользование и охрана окружающей среды требуют комплексных решений, принимаемых на новом интеллектуальном и морально-этическом уровне. Однако, осознавая все неопределенности и риски, следует согласиться с мнением, часто высказываемым крупнейшими авторитетами в науке и высокотехнологичном бизнесе, что «самая большая опасность, исходящая от нанотехнологий, которая может нанести наибольший ущерб обществу, это не развивать эти технологии!»

Сегодня имеется уже значительное количество обзоров, монографий, учебно-методической литературы, посвященных различным аспектам нанонауки и нанотехники, но в то же время ощущается недостаток в систематизации знаний, накопленных в этой сфере [1–26].

В Республике Беларусь также уделяется большое внимание исследованию, применению и развитию нанотехнологий, имеется государственная научно-техническая программа по наноматериалам и нанотехнологиям (научный руководитель программы – академик П.А. Витязь), изданы учебные пособия, монографии, публикуется значительное количество научных статей [27–30].

К наноструктурным принято относить материалы, состоящие из элементов (частиц), один из характерных размеров которых лежит в интервале от 1 до 100 нм. Именно присутствие специфических наноразмерных элементов структуры (морфологических единиц) придает особые свойства наноматериалам, которые отсутствуют у аналогичных по химическому составу, но не имеющих наноструктуры материалов [1–4].

При переходе к наноразмерам происходит скачкообразное изменение магнитных, тепло- и электропроводных свойств. Для особо мелких материалов можно заметить даже изменение температуры плавления в сторону ее уменьшения. Еще одним уникальным свойством наноматериалов является эффект самосборки объектов из отдельных атомов и молекул в подходящих условиях. Эта способность предоставляет революционные возможности для создания готовых наномасштабных изделий без промежуточных операций обработки материала. Обладая развитой поверхностью, наноматериалы очень активны и охотно взаимодействуют с окружающей средой. Однако это создает серьезные проблемы при их хранении и транспортировке, особенно когда речь идет о металлических нанодисперсных материалах.

Для работы с наночастицами и наноструктурами необходимы специальные диагностические и экспериментальные средства (в частности, электронные и сканирующие зондовые микроскопы), устройства создания чистых зон, специальной атмосферы или вакуума, более глубокие физические подходы и модели (в том числе и квантово-механические), суперкомпьютеры для моделирования строения и свойств нанообъектов, высококвалифицированный персонал и др. Отчасти эти обстоятельства и объясняют появление отдельной дисциплины «Наноматериаловедение» и ее основные отличительные особенности.

Наноматериаловедение – наука о наноматериалах, их свойствах, способах получения и использования, соединяющая фундаментальную и прикладную науки, технологию и производство. Кратко ее задачи можно сформулировать следующим образом:

- разработка новых и улучшение характеристик традиционных материалов;
- исследование структуры на разных масштабных-временных уровнях с целью совершенствования материалов и прогнозирования их поведения в различных условиях эксплуатации;
- изучение физико-механических, физико-химических, тепловых, электрических, магнитных, оптических и других свойств материалов в широком диапазоне условий, включая экстремальные;
- разработка теоретических основ, позволяющих прогнозировать свойства материалов на основе физических моделей различного уровня (электронного, атомарного, кластерного, микро- и мезоскопического);
- разработка прикладных компьютерных программ для моделирования, анализа и дизайна материалов с использованием аппарата квантовой механики, методов молекулярной динамики, конечных элементов, динамики структурных дефектов и др.;
- создание новых и совершенствование традиционных технологий производства, обработки и утилизации материалов;
- поиск новых сфер и способов применения наноматериалов, оптимизация их выбора при разработке изделий, разработка новых принципов конструирования и сборки.

В течение многих веков принципиальной основой материаловедения служило фундаментальное положение – свойства материала определяют, главным образом, три фактора: химический состав; структура и технология получения материала (с современной точки зрения это прежде всего дальний и ближний порядок в расположении атомов – аморфная или кристаллическая структура вещества, фазовый состав, свойства межзеренных границ, тип и подвижность атомарных дефектов, наличие и характер распределения внутренних напряжений и др.; часто выделяют три иерархических уровня структуры: атомарный, кристаллографический и микроструктурный); температура, давление и другие факторы окружающей среды, такие, как ее химический состав, радиационные, оптические, электрические и магнитные поля.

В последние два-три десятилетия помимо указанных выше основополагающих факторов пристальное внимание стали уделять характерным размерам элементов структуры, при сильном уменьшении которых традиционным материалам можно придать улучшенные или совершенно новые свойства без изменения остальных требований к исходному сырью (т.е. при сохранении его химического состава и агрегатного состояния).

На 7-й Международной конференции по нанотехнологиям, проходившей в Висбадене в 2004 году, была принята следующая классификация наноматериалов:

По типу структуры:

- нанопористые структуры;

- наночастицы;
- нанотрубки, нановолокна и наноленты;
- нанодисперсии (коллоиды);
- наноструктурированные поверхности и пленки;
- нанокристаллы и нанокластеры.

По назначению:

- функциональные;
- композиционные;
- конструкционные.

По количеству измерений:

- нульмерные/ квазинульмерные (квантовые точки, сфероидные наночастицы);
- одномерные/ квазидномерные (квантовые проводники, нанотрубки);
- двумерные/квиздвумерные (тонкие пленки, поверхности разделов);
- трехмерные/квизитрехмерные (многослойные структуры с наноразмерными дислокациями, сверхрешетки, нанокластеры).

Конечно, любые классификации и границы между отдельными группами материалов весьма условны. Так, фуллерены, нанотрубки, биомолекулы, мицеллы могут быть отдельными наночастицами или структурными элементами пленок и объемных материалов; пленки и наноккомпозиты могут быть приготовлены с помощью всех трех перечисленных классов. Одна из наиболее известных классификационных схем наноматериалов представлена на рис. 2 [27, 28].

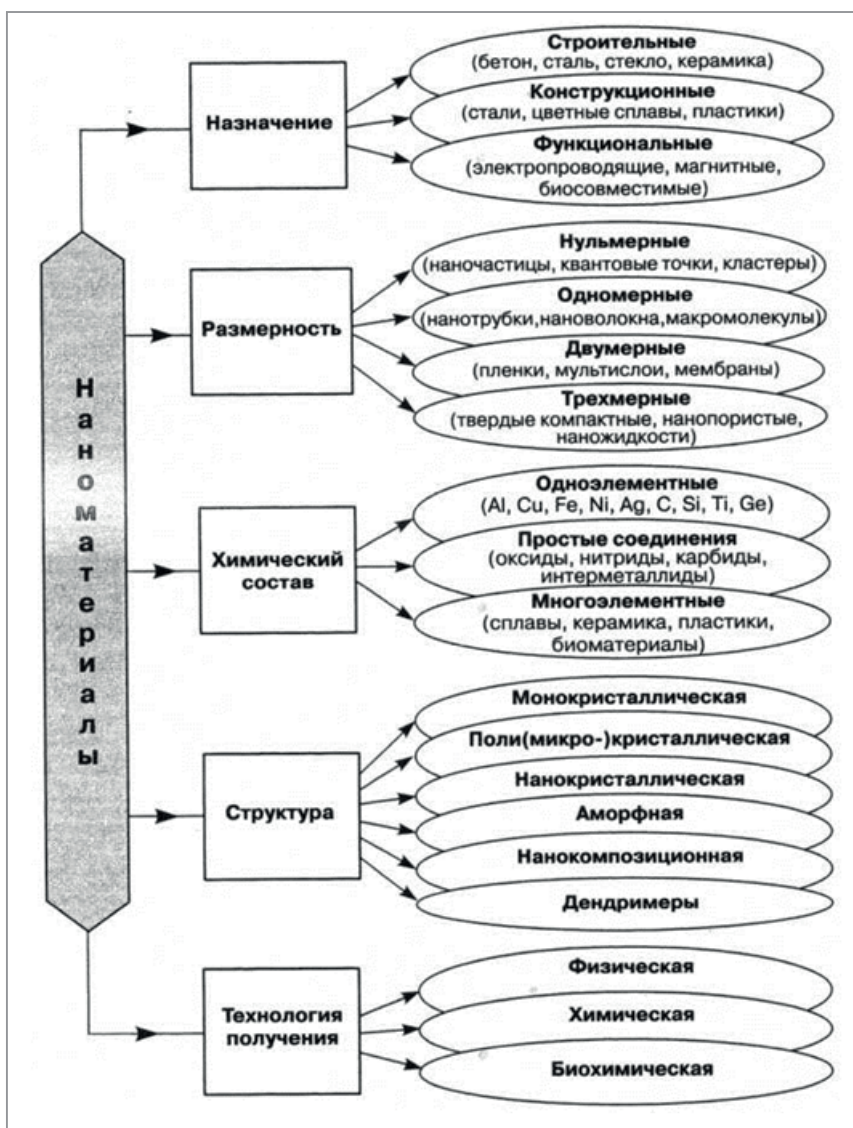


Рис. 2. Классификация наноматериалов

В «донанотехнологическую» эпоху для обозначения наноматериалов использовали термины «субмикронные» и «ультрадисперсные», при этом весьма приблизительно под первыми понимали структуры с характерными размерами в диапазоне от 300–500 нм до 1 мкм, а под вторыми – от десятков до сотен нанометров.

В химии под наночастицами часто подразумевают такие образования, у которых отношение числа атомов (молекул), лежащих на поверхности, к числу частиц в объеме больше или равно 1. При таком определении наночастицами для низкомолекулярных веществ считаются объекты с размерами от десятых долей нанометра до приблизительно 10 нм, а для высокомолекулярных – от единиц до сотен нанометров (при сфероидальной их форме).

В физическом материаловедении частицы размерами около 1 нм и менее часто называют кластерами, а материалы с такими морфологическими единицами – кластерными.

Практические цели, которые ставятся в наноматериаловедении, можно свести к двум задачам:

- 1) улучшение характеристик традиционных материалов;
- 2) создание принципиально новых материалов с уникальными характеристиками.

Все способы получения наноматериалов условно можно разделить на две группы: «сборка из атомов» и «диспергирование макроскопических материалов».

Как представить себе, что такое нанометр, насколько он мал?

Для того чтобы сделать частицу размером в 1 нм различимой глазом, необходимо увеличение в десятки тысяч раз, чего в принципе не может обеспечить оптический микроскоп, даже самый лучший. А для того чтобы не просто обнаружить, но и исследовать структуру частички размером в 1 нм, потребуется уже увеличение в ~1 млн. раз, что возможно только в случае применения современных электронных и сканирующих зондовых микроскопов. Если промасштабировать 1 нм до толщины человеческого волоса (50–60 мкм), еле видимого невооруженным глазом, то волосы в этом масштабе будут иметь диаметр около 3 м, а рост человека станет равным примерно 100 км! Если перевести привычные для нас единицы измерения роста волос на голове у человека (сантиметры в месяц) в нанометрические единицы, то получится весьма заметная скорость – 3–5 нм/с, что соответствует увеличению длины волос на несколько десятков атомных слоев за каждую секунду.

Перечень нанообъектов и наноструктур, с которыми уже сегодня приходится иметь дело, весьма обширен. В табл. 1 перечислены наиболее типичные представители наномира, а их место на шкале характерных размеров показано на рис. 3 [27].

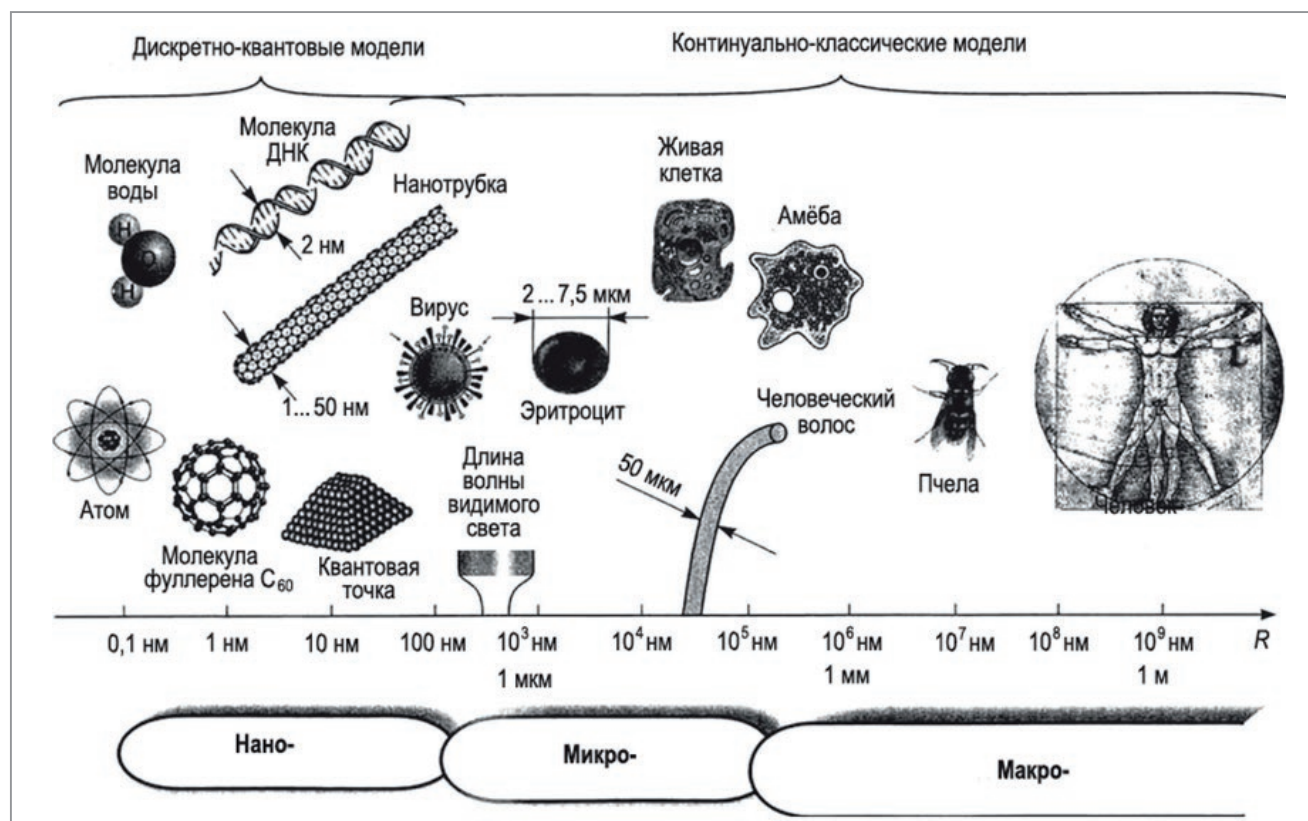


Рис. 3. Шкала характерных размеров типичных объектов нано-, микро- и макромира с указанием принятых способов их описания

Таблица 1. Объекты нанонауки и нанотехники и их типичные размеры

Область знаний	Объекты, процессы, характеристики	Диапазон размеров, нм
Электроника, электрофизика	Волновая функция электронов	10 ... 100
	Типичная длина свободного пробега электронов	1 ... 100
	Затворы полевых транзисторов в интегральных схемах	50 ... 200
	Толщина напыляемых слоев в интегральных схемах	1 ... 10
	Доменная стенка	10 ... 100
Оптика	Характерная длина спиновой релаксации	1 ... 100
	Квантовый колодец	1 ... 100
	Ближняя зона излучения у торца оптоволокна	10 ... 100
	Глубина скин-слоя в металле	10 ... 100
	Длина волны УФ-излучения	10 ... 100
Сверх-проводимость	Длина волны рентгеновского излучения	0,01 ... 10
	Когерентная длина куперовской пары	0,1 ... 100
Механика и материалы	Мейснеровская глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник	1 ... 100
	Дислокационное взаимодействие	1 ... 100
	Толщина границ зерен	1 ... 10
	Радиус вершины хрупкой трещины	0,1 ... 100
	Примесные кластеры, преципитаты	0,1 ... 100
	Зародыши новой фазы	1 ... 10
	Критический размер дислокационной петли	10 ... 100
	Краудион	1 ... 10
	Субструктурные ячейки	100 ... 1000
	Микродвойники	10 ... 100
	Реечный мартенсит	10 ... 1000
	Упрочненные приповерхностные слои, пленки	1 ... 1000
	Шероховатость номинально гладких поверхностей	0,1 ... 100
Катализ	Фуллерены	~1
	Нанотрубки (диаметр)	1 ... 100
Молекулярная химия	Активные центры	0,1 ... 1
	Нанопоры, наночастицы	1 ... 100
	Первичная структура макромолекул	0,1 ... 1
Молекулярная биология	Вторичная структура макромолекул	1 ... 10
	Третичная структура макромолекул	10 ... 1000
	Бактерии	100 ... 10 000
	Вирусы	20 ... 300
	Рибосома (диаметр)	~ 20
	Белки	2 ... 100
	ДНК (диаметр)	~ 2
	Мембраны (толщина)	1 ... 100

Наряду с отдельными наночастицами естественного или искусственного происхождения и их слабосвязанными ансамблями (порошками, аэрозолями, суспензиями и т.п.) предметом нанотехнологий являются также и наноструктурные материалы. Под ними понимают макроскопические тела, имеющие в своем составе наноразмерные морфологические или структурные единицы. К наноматериалам, в частности, относятся нанокристаллические металлы и сплавы, тонкопленочные одно- и многослойные покрытия, нанопористая керамика и полимеры, нанокомпозиты и др. Еще более сложно устроены наноструктурированные системы, например биологические клетки и их отдельные элементы (органеллы, ядра, мембраны и др.), гибридные микросистемные устройства (например, микро- и наноэлектромеханические системы (МЭМС и НЭМС)), а также сложные интеллектуальные комплексы, имеющие в своем составе наноразмерные компоненты (рис. 4).

В документах Национальной нанотехнологической инициативы США дано следующее определение нанотехнологий: «нанотехнологии – это совокупность фундаментальных и прикладных исследований и разработок, направленных на познание специфики поведения вещества и управление его свойствами в интервале его характерных размеров от ~ 1 до ~ 100 нм, где уникальные явления позволяют реализовать инновационные приложения».

В целях упорядочения терминологии, облегчения общения и взаимодействия людей и ведомств Американская международная организация по испытанию материалов приняла стандарт E2456–06 «Терминология для нанотехнологий». Нанонаука в нем определяется как «изучение вещества, процессов, явлений и устройств в нанометровом диапазоне». Подчеркивается, что свойства этих объектов отличаются от макроскопических, что и является предметом изучения и применения на практике.

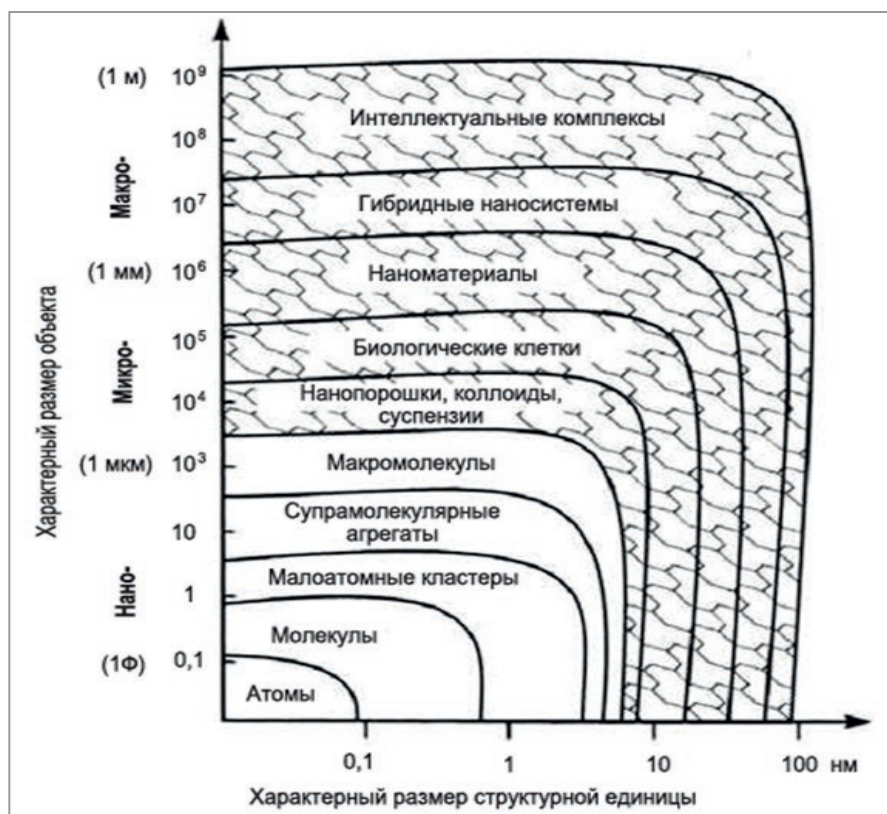


Рис. 4. Типичные объекты нанотехнологий (незаштрихованные области соответствуют размерным характеристикам отдельных наночастиц, заштрихованные – их ансамблям, наноструктурам, наносистемам)

Обобщая можно сказать, что наноматериалы занимают промежуточную область между миром отдельных атомов, управляемым законами квантовой механики, и макромиром, хорошо описываемым в рамках различных континуальных теорий (упругости, гидродинамики, электродинамики и т.п.), в которых игнорируется атомно-молекулярное строение вещества и оно рассматривается в приближении как однородная, непрерывная среда.

Фундаментальным базисом нанотехнологий являются физика, химия и молекулярная биология. Большую роль играют также прикладная математика и компьютерное моделирование наноструктур на основе квантово-механических закономерностей поведения объектов, состоящих из счетного числа атомов или молекул.

Классификация нанопродукции, учитывающая ее иерархическую сложность, представлена на рис. 5. Наночастицы, нанокластеры, слабосвязанные агрегаты, нанопорошки, аэрозоли, коллоиды, находящиеся на нижних уровнях иерархии по сложности, представляют наиболее обширный класс. За ними следуют наноматериалы, а затем – наноизделия, состоящие из многих элементов или требующих специальной обработки материалов.

Зачастую нанотехнологии позволяют создавать готовые изделия, содержащие миллионы элементов, минуя стадию производства материалов и отдельных



Рис. 5. Иерархическая лестница наноструктурных объектов

деталей, их последующей обработки и сборки (на рис. 5 этот переход показан пунктиром). Наибольшее распространение такие интегральные технологии получили в твердотельной электронике, в частности, в так называемой планарной микро- и нанoeлектронике, когда на поверхности полупроводниковой пластины создаются десятки и сотни миллионов наномасштабных элементов большой интегральной схемы. Чаще всего такие интегральные схемы на одном чипе (как правило, на пластинке из сверхчистого монокристаллического кремния) используют в качестве микропроцессоров или блоков оперативной памяти в персональных компьютерах.

В общей глобальной системе нанотехнологий и наноматериалов можно выделить следующие стратегические направления их применения и развития:

1. Нанотехнологии и нанобъекты на атомно-молекулярном уровне, работающие на квантово-механических принципах, которые создаются комбинацией отдельных атомов, молекул, полученной в результате их самосборки. Такие технологии нивелируют границу между веществом и устройством, создаваемым на атомарно-молекулярном уровне. Пока они еще являются достижением отдельных научных центров и лабораторий, но завтра вполне могут стать обычной производственной практикой.

2. Нанобиотехнологии на клеточном уровне, в частности, работа с эмбриональными стволовыми клетками, адресная доставка лекарственных препаратов, ранняя диагностика заболеваний и т.д.

3. Синтез новых веществ в конденсированном состоянии с использованием наноразмерных реагентов и химических реакций нового типа.

4. Наноструктурированные и наноразмерные материалы функционального и конструкционного назначения, создаваемые с использованием традиционных подходов. Сегодня нанопродукция этого направления представлена наиболее широко.

Базой для современных нанотехнологий стали открытия и фундаментальные достижения физики, химии, биологии XX века. Так, в 1950 году было установлено влияние сферических наночастиц немагнитной фазы в матрице железа на его коэрцитивную силу (рис. 6).

В 60-х годах появились понятия молекулярного и ионного кластеров с устойчивой химической связью между атомами входящего в них металла (рис. 7). Дальнейшее развитие понятия о кластерах как о многоядерных комплексных соединениях позволило использовать его для описания зародышей кристаллизации, а также ассоциаций в жидкостях, расплавах и твердых телах. Была установлена зависимость свойств металлического кластера от его размеров. Исчезновение этой зависимости может быть критерием верхнего предела линейного размера наночастиц, конкретного для данного вещества.

В 70-х годах квантово-механическими расчетами была предсказана возможность существования стабильных гигантских молекул из атомов одного вещества – углерода, бора, кремния. В 1985 г. впервые были обнаружены полые многоатомные молекулы углерода со сферической поверхностью (*фуллерены*). Наиболее стабильными из них оказались C_{60} и C_{70} (рис. 8).

Открытия в области нанотехнологий и наноматериалов с каждым годом все более активно используются в металлургии и литейном производстве. Сегодня основными направлениями в этой сфере являются [13, 14]:

- компактирование и спекание нанопорошков в порошковой металлургии;
- термоактивация веществ с переводом в наноразмерный диапазон;
- плазменный карботермический способ восстановления металлов;

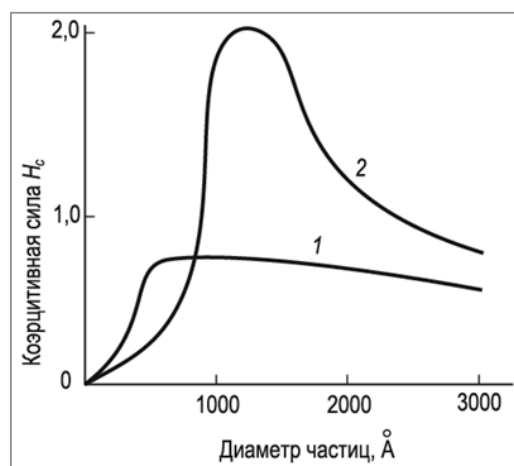


Рис. 6. Влияние размера сферических наночастиц немагнитной фазы на коэрцитивную силу железа: 1 – теоретическая кривая; 2 – экспериментальная кривая

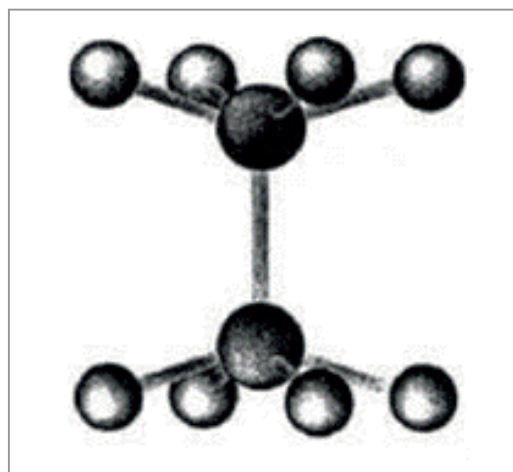
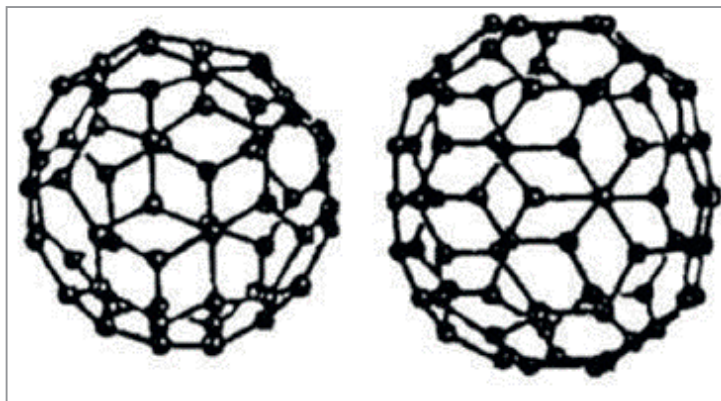


Рис. 7. Структура аниона $[Re_2Cl_8]^{2-}$

Рис. 8. Структура молекул фуллерена C_{60} и C_{70}

- обработка заготовок потоком высокоэнергетических наночастиц;
- нанесение упрочняющих металлических покрытий;
- кристаллизация наночастиц из аморфного состояния;
- внесение наночастиц модификатора в исходный расплав;
- использование наноструктурных добавок для модифицирования органических и силикатных связующих для формовочных и стержневых смесей;
- нанодиспергирование огнеупорных наполнителей противопожарных красок;
- разработка методов и аппаратов для улавливания наноразмерных частиц в горной металлургии (например, для извлечения ценных металлов), при рециклинге металлосодержащих отходов, в системах очистки промышленных выбросов;
- разработка средств индивидуальной защиты человеческого организма от воздействия наночастиц.

Развитие нанотехнологий, получение наноструктурированных материалов (наноразмерных частиц, пленок, композитов) и расширение сфер их применения сегодня является одним из магистральных направлений научно-технического прогресса, позволяет поднять на новый уровень конструкторские и технологические разработки, повысить качество потребляемых человеком продуктов и, несомненно, окажет огромное влияние на мировую экономику и социальную сферу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нанотехнология в ближайшем десятилетии / пер. с англ. М.: Мир, 2002. 295 с.
2. Пул, Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. М.: Техносфера, 2004. 328 с.
3. Головин, Ю. И. Введение в нанотехнику / Ю. И. Головин. М.: Машиностроение, 2007. 496 с.
4. Рыбалкина, М. Нанотехнологии для всех. Большое в малом / М. Рыбалкина. М.: Nanotechnology News Network. 2005. 444 с.
5. Фостер, Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности / Л. Фостер. М.: Техносфера, 2008. 352 с.
6. Суздаев, И. П. Нанотехнология: физикохимия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И. П. Суздаев. М.: КомКнига, 2006. 592 с.
7. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
8. Рамбиди, Н. Г. Физические и химические основы нанотехнологий / Н. Г. Рамбиди, А. В. Березкин. М.: Физматлит, 2008. 456 с.
9. Сидоров, Л. Н. Фуллерены / Л. Н. Сидоров и др. М.: Экзамен, 2005. 668 с.
10. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / Под ред. А. Л. Алексеева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 368 с.
11. Валиев, Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров. М.: Академкнига, 2007. 398 с.
12. Сергеев, Г. Б. Нанохимия / Г. Б. Сергеев. М.: КДУ, 2006. 336 с.
13. Рудской, А. И. Нанотехнологии в металлургии / А. И. Рудской. С-Пб.: Наука, 2007. 186 с.
14. Гончаров, С. А. Нанотехнологии и нанокристаллические материалы в горной промышленности / С. А. Гончаров, Н. Ю. Чернегов. М.: Изд-во МГТУ, изд-во «Горная книга», 2009. 100 с.
15. Nanotechnology / ed. G. Schmid. Wiley-VCH. Weinheim. 2008. 300 p.
16. Nanophysics and Nanotechnology. An Introduction to Modern Concepts in Nanoscience / ed. E. L. Wolf. Wiley-VCH. Weinheim. 2006. 292 p.
17. Biological and Biomedical Nanotechnology / eds. A. P. Lee, L. J. Lee. Springer Science. 2006. 522 p.
18. Physics and Engineering of New Materials / eds. D. T. Cat, A. Pucci, K. Wandelt. Springer, Berlin-Heidelberg. 2009. 387 p.
19. Koch, C. C. Structural Nanocrystalline Materials. Fundamental and Applications / C. C. Koch, L. A. Ovid'ko, S. Seal, S. Veprek. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 2007. 364 p.
20. Advanced Materials and Technologies for Micro/Nano-Devices. Sensors and Actuators / eds. E. Gusev, E. Garfunkel, A. Dideikin. Springer Science. New York. 2010. 314 p.

21. Nanostructured Materials / ed. G. Wilde. Elsevier. Amsterdam. 2009. 374 p.
22. Introduction to Nanoscale Science and Technology / eds. M. Di Ventra et al. Kluwer Academic Publishers. 2004. 611 p.
23. Nanoscale Science and Technology / eds. R. Kelsall et al. John Wiley & Sons. 2005. 472 p.
24. **Mansoori, G.A.** Principles of Nanotechnology / G.A. Mansoori. World Scientific. 2005. 360 p.
25. Nanoethics. The ethical and social implications of nanotechnology / eds. F. Allhoff et al. John Wiley & Sons. 2007. 385 p.
26. Nanotechnology and Society / eds. F. Allhoff and P. Lin. Springer. US. 2008. 299 p.
27. **Витязь, П. А.** Наноматериаловедение / П. А. Витязь, Н. А. Свидуневич, Д. В. Куис. Минск: Выш. шк., 2015. 511 с.
28. **Витязь, П. А.** Основы нанотехнологий и наноматериалов / П. А. Витязь, Н. А. Свидуневич. Минск: Выш. шк., 2010. 297 с.
29. **Свидуневич, Н. А.** Наноккомпозит на основе железа и углеродных добавок различной дисперсности с гетерофазной структурой и включениями сверхтвердого углерода, полученный методом термобарической обработки / Н. А. Свидуневич и др. // Литье и металлургия. 2009. № 3. С. 139–146.
30. **Рудницкий, Ф. И.** Использование энергии поверхности ультрадисперсных частиц при разработке наномодифицирующих комплексов / Ф. И. Рудницкий, С. А. Куликов, В. А. Шумигай // Металлургия машиностроения. 2019. № 6. С. 9–13.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-163-165>
УДК 658.11

Поступила 11.11.2020
Received 11.11.2020

ОЦЕНКА СЕБЕСТОИМОСТИ ПРОДУКЦИИ ПРЕДПРИЯТИЯ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЗИЦИЙ КОНТРАКТА

А. В. ДАМАРАД, В. П. ЩЕРБАКОВА, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская область, Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: dav.asu@bmz.gomel.by

Необходимость учета затрат на производство занимает важное место в системе управления предприятием. Одной из важных задач учета затрат на производство является контроль за себестоимостью продукции. Себестоимость включает в себя совокупность затрат, необходимых для осуществления предприятием производственной и коммерческой деятельности, связанной с выпуском и реализацией продукции, т. е. все то, во что обходится предприятию производство и реализация продукции.

Для определения экономической выгоды от продажи готовой продукции предприятия необходимо знать конечную стоимость предполагаемого контракта. От правильности установления цены реализации продукции напрямую зависит величина прибыли. В данной статье рассмотрена оценка экономического эффекта при моделировании различных позиций контракта на основе себестоимости продукции предприятия, что позволит оперативно решать производственные вопросы.

Исходными данными является информация, находящаяся в системе SAP ERP (Enterprise Resource Planning System): материалы, перечни компонентов, нормы компонентов и т. д. Системой обработки и анализа исходных данных является система SAP BI (Business Intelligence). Для отображения конечного результата служит программа, предназначенная для работы с электронными таблицами Microsoft Excel.

Ключевые слова. Продукция, затраты, себестоимость, моделирование, калькуляция.

Для цитирования. Дамарад, А. В. Оценка себестоимости продукции предприятия с возможностью моделирования позиций контракта / А. В. Дамарад, В. П. Щербакова // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 163–165. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-163-165>.

ESTIMATION OF THE COST PRICE OF THE ENTERPRISE WITH THE POSSIBILITY OF MODELING CONTRACT POSITIONS

A. V. DAMARAD, V. P. SHCHERBAKOVA, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, 37 Promyshlennaya Str., Zhlobin City, Gomel region, Belarus. E-mail: dav.asu@bmz.gomel.by

The need to account for cost price occupies an important place in the enterprise management system. One of the important tasks of accounting for cost price is to control the cost of production. The cost price includes the total costs necessary for the enterprise to carry out production and commercial activities related to the production and sale of products, that is, everything that the enterprise costs to produce and sell products.

To determine the economic benefits of selling the company's finished products, it is necessary to know the final cost of the proposed contract. The amount of profit directly depends on the correctness of setting the sales price of products. This article discusses the assessment of the economic effect when modeling various contract positions based on the cost price of the enterprise, which will allow you to quickly solve production issues.

The source data is information stored in the SAP ERP (Enterprise Resource Planning System) system: materials, component lists, component standards, etc. The source data processing and analysis system is SAP BI (Business Intelligence). To display the final result, we use a program designed for working with Microsoft Excel spreadsheets.

Keywords. Production, costs, cost price, modeling, calculation.

For citation. Damarad A. V., Shcherbakova V. P. Estimation of the cost price of the enterprise with the possibility of modeling contract positions. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 163–165. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-163-165>.

Основные затраты предприятия включают в себя затраты на приобретение средств производства, оплату труда рабочих и служащих, расходы на организацию и обслуживание производства, сбыт продукции и управления. Кроме того, предприятия отчисляют средства на социальное страхование своих работников. В процессе изготовления продукции затраты увеличиваются. Например, к затратам на материал добавляются и затраты на изготовление деталей, их транспортировку и т. д. Все эти затраты

и составляют себестоимость, которая является основными исходными данными при формировании конечной стоимости контрактов на производство продукции.

Для быстрой оценки экономической выгоды при включении тех или иных позиций контракта с определенной стоимостью необходимо выполнить ряд предварительных действий (рис. 1).



Рис. 1. Этапы определения экономической выгоды

Для начала на стороне системы Sap ERP осуществляется ввод исходных данных: материалы, перечни компонентов, нормы компонентов, добавочные материалы, затраты на электроэнергию, коммерческие расходы и т.д. Далее эти данные необходимо импортировать в систему Sap BI (Business intelligence) для последующей обработки и подготовки данных для анализа доходности. На стороне BI формируется «Источник данных» – куда и импортируются исходные данные.

После завершения импорта необходимо выполнить агрегацию, т.е. объединить все вводные данные в одну общую систему представления данных.

После завершения агрегации данные готовы к выводу в MS Excel. При выгрузке данных можно задать некоторые параметры: цех, также можно выбрать перечень материалов с помощью «Множественного выбора». При выводе данных получаем отчет об итоговой себестоимости всей запрашиваемой готовой продукции, рассчитанной с учетом стоимости материалов, а также затрат, полученных в ходе производства (рис. 2).

Материал	Цех 5	Код м. стали	Итого Ферросплавов	Итого металлошхты	Отходы	Добавочные материалы	Электроэнергия	Всего передельных затрат	Затраты БП	Цеховая С/с	Коммерч. расходы	Полная С/с
	Литая заготовка		бел. руб.	бел. руб.	бел. руб.	бел. руб.	бел. руб.	бел. руб.	бел. руб.	бел. руб.	15,00	бел. руб.
Углеродистая обыкновенного кач												
99000036	Заготовка н/л 125x125; Ст1сп	1401	20,00	550,00	-0,51	20,00	50,00	100,00	0,00	719,49	15,00	756,52
99000130	Заготовка н/л 125x125; B500NC(10-16)	1614	50,00	400,00	-0,34	15,00	50,00	100,00	0,00	564,66	15,00	597,05
Углеродистая качественная												
99021486	Заготовка н/л 140x140; SAE 1010-3	3517	15,00	300,00	-0,32	10,00	15,00	50,00	0,00	374,68	15,00	401,37
Легированная												
99000134	Заготовка н/л 125x125; 25Г2С	4712	40,00	600,00	-0,69	15,00	30,00	50,00	0,00	694,31	15,00	730,59
Кордовая												
99021489	Удален Заготовка н/л 140x140; 80K-1	6498	17,00	450,00	-1,25	40,00	90,00	0,00	0,00	578,75	15,00	611,57

Рис. 2. Результат расчета себестоимости материалов

Для получения итоговой стоимости предполагаемого контракта следует добавить дополнительные экономические показатели: маржинальный доход, процент предполагаемой прибыли, курсы пересчета валют и т.д.

Далее уже для оценки доходности от заключения контракта необходимо ввести предполагаемую цену и объем продукции. В результате моделирования на рис. 3 можно оценить выгодно ли заключение данного контракта на производство продукции или нет.

Материал	Цех 5	Код м. стали	Полная С/с	Цена	Объем производ- ства	Выручка за минусом налогов	Полная С/С	Марж доход	ОЗР		Прибыль/ убыток	Рентабель- ность
	Литая заготовка		бел. руб.	BYN/т	т.	BYN	0,200000	BYN	%	BYN	BYN	%
Углеродистая обыкновенного кач												
99000036	Заготовка н/л 125x125; Ст1сп	1401	756,52	760,00	50	38 000,00	36 979,60	1 275,50	0,7%	8,86	1 266,64	3,4%
99000130	Заготовка н/л 125x125; B500NC(10-16)	1614	597,05			0,00	0,00	0,00	0,0%	0,00	0,00	0,0%
Углеродистая качественная												
99021486	Заготовка н/л 140x140; SAE 1010-3	3517	401,37	380,00	20	7 600,00	7 793,60	0,00	0,0%	0,00	-193,60	-2,5%
Легированная												
99000134	Заготовка н/л 125x125; 25Г2С	4712	730,59			0,00	0,00	0,00	0,0%	0,00	0,00	0,0%
Кордовая												
99021489	Удален Заготовка н/л 140x140; 80K-1	6498	611,57	615,00	60	36 900,00	35 880,16	1 274,80	0,7%	9,12	1 265,68	3,5%
	Моделирование в %				Сумма							
	Моделирование в бел.руб./т.				130	82 500,00	80 653,36	2 550,30	0,7%	17,98	2 338,72	2,9%

Рис. 3. Смоделированный контракт из трех позиций

При согласии двух сторон на основании цен на продукцию, которые были выведены в отчете, при выборе материала и переходе на другую вкладку, предусмотрена функция калькуляции по любому из материалов, что позволяет рассмотреть более подробно расчетные цены и затраты (рис. 4).

Утверждаю: Директор по финансово-экономическим вопросам _____ И.И. Иванов " ____ " _____ 2020г.			
Расчёт цены			
Заготовка н/л 140x140; 460(20-32)			
<i>Статьи</i>	<i>Норма</i>	<i>Цена</i>	<i>Сумма</i>
Ферросиликомарганец МнС17	0,01151	2052,128584	25,00
Алюминий вторичный АВ-87	0,00045	2844,444444	1,00
Ферромарганец 78 (ДСТУ 3547-97)	0,00054	2777,777778	1,50
Проволока порошковая с СК-40 d14 (	0,00075	3266,666667	3,50
Карбид кремния металлург.(SIC min 7	0,00452	1752,212389	8,00
Итого Ферро-сплавов	0,01777		39,00
Железо горячебрикетированное	0,000001	0	0,00
Лом шредированный 2АШР	0,09194	417,0110942	40,00
Лом категории А РБ	0,27583	411,9928942	100,00
Лом категории А (пакеты) РБ	0,11493	369,9643261	50,00
Лом категории А (объединенный)	0,27583	614,400174	150,00
Стружка стальная А (объединенный)	0,13791	609,6004641	90,00
Скrap А оборотный (объединенный)	0,02758	29,73168963	1,00
Лом пакетированный А (объединенны	0,11493	609,5884451	70,00
Лом А оборотный (объединенный)	0,01839	271,3431213	6,00
Лом шредированный АШР	0,09194	671,9599739	50,00
17А металлолом чугуный №1	0,000001	0	0,00
Стружка стальная А РБ	0,000001	0	0,00
Итого металлошхты	1,149283		557,00
Отходы			-0,50
Добавочные материалы			25,00
Электроэнергия			90,00
Всего передел-ных затрат			100,00
Затраты БП			0,00
Цеховая С/с			826,00
Коммерч. расходы			15,00
Сокр. С/с			841,00
ОЗР %	3,00%		25,23
Полная С/с			866,23
Прибыль %	10%		86,62
Расчетная цена			952,85
Расчетная цена \$			484,62
Расчет рентабельности			
ОЗР	0,00%	0	0,00
Себестоимость с ОЗР		0,2789787	841,00
Рентабельность	-100,00%		-841,00
Цена без налогов			0,00
Налоги			0,00
Цена в руб.(FCA)			0,00
DAF/FOB		1,9	0,00
Цена в руб.(DAF/FOB)	1,9		0,00
Цена в DAF/FOB без НДС			
Начальник		П.П. Петров	

Рис. 4. Калькуляция материала

Таким образом, можно сделать вывод, что даже при продаже одного готового продукта по цене ниже себестоимости весь заключаемый контракт является рентабельным, а заработок с заключения такого договора будет условно 2 338,72 белорусского рубля.

В настоящее время данный подход оперативного расчета суммы предполагаемого дохода по каждому материалу и контракту в целом позволяет быстро и точно решать производственные вопросы.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-166-168>
УДК 524

Поступила 10.08.2020
Received 10.08.2020

О ТЕМНОЙ МАТЕРИИ И ТЕМНОЙ ЭНЕРГИИ

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

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

Гипотеза о темной материи была создана для объяснения причины сохранения звездных скоплений от рассеивания. Слабым местом этой гипотезы является большой возраст космоса, который составляет 13,8 миллиардов лет. На основании экспериментальных данных показано, что возраст космоса не превышает 10 тысяч лет. В этом случае не нужна гипотеза о темной материи, поскольку звездные скопления не могут рассеяться за такое малое космическое время. Гипотеза о темной энергии была создана для объяснения причины ускоренного расширения космоса. Основанием для такого явления служит большая величина спектрального красного смещения далеких светящихся космических объектов. Показано, что эта величина в основном определяется значительным поглощением энергии света далеких космических объектов огромным количеством межгалактического газа, а не движением этих объектов. В этом случае не нужна гипотеза о темной энергии, а космос не должен ускоренно расширяться и рассеяться в пространстве.

Ключевые слова. Темная материя, темная энергия, космос, спектральное красное смещение, космические объекты.

Для цитирования. Стеценко, В. Ю. О темной материи и темной энергии / В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 166-168. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-166-168>.

ON DARK MATTER AND DARK ENERGY

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 dark matter hypothesis was created to explain the reason for the preservation of stellar clusters from dispersion. The weak point of this hypothesis is the great age of space, which is 13.8 billion years. Based on experimental data, it is shown that the age of space does not exceed 10 thousand years. In this case, the hypothesis of dark matter is not needed, since stellar clusters cannot scatter in such short cosmic time. The dark energy hypothesis was created to explain the reason for the accelerated expansion of space. The basis for this phenomenon is a large amount of spectral redshift of distant luminous space objects. It is shown that this value is mainly determined by the significant absorption of light energy of distant space objects by a huge amount of intergalactic gas, and not by the movement of these objects. In this case, the hypothesis of dark energy is not needed, and space should not rapidly expand and scatter in space.

Keywords. Dark matter, dark energy, space, spectral redshift, space objects.

For citation: Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. On dark matter and dark energy. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 166-168. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-166-168>.

Согласно современной стандартной космологической модели, космос состоит из обычной (барионной) материи, темной материи и темной энергии (см. рис.) [1]. В соответствии с этой моделью возраст космоса составляет 13,8 миллиардов лет [2]. «Темная» означает «неизвестная». Тогда на долю неизвестного науке вещества – энергии приходится 96% от их общего количества. Это означает, что вокруг нас существуют сплошная темная материя и темная энергия, а мы о них ничего не знаем. Тогда, как можно доверять науке с ее законами, которые не учитывают действия темной материи и темной энергии? Это ставит ученых в тупик и дает повод для создания и развития различных псевдонаучных спекуляций, фантастики и мистики. Поэтому изучение неизвестных видов материи и энергии является актуальной научной задачей. Но сначала нужно исследовать состояние вопроса и определить основания существующих гипотез о темной материи и темной энергии.

Под темной материей астрофизики подразумевают неизвестное (невидимое) вещество, которое оказывает гравитационное воздействие на обычное (видимое) вещество. Относительно недавние исследования космоса показали, что звезды в галактиках движутся с более высокими орбитальными скоростями,

чем считалось ранее [3]. Это поставило ученых в тупик. Простые расчеты показывают, что если возраст светящихся космических объектов (СКО) составляет миллиарды лет, то при существующих орбитальных скоростях звезд все галактики и звездные скопления давно бы рассеялись. Но они до сих пор существуют. Чтобы устранить такое противоречие, и была выдвинута гипотеза о темной материи. Она была призвана объяснить причину удержания звезд в галактиках и звездных скоплениях. Считается, что темная материя взаимодействует с обычной материей посредством гравитационного поля, которое и удерживает галактики и звездные скопления от рассеивания в космосе.

Слабым местом гипотезы о темной материи является большой возраст космоса, исчисляемый 13,8 миллиардами лет. Следует полагать, что эта цифра сильно завышена. Об этом свидетельствует огромное количество фактов. Их можно найти в Интернете, например, на сайте: www.evolution-facts.org. Эти факты свидетельствуют о том, что возраст космоса исчисляется не миллиардами, а тысячами лет. Наиболее показательными являются экспериментальные данные о количестве космической пыли на Луне. Установлено, что скорость осаждения этой пыли в среднем составляет 0,00085 см/год, а реальная толщина слоя пыли на Луне не превышает 7,5 см [4]. Разделив 7,5 см на 0,00085 см/год, получим, что возраст Луны составляет не более 8 824 лет. Кроме того, вокруг Солнца вращается большое количество недолговечных комет. Установлено, что срок их жизни не должен быть более 10 тысяч лет [4]. Если возраст космоса исчисляется тысячами лет, то необходимость в существующей гипотезе о темной материи в космосе отпадает, так как за такое относительно короткое космическое время галактики и звездные скопления не могли заметно рассеяться.

Считается, что темная энергия равномерно заполняет все космическое пространство и проявляется в антигравитации [5]. Эта гипотетическая энергия была введена в современную стандартную космологическую модель, чтобы объяснить причину ускоренного расширения космоса. Это ускорение было обнаружено в результате наблюдений за удаленными СКО. Согласно закону Хаббла, скорость удаления СКО от Земли определяется следующим уравнением [3]:

$$v = Hr, \quad (1)$$

где H – константа Хаббла, равная 74,2 км/(с·Мпс); r – расстояние до СКО. Величина r определяется следующим уравнением [6]:

$$r = \frac{cz}{H}, \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме; z – доплеровское спектральное красное смещение (СКС). Последнее представляет собой относительное смещение длины волны света от удаляющегося источника по отношению к наблюдателю в красную сторону по эффекту Доплера. Величина z определяется по уравнению [3]:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}, \quad (3)$$

где $\Delta\lambda$ – смещение длины волны к определенной спектральной полосе; λ_0 – длина волны самой полосы, наблюдаемой в лаборатории.

Из уравнений (1) и (2) следует:

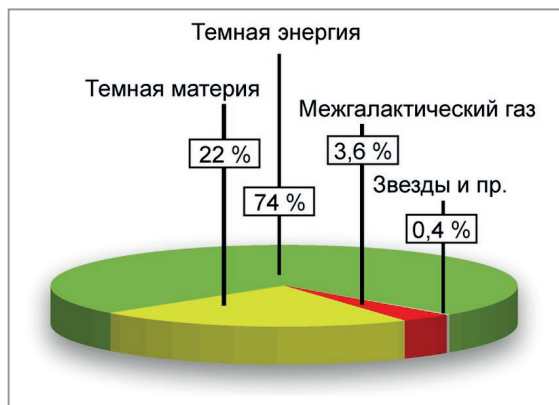
$$v = cz. \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что скорость удаления СКО от Земли пропорциональна величине доплеровского СКС. Из уравнения (2) следует, что расстояния до удаляющихся СКО также пропорциональны величинам соответствующих доплеровских СКС. Чем больше их значения, тем дальше расположены СКО, тем выше скорость их удаления от Земли. Измеряя СКС СКО, астрофизики оценивают по формуле (2) расстояние до наиболее удаленных из них (квазаров). Получаемая величина превышает 10 млрд. световых лет [3]. При этом считают, что СКС определяется только движением СКО. Также установлено, что чем дальше находится СКО от Земли, тем выше СКС, и наоборот. Для квазаров это значение более восьми [6].

Отклонение лучей звездного света, проходящих вблизи солнечного диска, неоднократно фиксировалось во время солнечных затмений. Это явление приписывалось исключительно гравитационному полю Солнца, что являлось одним из основных аргументов в пользу общей теории относительности А. Эйнштейна. Но при этом не учитывалось отклонение лучей звездного неба сферической газовой атмосферой Солнца. О том, что она существует, свидетельствуют линии Фраунгофера (спектральные линии поглощения) солнечного спектра. По ним установлено, что атмосфера Солнца состоит из водорода (71 %) и гелия (27 %) [3]. Поэтому световые лучи, идущие от звезд, вблизи солнечного диска будут отклоняться

сферической газовой атмосферой по эффекту линзы. Кроме того, солнечная атмосфера поглощает энергию лучей света и сдвигает линии Фраунгофера к красной части спектра, вызывая СКС. Оно наблюдается в световых спектрах звезд, имеющих атмосферу. Этим явлением можно объяснить, почему значения СКС двойных звезд разные, хотя расстояния до них примерно одинаковые. Одна из этих звезд, как правило, больше другой по массе. Более массивная звезда имеет большую атмосферу, которая соответственно больше поглощает энергию исходящих световых лучей. Поэтому значение СКС у такой звезды будет выше, чем у ее спутницы – менее массивной звезды.

В космосе существует большое количество межгалактического (межзвездного) газа. Его количество в 9 раз превышает массу всех СКО (см. рисунок). Следует полагать, что большие значения СКС далеких СКО определяются в основном не по их движениям (эффектом Доплера), а значительным поглощением энергии лучей света межгалактическим газом. В таком случае расстояния до удаленных СКО не будут исчисляться миллионами и миллиардами световых лет. Поэтому отпадает необходимость в существовании гипотетической темной энергии, которая заставляла бы космос расширяться с ускорением, что ведет к его разрушению. Следует отметить, что гипотезы о темной материи и темной энергии взаимосвязаны через СКС, но противоположны по сущности. Темная материя предполагает гравитационное притяжение, а темная энергия – гравитационное отталкивание, которое в природе не наблюдается.



Состав космоса в рамках современной стандартной космологической модели

Таким образом, следует полагать:

- возраст космоса не превышает 10 тысяч лет;
- большое спектральное красное смещение далеких светящихся космических объектов определяется в основном поглощением их света межгалактическим газом;
- существующие гипотезы о темной материи и темной энергии не находят научного подтверждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диаграмма распределения массы во Вселенной.– Доступно по адресу: URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Darkenergy.png> (дата доступа 20 августа 2020).
2. Planck Collaboration. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters // *Astronomy and Astrophysics*: 2016. Vol. 594, no. 13. pp. A13.
3. Радзини Д. Космос. М.: ООО «Издательство АСТ»; ООО «Издательство Астрель», 2002. 320 с.
4. Вэнс Феррел. Время против эволюции. Почему возраст Вселенной – не миллионы лет? М.: Русский Хронограф, 2003. 128 с.
5. Эйнасто Я., Чернин А.Д. Темная материя и темная энергия. М.: Век-2, 2018. 176 с.
6. Энциклопедия для школьников и студентов. Т. 2. Физика. Математика / под общ. ред. Н. А. Поклонского. Минск: Беларуская Энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2010. 528 с.

REFERENCES

1. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Darkenergy.png>.
2. Planck Collaboration. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters // *Astronomy and Astrophysics*, 2016, vol. 594, no. 13, pp. A13.
3. Radzini D. *Kosmos* [Space]. Moscow, Izdatel'stvo AST Publ.; Izdatel'stvo Astrel' Publ., 2002. 320 p.
4. Vjens Ferrel. *Vremja protiv jevoljucii. Pochemu vozrast Vselennoj – ne milliony let?* [Time is against evolution. Why is the Universe not millions of years old?]. Moscow, Russkij Hronograf Publ., 2003. 128 p.
5. Jejnasto Ja., Chernin A. D. *Temnaja materija i temnaja jenergija* [Dark matter and dark energy]. Moscow, Vek-2 Publ., 2018. 176 p.
6. *Jenciklopedija dlja shkol'nikov i studentov. T. 2. Fizika. Matematika* [Encyclopedia for pupils and students. Vol. 2. Physics. Maths]. Minsk, Belaruskaya Entsiklopedya im P. Brouki Publ., 2010, 528 p.



ПО СТРАНИЦАМ ЗАРУБЕЖНОЙ ПРЕССЫ

АССАМБЛЕЯ ГЕНЕРАЛЬНОЙ АССОЦИАЦИИ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ E. V. (GDA) ОТРАЖАЕТ ДРАМАТИЧЕСКУЮ СИТУАЦИЮ

На Генеральной Ассамблее GDA (Генеральная Ассоциация алюминиевой промышленности – ГАП) в этом году, которая состоялась впервые в качестве цифрового мероприятия, GDA также изменила свое положение с точки зрения персонала. Леопольд Werdich, управляющий директор холдинга Tubex На, был избран новым вице-президентом ГАП. Он сменил на этом посту Оливера Холла, который весной сложил с себя полномочия. Фрэнк Busenbecker, управляющий директор алюминиевого Erbslöh GmbH, был избран в качестве нового председателя торговой ассоциации для полуфабрикатов алюминиевой продукции. Дитер Хелле (Constellium) – его новый заместитель.

Определяющей темой сессий была пандемия и последовавший за ней глобальный кризис. Алюминиевая промышленность уже пережила значительный спад в первой половине 2020 года. Дно, по-видимому, было достигнуто в конце летних каникул: по крайней мере, число сокращений в важных отраслях стабилизировалось по сравнению с массовыми спадами весной. Особенно это касается автомобильной промышленности, которая прекратила многие производства во втором квартале. Произошел резкий спад в авиастроении.

Президент доктор Хинрих Мельман подчеркнул: «этот кризис приведет к еще более масштабной рецессии, чем финансовый кризис 2008/2009 годов.» Президент предупредил: правительство Германии быстро отреагировало своими спасательными пакетами, но промышленность также нуждается в передовой стратегии. Кризис не должен использоваться для политической перестройки промышленности на «политически желаемую» и «больше не желаемую».

Президент Мальман предупредил, что недавнее небольшое восстановление не является поводом для эйфории. Уровень производства немецких автопроизводителей в этом и следующем годах будет недостаточным для всей цепочки поставок. И в настоящее время все еще нет сильных импульсов от других пользовательских отраслей.

Президент приветствовал решение Еврокомиссии ввести антидемпинговые пошлины на алюминиевые профили из Китая: «немецкая алюминиевая промышленность не должна бояться никаких конкурентов. Но правила игры должны соблюдаться во всем мире. Но в случае с Китаем это не так.

Теперь было бы важно понять компетентность нашего решения и нашей компании для задач настоящего и будущего. «Алюминий является и останется материалом будущего.»

Источник: 4 ноября 2020, Планета Литья

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЕРСИИ ТЯЖЕЛЫХ ГРУЗОВИКОВ VOLVO

В следующем году перевозчики в Европе смогут заказать полностью электрические версии тяжелых грузовиков Volvo. Это означает, что Volvo Trucks будет предлагать полный спектр тяжелых грузовиков с электрическими приводами, начиная с Европы в 2021 году. Массовый переход Volvo Trucks к электрификации знаменует собой важный шаг вперед на пути к транспорту, свободному от ископаемого топлива.

Volvo Trucks в настоящее время проводит испытания электрических тяжелых грузовиков Volvo FH, Volvo FM и Volvo FMX, которые будут использоваться для региональных перевозок и городского строительства в Европе. Эти грузовики будут иметь общую комбинированную массу до 44 тонн. В зависимости от конфигурации батареи дальность проезда может достигать 300 км. Продажи начнутся в следующем году, а полное производство планируется в 2022 году. Это означает, что начиная с 2021 года Volvo Trucks будет продавать полный спектр электромобилей на аккумуляторах в Европе для перевозок, утилизации отходов, регионального транспорта и городского строительства.

«Быстро увеличивая количество тяжелых электромобилей, мы хотим помочь нашим клиентам и покупателям транспортных средств достичь своих амбициозных целей в области устойчивого развития. Мы полны решимости продолжать вести нашу отрасль к устойчивому будущему», – говорит Роджер Альм, президент Volvo Trucks.

Грузовики Volvo начали производство «Вольво ФЛ» и «Вольво Фе-электро» в 2019 году. Это электрические грузовики, предназначенные для города и мусоропереработки, в первую очередь в Европе. В Северной Америке продажи Volvo VNR Electric, грузовика для региональных перевозок, начнутся 3 декабря 2020 года.

Постепенный переход к альтернативе без ископаемого топлива

Электромобили для сложных и тяжелых дальнемагистральных перевозок последуют в этом десятилетии. Это будут электромобили на аккумуляторах и топливных элементах с большим радиусом действия. Volvo Trucks планирует начать продажу электромобилей, работающих на водородных топливных элементах, во второй половине этого десятилетия. Цель Volvo Trucks состоит в том, чтобы к 2040 году весь ассортимент ее продукции был свободен от ископаемого топлива.

«Чтобы уменьшить влияние транспорта на климат, мы должны быстро перейти от ископаемого топлива к альтернативам, таким как электричество. Но условия для осуществления этого сдвига, а следовательно, и темпы перехода, резко варьируются в зависимости от различных перевозчиков и рынков, в зависимости от многих переменных, таких как финансовые стимулы, доступ к зарядной инфраструктуре и тип транспортных операций», – объясняет Роджер Альм.

По этой причине большинство транспортных компаний будут переходить на электрическую эксплуатацию поэтапно. На практике многие из них будут иметь смешанный парк грузовых автомобилей, работающих на различных видах топлива в течение переходного периода.

«Наши шасси спроектированы так, чтобы быть независимыми от используемой трансмиссии. Наши клиенты могут выбрать несколько грузовиков Volvo одной модели, с той лишь разницей, что некоторые из них электрические, а другие работают на газе или дизельном топливе. Что касается характеристик продукции, таких как окружающая среда для водителя, надежность и безопасность, то все наши транспортные средства соответствуют одним и тем же высоким стандартам. Водители должны чувствовать себя удобно в своих транспортных средствах и уметь безопасно и эффективно управлять ими независимо от вида используемого топлива», – говорит Роджер Альм.

«Наша основная задача – облегчить переход на электрифицированные транспортные средства. Мы делаем это, предлагая комплексные решения, которые включают планирование маршрута, правильно определенные транспортные средства, зарядное оборудование, финансирование и услуги. Долгосрочная безопасность, которую мы и наша глобальная сеть дилеров и сервисных мастерских предоставляем нашим клиентам, будет более важна, чем когда-либо», – говорит Роджер Альм.

Источник: Планета Литья, 10 ноября 2020

ЭКСКЛЮЗИВ: СЕРБСКИЙ ЗАВОД БУДЕТ ПРОИЗВОДИТЬ ДО 300 000 ДВИГАТЕЛЕЙ В ГОД К 2023 ГОДУ

Японская компания Nides потратит около 200 млрд. иен (\$1,9 млрд.) на строительство завода по производству электромобилей в Сербии, как стало известно Nikkei, поскольку компания планирует расширить свои позиции в Европе, чей рынок электромобилей конкурирует с китайским.

Производитель двигателей, по-видимому, находится на завершающей стадии переговоров с местными властями о планах строительства завода и сопутствующего исследовательского центра.

Nides сконцентрировала ресурсы на расширении производства двигателей EV drive (электропривод) в Китае, который имеет быстрорастущую индустрию электромобилей. Теперь компания наращивает инвестиции в Европу в качестве второго фронта.

Новый завод достигнет годовой производительности от 200 000 до 300 000 единиц к 2023 году. Nides начнет производить двигатели EV drive также во Франции и Польше, начиная с 2022 года, но сербский завод станет одним из крупнейших производственных центров компании в Европе.

Поставка электромобилей является ключевой частью стратегии роста компании Nides, базирующейся в Киото, которая стала известным производителем прецизионных двигателей.

Европейские продажи электромобилей и подключаемых гибридов в первой половине 2020 года подскочили на 62 % по сравнению с предыдущим годом и составили 399 000 автомобилей, сообщает

Европейская ассоциация автопроизводителей. Эти данные, включающие страны, не входящие в Европейский союз, ставят континент рядом с Китаем в качестве ведущего мирового рынка электрифицированных автомобилей.

Немецкие Volkswagen и Daimler расширяют свои линейки электротехники, в то время как Tesla планирует завершить свой первый европейский завод EV в Германии к следующему году.

Стимулирование этого спроса является целью ЕС по достижению чистого нулевого уровня выбросов парниковых газов к 2050 году. В соответствии с мерами, поэтапно вводимыми в этом и следующем годах, автопроизводители, работающие в странах-членах ЕС, обязаны ограничить средние выбросы по всему парку новых легковых автомобилей на уровне до 95 граммов на километр.

Автопроизводители из всех сил стараются увеличить долю электромобилей в своих линейках, чтобы соответствовать требованиям. Правила ЕС должны стать более жесткими в 2025 и 2030 годах.

В ответ на рост спроса крупнейшие производители аккумуляторов EV LG Chem и Samsung SDI из Южной Кореи построили заводы в Восточной Европе.

Китайские конкуренты следуют этому примеру. Компания Contemporary Amperex Technology Ltd., или CATL, строит завод стоимостью 2 миллиарда долларов в Эрфурте, Германия, который будет производить электроряды с годовой мощностью 14 гигаватт-часов, когда он откроется в 2022 году. CATL заключила крупные контракты на поставку с BMW и Volkswagen.

Японская группа материалов Toray Industries начнет работу на новом заводе в Венгрии к 2022 году по производству сепараторов для литий-ионных аккумуляторов. Это увеличит производственную мощность для продукта примерно на 20% в масштабах всей группы. Сепараторы – это мембраны, которые предотвращают вызывающие возгорание короткие замыкания между катодами и анодами в батареях.

Zeon, японский производитель, производящий связующие вещества для анодного материала в литий-ионных батареях, рассматривает возможность производства и в Европе. Компания реагирует на тенденцию среди производителей аккумуляторов закупать материалы на местном уровне. Если эти планы будут реализованы, Европа станет первым местом за пределами Японии, где Zeon производит материал для батарей.

Ограничения Китая на автомобили, работающие на бензине, подтолкнули Nides к производству электромобилей в этой стране. В прошлом году компания начала массовое производство моторных систем, включающих инверторы и шестерни в провинции Чжэцзян. Заказы были от крупных местных автопроизводителей, таких как Guangzhou Automobile Group и Geely.

ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ЧРЕЗВЫЧАЙНО ВАЖНА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

«Все электромобили будут выглядеть так в будущем», – сказал владелец Tesla Илон Маск и представил самую большую литую деталь в мире на выставке «Tesla Battery Day 2020». Он хочет изготовить весь кузов автомобиля своих будущих моделей из нескольких, а позже из одной литой детали. Для этого компании нужны высококвалифицированные инженеры. Университет Аален (Германия – *пер.*) также обучает студентов процессу литья под давлением.

«Литье под давлением для деталей из легких металлов алюминия и магния также будут использоваться в будущих автомобилях Tesla», – говорит профессор доктор Лотар Каллиен, руководитель лаборатории литья Университета Аалена. Процесс литья под давлением как технология будущего в автомобилестроении преподается в литейной лаборатории в бакалавриате по машиностроению и в магистратуре по производству и менеджменту легких конструкций и изучается в различных исследовательских проектах.

Кузов автомобиля в настоящее время состоит из 100 деталей, которые собираются вместе после литья в дорогостоящем и энергоемком процессе. Новый метод изготовления корпусов Tesla предназначен для того, чтобы значительно снизить затраты на производство. Американский автопроизводитель хочет производить такие модели, как новая модель Y, с помощью своей «Моноблочной литейной машины», самой большой машины для литья под давлением в мире, всего из нескольких деталей. Tesla разработала новый тип алюминиевого сплава, который можно обрабатывать без использования тепла, сообщает Маск. В качестве заключительного шага, процесс должен производить корпус из одной детали, «Тесла моноблок».

Для этого требуются хорошо подготовленные специалисты и менеджеры. Литейная лаборатория в Университете Аалена готовит инженеров именно для таких компаний, ориентированных на будущее,

как Tesla. В области научных исследований основное внимание в литейной лаборатории уделяется литью под давлением легких металлов – алюминия и магния. «Процесс литья под давлением – это самый быстрый путь от жидкого расплава до готовой детали. В нашей лаборатории есть три машины для литья под давлением, доступные для учебных и исследовательских проектов», – объясняет профессор Каллиен. Литейная технология интегрирована в изучение машиностроения / производства и менеджмента в Университете Аалена. Этот курс сочетает в себе основы машиностроения, такие как техническая механика, строительство и материаловедение, с современными технологиями производства, такими как литейное производство. Особое внимание уделяется общему образованию: студенты изучают все классические процессы литья – от литья в песок до литья под давлением легких металлов. В новых САПР-лабораториях студенты моделируют процессы литья с помощью современного программного обеспечения и оптимизируют их с точки зрения технологии литья.

Источник: Всемирная организация литья, 6 ноября 2020

ИНВЕСТИЦИИ ОКАЗАЛИСЬ ВЫШЕ, ЧЕМ РАССЧИТЫВАЛО ПРАВИТЕЛЬСТВО СЛОВАКИИ ИГОРЯ МАТОВИЧА

Как сообщается, немецкий автопроизводитель Volkswagen, перенесет производство своего автомобиля Passat и премиальной модели Škoda Superb на свой завод в Братиславе. Более того, инвестиции должны быть намного выше, чем рассчитывало правительство Словакии Игоря Матовича, сообщает газета Denník N daily.

Еще в июле Кабинет министров подписал меморандум с представителями автопроизводителя, в котором предлагалось инвестировать 500 миллионов евро. Однако последние данные свидетельствуют о том, что объем инвестиций может достигать 1 миллиарда евро. Эту сумму назвал председатель правления концерна Volkswagen Герберт Дисс. Он также подтвердил, что словацкий завод получит крупные производства концерна Volkswagen в интервью журналу Automobilwoche.

Volkswagen изначально планировал построить новый завод для Passat и Škoda Superb в Турции, но передумал, пишет Denník N.

Представители Volkswagen Slovakia пока никак не прокомментировали эту информацию, так как наблюдательный совет Volkswagen обсудит инвестиции позднее, сообщает Denník N.

Некоторые детали неясны

Пока неясно, сколько Passats и Škoda Superbs будет производиться в Словакии. Словацкое отделение Volkswagen никак не прокомментировало это решение, пишет Denník N. Также пока неясно, будет ли часть инвестиций включать в себя электроавтомобили, добавила газета.

Тем не менее, это инвестиции, которые принесут стабильность словацкому заводу, особенно во время нынешнего коронавирусного кризиса. Одной из причин, по которой автопроизводитель решил инвестировать в Словакию, могут быть инвестиционные стимулы. Правительство обещало построить институт для обучения персонала и повышения его квалификации. Планируется построить новые арендные квартиры для сотрудников автопроизводителя в радиусе 20 километров от завода и помочь обеспечить транспорт для доставки персонала, пишет Denník N.

Источник: spectator.sme.sk, 12 ноября 2020 Foundry Planet

*Материал подготовил В. Е. Соболев,
Белорусский национальный технический университет*



Загадчыку кафедры "Металургія чорных і
каляровых сплаваў" БНТУ,
доктару тэхнічных навук, прафесару
Немянёнку Балеславу Мечаслававічу –
70 год

Сярод ліцейшчыкаў у Беларусі
Вучоны ёсць адзін вядомы, знатны,
Усё пра яго сказаць я не бяруся,
А коратка скажу на што ён здатны.

Закончыў школу з залатым медалем,
І лёс накіраў у БНТУ, у Мінск
А той фундамент, што бацькі і школа далі
Наканваў яму падняцца ўвысь.

Як афіцэр – танкіст пасля Германіі
У сям'ю ліцейшчыкаў на кафедру прыйшоў.
К расплавам дадаваў ад скандыю да галію
І многае ў навучы ён знайшоў.

Спачатку кандыдат, а потым доктар,
Надзейна замяніў настаўніка свайго,
Павага кафедры і атмасферы тонкі водар
Адметнай рысай ёсць на кафедры ў яго.

Дык дай Вам Бог, прафесар наш шаноўны,
Здароў'я надалей, працоўных перамог,
Каб і ў сям'і і ў кокілі было зайсёды поўна.
Каб тое, што сягоння можаш
І у перспектыве выканаць ты мог.

Ад імя калектыву механіка-
тэхналагічнага факультэта

Дэкан, д-р тэхн. навук, прафесар Іваноў І.А.

Загадчыкі кафедр, д-ра тэхн. навук
Констанцінаў В.М., Лазарэнкаў А.М.,
Панцэлеенка Ф.І., Ровін С.А., Шаміла В.А.



О ЧЕЛОВЕКЕ

Стоит в жизни задуматься,
Это имеет большое значение:
Каково происхождение человека
И какое его предназначение?

Говорят, что мысли человека –
Это его мозга творение.
Но откуда исходит любовь,
И берется творческое вдохновение?

Если человек – высокоразвитое животное –
Продукт бессознательной эволюции,
То откуда у человека сознание,
Способность творить, совершать революции?

Откуда у человека мысли?
Они исходят из его души.
Она управляет телом,
Мысли – творение души.

Все человеческие ощущения –
Это не мозга произведения.
Ощущения, абстрактное мышление –
Это все души творения.

Человеческая свобода – от Бога.
Человек – это Его творение.
Душа человека божественна,
У него творческое предназначение.

Владимир Стеценко

О ЛЮБВИ

Ученые-материалисты считают:
Любовь – это биохимический процесс,
Который в науке мало изучен,
Но вызывает большой интерес.

Такая любовь очень скучна,
И поэтам она давно надоела.
Они считают любовь свойством
Души, а не человеческого тела.

Человеческая любовь – понятие
Не простое биохимическое,
А сложное, комплексное,
И душевное и психофизическое.

Любовь дает жизнь,
Любовь жизненно красива,
Чувственно очень богата,
А главное – добра и благочестива.

Если мечты окрыляют,
То любовь вдохновляет.
Кто этого не познал,
Тот жизни не видал.

Как хорошо любить,
И быть любимым.
Любовь делает человека
Мудрым, добрым и счастливым.

Владимир Стеценко

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 статьей.

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 красок, 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.

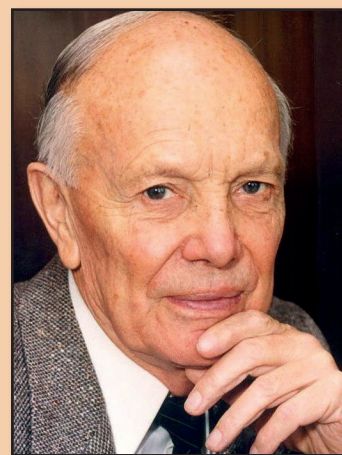
ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ МОДУЛЯМ

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.

СВЕТЛОЙ ПАМЯТИ

Президента Национальной Академии Наук Украины, академика Бориса Евгеньевича ПАТОНА – Ученого, Учителя, Человека



Борис Евгеньевич Патон – выдающийся ученый в области сварки, металлургии и технологии материалов, известный общественный деятель и организатор науки, академик многих академий, дважды Герой Социалистического Труда, Герой Украины, участник Великой Отечественной войны.

Основные вехи биографии Бориса Евгеньевича неразрывно связаны с историей советской и украинской науки. Он прошел славный путь от студента Киевского политехнического института до ученого с мировым именем, академика, государственного и общественного деятеля.

Незаурядные способности в сочетании с внутренней дисциплиной и концентрацией позволили Борису Евгеньевичу выдвинуть великие идеи и направить их в русло практического воплощения, заложить основы ряда оригинальных научных направлений.

Мировой авторитет Борису Евгеньевичу Патону принесли плодотворная научная и инженерная деятельность, умение направить результаты фундаментальных исследований на потребности экономики и общества.

С 1962 г. Борис Евгеньевич являлся бессменным президентом Академии наук УССР, теперь – Национальной академии наук Украины.

Его авторитетный голос всегда выражал искреннюю позицию ученого и созидателя, проникнутую заботой о настоящем и будущем науки.

Борис Евгеньевич говорил: «Считаю, что науку мало и плохо слышат. От этого – все негативные последствия, и не только для науки».

Большие творческие и человеческие отношения связывали литейщиков и металлургов Беларуси с этим выдающимся человеком нашей эпохи.

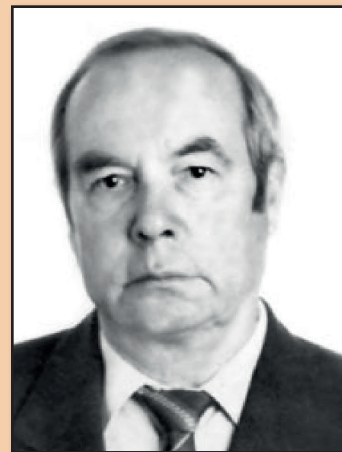


Академик Б. Е. Патон и академик Е. И. Марукович
во время одной из встреч.

ПАМЯТИ

Николая Никитьевича АЛЕКСАНДРОВА

1927–2020



В июле 2020 года ушел из жизни доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, многие годы возглавлявший Литейный отдел ОАО «НПО НИИТ-МАШ», **Николай Никитьевич Александров**.

После окончания в 1950 г. Бежицкого института транспортного машиностроения по специальности «Машины и технология литейного производства» Н. Н. Александров работал на Краматорском заводе тяжелого станкостроения, сначала технологом, затем заместителем начальника литейного цеха. В 1953 г. он поступил в аспирантуру ЦНИИТМАШа, с которым связал всю свою дальнейшую творческую судьбу.

После успешной защиты кандидатской диссертации Николай Никитьевич стал заведующим лабораторией, а затем – заведующим отделом. В 1972 г. ему была присуждена ученая степень доктора технических наук, а в 1979 г. он утвержден в звании профессора.

Научная деятельность Н. Н. Александрова посвящена созданию теоретических основ технологии производства чугунов с повышенными специальными свойствами, разработке принципиально новых технологических процессов в области плавки, модифицирования и легирования чугунов, что получило широкое признание как в отечественной, так и зарубежной практике.

По многим разработкам, выполненным под руководством Николая Никитьевича, получены патенты и проданы лицензии зарубежным фирмам. За разработку технологии центробежного литья заготовок ответственного назначения Н. Н. Александров вместе с другими сотрудниками института был удостоен в 1980 г. Государственной премии СССР в области науки и техники, а в 1990 г. – премии Совета Министров СССР.

За создание принципиально нового класса конструкционных чугунов и широкого их освоения в промышленности Н. Н. Александров вместе с другими сотрудниками института был удостоен в 2003 г. премии Правительства РФ в области науки и техники.

Под его руководством защищены более 20 докторских и кандидатских диссертаций. Н. Н. Александров – автор более 100 изобретений и патентов, им опубликовано свыше 200 статей и четыре монографии. В 1983 г. под его редакцией издана книга «Высококачественные чугуны для отливок».

Заслуги Н. Н. Александрова были высоко оценены Международным комитетом технических ассоциаций. Он был включен в президиум МКАТЛ, а в 1983 г. стал президентом этой организации и провел в Португалии Международный конгресс литейщиков.

Н. Н. Александров вел большую научно-общественную работу. На протяжении многих лет был бессменным членом Редсовета журнала «Литейное производство».

За многолетнюю плодотворную деятельность Н. Н. Александров награжден орденами Трудового Красного Знамени и медалями.

От лица литейной общественности Республики Беларусь приносим искренние и глубокие соболезнования родным и близким Николая Никитьевича Александрова.

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.

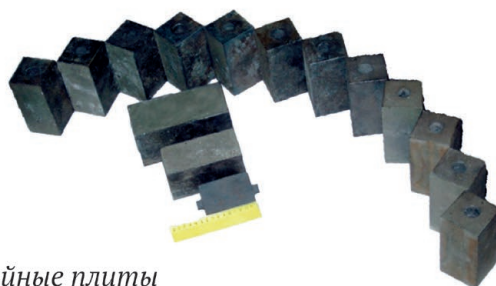
Для центробежных мельниц



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, латуней 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.



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*