

ЛИТМЕТЭКСПО-2016

Международная выставка литейного производства и металлургических технологий

Выставка проходит одновременно с выставкой Машиностроение-2016

5-8 апреля 2016

пр-т Победителей, 20/2, Минск, Беларусь

Организаторы:

ЗАО «МинскЭкспо»

Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь

При поддержке:

-Министерства промышленности Республики Беларусь

-Национальной академии наук Беларуси

-Белорусского национального технического университета

-Международной ассоциации литейщиков

Тематика:

- Материалы литейного производства
- Технологии и оборудование литейного производства
- САПР и моделирование литейных и металлургических технологий
- Прокатное и метизное производства
- Трубное производство
- Листопрокатное производство
- Прокатные станы, кузнечнопрессовое оборудование
- Оборудование для инжекционного формования
- Электроплавка стали и чугунов
- Специальные виды литья
- Подготовка шихтовых материалов и плавильное оборудование
- Переработка вторичного сырья, утилизация отходов
- Вторичная обработка сплавов
- Очистка газовых выбросов, технологии защиты окружающей среды
- Автоматизация управления производственными процессами, информационные технологии
- Контрольно-измерительное оборудование и технологии
- Промышленное оборудование и технологии термообработки
- Вспомогательное оборудование для металлургического производства
- PVD, CVD – покрытия
- Транспортировка и хранение, логистика
- Подготовка и повышение квалификации персонала
- Продукция металлургического производства
- Отраслевые издательства, специализированная литература

ЗАО «Минскэкспо»

220035, Республика Беларусь

г. Минск, ул. Тимирязева, 65

Тел./Факс: (+375 17) 226-91-93

Факс: (+375 17) 226-91-93

E-mail: weld@minskexpo.com

www.minskexpo.com

Руководитель проекта:

ДЕМИДОВИЧ Николай Иванович

Ассоциация литейщиков и

металлургов Республики Беларусь

220013, Республика Беларусь

г. Минск, ул. Я. Коласа, 24, комната 8.

Тел./Факс: (+375 17) 292 74 75, 331 11 16

292 50 60

E-mail: alimrb@tut.by

www.alimrb.by

Внимание!

72-й Всемирный литейный конгресс

21–24 мая 2016 г. в г. Нагоя (Япония) состоится 72-й Всемирный конгресс (WFC 2016) и международная выставка JAPAN FOUNDEX-2016 с демонстрацией новейших технологий оборудования и новшеств в литейном и металлургическом производствах.

Один раз в два года Конгресс предлагает прекрасную возможность литейщикам со всего мира встретиться для обмена идеями в выработке общего видения будущего мировой литейной промышленности (WFO).

Конгресс организуется Японским обществом литейщиков (JFC) с участием Всемирной организации литейщиков.

Предусмотрена работа секций:

- Металлургия и литейное производство черных металлов.**
- Металлургия и литейное производство цветных металлов.**
- Контроль качества.**
- Новые литейные технологии.**
- Проектирование литейных предприятий.**
- Моделирование и информатика в литейном производстве.**
- Энергоэффективность.**

Основной пленарный доклад – «Настоящее и будущее литейной промышленности Японии».

Участие в конгрессе и выставке поможет установить новые деловые контакты и приобрести новых партнеров, получить доступ к новейшим достижениям литейного производства Японии и всего мира.

В случае Вашей заинтересованности просьба направлять информацию в Ассоциацию литейщиков и металлургов – тел./факс + 375 331-11-16, e-mail: alimrb@tut.by.

4 (81) '2015

ЛИТЬЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

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

УЧРЕДИТЕЛИ

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

ИЗДАТЕЛЬ

Белорусский национальный технический университет

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДСОВЕТА

Савенок А. Н., ген. директор ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»

ЗАМ. ПРЕДСЕДАТЕЛЯ РЕДСОВЕТА

Марукович Е. И., акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., Лауреат Госпремий БССР и РБ

РЕДСОВЕТ

Хрусталева Б. М.
Борщов С. М.
Мельников А. П.
Сайков М. А.
Карась А. Н.
Лукашевич С. Ф.
Самончик В. Г.
Степанов Д. В.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Марукович Е. И., акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., Лауреат Госпремий БССР и РБ

ОСНОВАТЕЛЬ ЖУРНАЛА

Кукуй Давид Михайлович, д-р техн. наук, проф., Лауреат Госпремии БССР

СОДЕРЖАНИЕ

Подписной индекс 75034

Марукович Е. И.

Поздравление 5

Иванов И. А., Немененок Б. М.

Механико-технологический факультет БНТУ 6

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Риццо Дж., Бучелли Ф., Шаккалуга М., Аватанео О., Foundry Alfe CNEM s.r.l.

Экологичная химия для экологичной промышленности 11

Крутилин А. Н., Лущик П. Е., Андриц А. А., Долгий А. П., БНТУ

Конструкция кристаллизатора для полунепрерывного литья заготовок из чугуна 18

Ровин С. Л., УП «Технолит», Ровин Л. Е., Заяц Т. М., Русая Л. Н., ГГТУ им. П. О. Сухого

Модернизация ваграночного парка 28

Одарченко И. Б., Прусенко И. Н., ГГТУ им. П. О. Сухого

Процессы взаимодействия жидкого металла и литейного стержня при формировании качества внутренних полостей отливок 33

Волочко А. Т., ГНУ ФТИ НАН Беларуси

Модифицирование эвтектических и первичных частиц кремния в силуминах. Перспективы развития 38

Прусенко И. Н., ГГТУ им. П. О. Сухого

Технологические возможности и уровни управления качеством литейных стержней 46

Волочко А. Т., ГНУ ФТИ НАН Беларуси

Теплоизолирующие керамические элементы при литье изделий из алюминиевых сплавов 49

Небожак И. А., Суменкова В. В., Шинский О. И., Бабюк В. Д., Жидков Е. А., ФТИМиС НАН Украины

Эффективность графитизирующего модифицирования серого чугуна с помощью дисперсно-наполненной газифицируемой модели 56

Ровин С. Л., УП «Технолит», Ровин Л. Е., ГГТУ им. П. О. Сухого

Переработка техногенных железосодержащих отходов 67

Воробьев В. В., ОАО НПО «Центр», Одиночко В. Ф., Гуминский Ю. Ю., Шишпор К. Д., БНТУ

Экспериментальные исследования процесса переработки отвалных песчано-глинистых смесей центробежно-ударным способом 71

Есьман Р. И., БНТУ, Марукович Е. И., ГНУ ИТМ НАН Беларуси

Исследование математических моделей непрерывнолитых заготовок 75

МЕТАЛЛУРГИЯ

Марушкевич В. Э., Мозгов С. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»

Инвестиционная программа – ключ к устойчивому развитию предприятия 81

Апфель Й., Хайн М., Хубер Х., Чатан Д., Primetals Technologies Germany GmbH

20 лет опыта с технологией подогрева лома 86

Рожков А. И., Ермакова Е. В., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»

Поиск способов утилизации пыли дуговых сталеплавильных печей на Белорусском металлургическом заводе. Часть 3. Опыт по брикетированию пыли дуговых сталеплавильных печей 93

Ковалева И. А., Ходосовская Н. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»

Исследование образцов-свидетелей бесшовных горячекатаных труб, прошедших испытания в скважинах нефтяных месторождений РУП «ПО «Белоруснефть» на предмет их коррозионной стойкости 98

Кабишов С. М., Ратников П. Э., Трусова И. А., БНТУ

Оценка влияния конструкции футеровки на величину тепловых потерь при работе камерной печи 108

Сугойда А. Л., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»

Снижение удельных расходов топливно-энергетических ресурсов на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК». 116

Захоревич С. В., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»

Система рациональной организации рабочего окружения «5S» 119

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Марукович Е. И. (гл. редактор), акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. (Беларусь)
 Иваницкий Н. И. (зам. гл. редактора), канд. техн. наук (Беларусь)
 Борщов С. М. (зам. гл. редактора по металлургии) (Беларусь)
 Бевза В. Ф., канд. техн. наук (Беларусь)
 Витязь П. А., акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. (Беларусь)
 Гордиенко А. И., акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. (Беларусь)
 Дибров И. А., д-р техн. наук, проф. (Россия)
 Иванов И. А., д-р техн. наук, проф. (Беларусь)
 Калининченко А. С., д-р техн. наук (Беларусь)
 Константинов В. М., д-р техн. наук, проф. (Беларусь)
 Клубович В. В., акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. (Беларусь)
 Ловшенко Г. Ф., д-р техн. наук, проф. (Беларусь)
 Ли Джон-Хун, проф. (Республика Корея)
 Маяускас Э. П., д-р наук (Литва)
 Мушна К., д-р наук (Германия)
 Найдок В. Л., акад. НАН Украины, д-р техн. наук, проф. (Украина)
 Немененок Б. М., д-р техн. наук, проф. (Беларусь)
 Николайчик Ю. А., канд. техн. наук (Беларусь)
 Пантелеенко Ф. И., чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. (Беларусь)
 Перетягина Е. А. (Беларусь)
 Син Кван Сон, проф. (Республика Корея)
 Стеценко В. Ю., канд. техн. наук (Беларусь)
 Чичко А. Н., д-р физ.-мат. наук, проф. (Беларусь)
 Чой Ки-Йонг, проф. (Республика Корея)
 Чой Чжон Кил, проф. (Республика Корея)
 Шипко А. А., д-р техн. наук, проф. (Беларусь)

РЕДАКЦИЯ

Машканова С. В. (редактор)
 Волюнец П. В. (компьютерная верстка, дизайн)
 Голосюк Н. В. (менеджмент)

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.limrb.by

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

Подписано в печать 10.12.2015.
 Выход в свет 30.12.2015.
 Формат 60x84%.
 Цена свободная

Редакция не несет ответственности за содержание рекламных объявлений. Перепечатка материалов, публикуемых в журнале «Литье и металлургия», осуществляется только с разрешения редакции.

Корнеев С. В., Кабишов С. М., БНТУ

Экологические аспекты использования металлолома в металлургическом производстве 123

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Покровский А. И., ГНУ ФТИ НАН Беларуси, Хроль И. Н., Минпром РБ

Сравнительные исследования изломов высокопрочного чугуна в литом и деформированном состоянии 131

Калининченко В. А., Григорьев С. В., Калининченко М. Л., Зелезей А. Е., БНТУ

Особенности получения макрогетерогенных композиционных материалов методами индукционной плавки, их структура и свойства 146

Анисович А. Г., Урбан Т. П., Буйницкая А. С., ГНУ ФТИ НАН Беларуси

Определение плотности куприта при анализе кислородной меди 151

НОВОСТИ

Николайчик Ю. А., БНТУ, Соболев В. Е., АЛМ РБ

Об экспортных поставках продукции литейной и металлургической промышленности из Беларуси, России и Украины в страны ЕС 156

КОНФЕРЕНЦИЯ

Результаты 23-й Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия 2015. Беларусь» 164

ПОЗДРАВЛЯЕМ

Немененок Б. М. (к 65-летию со дня рождения). 171

4 (81) '2015

FOUNDRY PRODUCTION AND METALLURGY

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

Belarussian national technical university

JSC «BSW» – management company of holding «BMC»

Association of Foundrymen and Metallurgists

Public corporation «BELNIILIT»

Public corporation «GOMEL FOUNDRY «TSENTROLIT»

State scientific enterprise «Institute of technology of metals of National academy of sciences of Belarus»

Public corporation «Minsk traktor plant»

Public corporation «Mogilev metallurgical plant»

Public corporation «Rechitsa metizny plant»

PUBLISHER

Belorussian national technical university

CHAIRMAN OF EDITORIAL COUNCIL

Savenok A. N., general director of JSC «BSW» – management company of holding «BMC»

DEPUTY CHAIRMAN

OF THE EDITORIAL COUNCIL

Marukovich E., Academician of NAS RB, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Laureate of State Prize of BSSR and RB

EDITOR IN CHIEF

Marukovich E., Academician of NAS of Belarus, Dr. of Engineering Sciences, Professor

EDITORIAL COUNCIL

Khrustalev B.

Borschov S.

Melnikov A.

Saykov M.

Karas A.

Lukashevich S.

Samonchik V.

Stepanov D.

ESTABLISHER OF THE JOURNAL

Kukui D., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Laureate of State Prize of BSSR

CONTENTS

Subscription 75034

Marukovich E. I.

Congratulation 5

Ivanov I. A., Nemenenok B. M.

Mechanics and Technology Faculty of Belarussian National Technical University 6

FOUNDRY

Rizzuto G., Bucelli F., Sciacaluga M., Avataneo O.

Sustainable chemistry for sustainable industry 11

Krutilin A. N., Lushchik P. E., Andrits A. A., Dolgij L. P.

Crystallizer design for semi-continuous molding of cast iron units 18

Rovin S. L., Rovin L. E., Zayats T. M., Rusaya L. N.

Modernization of cupola equipment 28

Odarchenko I. B., Prusenko I. N.

The processes of the liquid metal and the mold core interaction during the formation of the internal cavity of the casting 33

Volochko A. T.

Modification of eutectic and primary particles of silicon in silumins. development prospects 38

Prusenko I. N.

Manufacturing capability and the levels of the mold cores quality management 46

Volochko A. T.

Insulating ceramic inserts for casting products from aluminum alloys. 49

Nebozhak I. A., Sumenkova V. V., Shynsky O. I., Babyuk V. D., Zhydkov E. A.

Investigation of efficiency of gray cast iron graphitizing modification by dispersion-filled consumable pattern. 56

Rovin S. L., Rovin L. E.

Processing of industrial iron containing wastes 67

Vorobev V. V., Odinochko V. F., Guminskiy Y. Y., Shishpor K. D.

Experimental research of processing of dump sand-clay mixes by the centrifugal and shock crushing. 71

Esman R. I., Marukovich E. I.

Research of the mathematical models of continuous cast ingots 75

METALLURGY

Marushkevich V. E., Mozgov S. A.

The investment program – key to a sustainable development of the enterprise 81

Apfel Jens, Hein Michel, Huber Hans-Jörg, Catan Deniz

20 years of experience with scrap preheating technology. 86

Rozhkov A. I., Ermakova E. V.

Finding ways of recycling dust of arc steel furnaces at the belarussian metallurgic plant. Part 3. Experiments on briquetting of dust of arc steel furnaces 93

Kovaleva I. A., Hodosovskaya N. A.

Research of witness samples of seamless hot-rolled pipes after tests in wells of oil fields of rup «on «belorusneft» regarding their corrosion resistance 98

Kabishov S. M., Ratnikov P. E., Trusova I. A., Mendelev D. V.

Assessment of thermal losses of enwall desion during operation of chamber furnace 108

Sugoyd A. L.

Reduction of specific consumption of fuel and energy resources at the JSC «BSW – management company of holding «BMC» 116

Zakhorevich S. V.

The system of rational organization of the working environment «5S» 119

Korneev S. V., Kabishov S. M.

Environmental aspects of the use of scrap in steel production 123

SCIENCE OF MATERIALS

Pokrovsky A. I., Khrol I. N.

Comparative researches of fractures of high-strength cast iron in the as-cast and deformed state 131

Kalinichenko V. A., Grigorev S. V., Kalinichenko M. L., Zelezey A. E.

Features of macroheterogeneous composite materials synthesis with the help of induction melting, their structure and properties. 146

EDITORIAL BOARD

Marukovich E. (editor in chief), Academician of NAS of Belarus, Dr. of Technical Sciences, Professor (Belarus)
 Ivanitsky N., (Deputy Editor for foundry), Candidate of Technical Sciences (Belarus)
 Borshchov S. (Deputy Editor for metallurgy) (Belarus)
 Bevza V., Candidate of Technical Sciences (Belarus)
 Vityaz P., Academician of NAS of Belarus, Dr. of Technical Sciences, Professor (Belarus)
 Gordienko A., Academician of NAS of Belarus, Dr. of Technical Sciences, Professor (Belarus)
 Dibrov I., Dr. of Technical Sciences, Professor (Russia)
 Ivanov I., Dr. of Technical Sciences, Professor (Belarus)
 Kalinichenko A., Dr. of Technical Sciences (Belarus)
 Konstantinov V., Dr. of Technical Sciences, Professor (Belarus)
 Klubovich V., Academician of NAS of Belarus, Dr. of Technical Sciences, Professor (Belarus)
 Lovshenko G., Dr. of Technical Sciences, Professor (Belarus)
 Lee Jong-Hoon, Professor (Korea)
 Mayauskas E., Dr. of Technical Sciences (Lithuania)
 Mushna K., Dr. of Sciences (Germany)
 Neideck V., Academician of NAS of Ukraine, Dr. of Technical Sciences, Professor (Ukraine)
 Nemenenok B., Dr. of Technical Sciences, Professor (Belarus)
 Nikolaichik Yu., Candidate of Technical Sciences (Belarus)
 Panteleenko F., Corresponding Member of NAS of Belarus, Dr. of Technical Sciences, Professor (Belarus)
 Peretyagina E. (Belarus)
 Shin Kwang Seon, Professor (Korea)
 Stetsenko V., Candidate of Technical Sciences (Belarus)
 Chichko A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Belarus)
 Choi Ki Yong, Professor (Korea)
 Choi Jeong Kil, Professor (Korea)
 Shipko A., Dr. of Technical Sciences, Professor (Belarus)

EDITORIAL STAFF

Mashkanova S. (Editor)
 Volynets P. (computer layout, design)
 Golosuk N. (management)

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: limrb.by
 The magazine 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.

No portion of the Foundry Production and Metallurgy Journal may be reproduced without written consent. The views and opinions, expressed in the articles, statements and advertisements are those of respective authors and companies and Foundry Production and Metallurgy Journal does not accept responsibility for these statements made and opinions expressed in the Journal.

Anisovich A. G., Urban T. P., Buynitskaya A. S.

Determination of cuprite density by analysis of oxygenous copper 151

NEWS

Nikolaichik Y. A., Sobolev V. E.

Export of foundry and metallurgical products from belarus, russia and ukraine to the european union 156

CONFERENCE

Results of the 23rd International Scientific and Technical Conference «Foundry and Metallurgy 2015. Belarus» 164

CONGRATULATIONS

Nemenenok B. M. (to 65 anniversary of the birth) 171

**95 лет
БНТУ**

Уважаемые читатели!

Вы держите в руках очередной выпуск журнала «Литье и металлургия», который традиционно выпускается четыре раза в год.

Этот выпуск особенный. Накануне учредитель и издатель журнала – Белорусский национальный технический университет отметил свое 95-летие! Невозможно переоценить роль БПИ – БНТУ в подготовке высококвалифицированных инженерных кадров. Большинство авторов и читателей журнала закончили БПИ или БНТУ.

В основном это выпускники механико-технологического факультета. Именно из нашего факультета вышли десятки выдающихся инженеров, «командиров» производства, ученых, педагогов, общественных и государственных деятелей.

Наш журнал плоть от плоти творение механико-технологического факультета. Основал журнал выпускник БПИ, выдающийся ученый, педагог, литейщик, безвременно ушедший, Давыд Михайлович Кукуй.

Наш журнал, по сути, является научно-производственным журналом, что отвечает потребностям как промышленности, так и исследователей. С первых номеров журнала Давыд Михайлович проводил линию на широкую интеграцию в мировое литейное производство.

Сегодня его знают во всем мире. Во многом через журнал осуществляет международное сотрудничество Ассоциация литейщиков и металлургов. Среди подписчиков журнала десятки зарубежных фирм. На его страницах постоянно присутствуют иностранные авторы. И не случайно, наш журнал среди трех журналов БНТУ представлен для включения в зарубежные индексы цитирования SCIVERSE SCOPUS.

Журнал постоянно совершенствуется. Необходимо и в будущем искать новые формы взаимодействия авторов и читателей, науки и производства.

Залог успеха журнала – наш учредитель и издатель Белорусский национальный технический университет.

Свое 95-летие университет встречает в расцвете сил, вечно обновляющимся, высоко несущим планку подготовки инженерных кадров. Жизненная практика постоянно подтверждает тезис: «Хочешь быть успешным – поступай в БНТУ».

Ведь БНТУ – это по определению высокое качество образования, высшее и по своему наименованию, и по своей пробе!

Сегодня в день 95-летия авторы и читатели журнала «Литье и металлургия» желают родному «ПОЛИТЕХУ» успехов, развития и процветания.



*Главный редактор,
директор ИТМ НАН Беларуси,
выпускник БПИ, д-р техн. наук, профессор,
академик, дважды лауреат Государственной
премии, Заслуженный изобретатель Республики Беларусь
Е. И. Марукович*



МЕХАНИКО–ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ БНТУ

И. А. ИВАНОВ, Б. М. НЕМЕНЕНОК, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

История механико-технологического факультета (МТФ) неразрывно связана с 95-летней историей БПИ-БГПА-БНТУ. В первые годы создания БПИ в его состав входил механический факультет, задачей которого была подготовка инженеров для различных отраслей промышленности СССР. С развитием и усложнением производства на рубеже 50–60-х годов XX в. появилась острая необходимость в большей специализации выпускников. Таким образом, от механического факультета стали отпочковываться новые направления подготовки специалистов в форме новых факультетов (автотракторный, машиностроительный, механико-технологический). Подготовка специалистов в областях литейного производства, обработки материалов давлением, сварочного производства, создания новых и обработки традиционных машиностроительных материалов была возложена на МТФ, созданный в результате реорганизации механического факультета БПИ в 1958 г. Огромный вклад в его становление и развитие внесли деканы 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). Достижения факультета неразрывно связаны с именами известных ученых и организаторов высшего технического образования: академиков В. П. Северденко, О. В. Романа, А. В. Степаненко, П. А. Витязя, профессоров В. И. Беляева, Е. И. Бельского, Л. С. Ляховича, Е. Б. Ложечникова, Д. Н. Худокормова, Л. Г. Ворошнина, Д. М. Кукуя, В. И. Тутова и др.

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. Исследования в области физико-химической теории пластичности металлов велись под руководством академика АН БССР В. П. Северденко. Работа ученых факультета не ограничивалась только научными исследованиями. 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 1964 г. при кафедре «Технологии металлов» была создана проблемная вузовская лаборатория порошковой металлургии, которую возглавил доцент О. В. Роман (впоследствии академик АН БССР). Лаборатория тесно сотрудничала с крупными промышленными предприятиями Минска, Москвы, Свердловска, Харькова и других городов СССР. За 11 лет существования лаборатории было защищено 4 докторские и 17 кандидатских диссертаций. В 1972 г. на базе лаборатории был создан



И. А. Иванов, декан МТФ,
д-р техн. наук, профессор



Б. М. Немененок, зав. кафедрой
«Металлургия литейных сплавов»,
д-р техн. наук, профессор



НИИ Порошковой металлургии, который впоследствии был преобразован в НПО Порошковой металлургии НАН Беларуси. С 1962 г. кафедра металловедения и термической обработки металлов (заведующий – д-р техн. наук, профессор Л. С. Ляхович) начала первые работы по исследованию малоизвестных тогда в Советском Союзе методов поверхностного упрочнения деталей борированием. Народнохозяйственное значение отдельных научных разработок сотрудников кафедры «Литейное производство черных и цветных металлов» (ныне «Металлургия литейных сплавов») отмечены Государственной премией БССР (Д. Н. Худокормов, А. М. Га-

лушко), 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), 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 профессор Л. Г. Ворошнин (кафедра «Материаловедение в машиностроении») был дважды отмечен премией имени Н. А. Минкевича (1979 и 1983 гг.). За исследование, разработку и внедрение эффективных ресурсо- и материалосберегающих экологически безвредных технологических процессов получения высококачественных отливок в условиях централизованного производства в 1990 г. Д. М. Кукуй (кафедра «Машины и технология литейного производства»), Е. И. Марукович, Г. А. Анисович были удостоены Государственной премии БССР. В 2010 г. за работу «Создание и промышленная реализация принципиально нового метода непрерывно-циклического литья намораживанием высокоизносостойких деталей машин» Е. И. Маруковичу, В. Ф. Бевзе была присуждена Государственная премия Республики Беларусь. Ученые и специалисты факультета принимали участие в освоении трубопрокатного производства в условиях Белорусского металлургического завода. В сфере металлургии успешная научная работа проводилась на кафедре «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.

К выполнению всех отмеченных научно-исследовательских работ активно привлекались студенты факультета. Это стало одним из важных факторов подготовки высококвалифицированных специалистов, способных самостоятельно решать сложные научные и технические задачи. Научно-исследовательской работой начиная со второго и третьего курсов обучения охвачено более 30% студентов дневной формы обучения, в том числе и на платной основе. 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. Это дает им преимущественное право при поступлении в магистратуру или аспирантуру. На факультете функционируют два студенческих научно-исследовательских бюро «Сплав» (научный руководитель – канд. техн. наук, доцент А. Г. Слуцкий) и «Материаловедение» (научный руководи-





тель – д-р техн. наук, профессор В. М. Константинов).

В настоящее время МТФ – это крупный учебно-научно-производственный комплекс, включающий восемь кафедр с их десятью филиалами на ведущих промышленных предприятиях республики, десять научно-исследовательских лабораторий (НИЛ), два студенческих научно-исследовательских бюро.

На факультете обучается около 1100 студентов и магистрантов, из них 650 по дневной форме обучения. Учебный процесс ведут 85 штатных научно-педагогических работников, среди которых один

академик НАН Беларуси, один член-корреспондент НАН Беларуси, 17 д-ров техн. наук, профессоров, 45 канд. техн. наук, доцентов.

Факультет осуществляет набор по пяти специальностям: материаловедение в машиностроении, машины и технология обработки материалов давлением, оборудование и технология сварочного производства, машины и технология литейного производства. На специальности металлургическое производство и материалобработка обучение идет по специализациям: металловедение, технология и оборудование термической обработки металлов; литейное производство черных и цветных металлов; электрометаллургия черных и цветных металлов; металлургическая теплотехника и печи, и по направлению специальности металлургическое производство и материалобработка – промышленная безопасность.

Подготовку специалистов по перечисленным выше специальностям осуществляют шесть выпускающих кафедр и две кафедры общеобразовательного профиля, каждая из которых имеет свою научную школу. Заведуют кафедрами академик НАН Беларуси А. Р. Цыганов, член-корреспондент НАН Беларуси Ф. И. Пантелеенко, доктора наук, профессора – А. М. Лазаренко, И. А. Трусова, Б. М. Немененок, В. М. Константинов, К. Е. Белявин, канд. техн. наук, доцент А. Н. Крутилин.

В рамках совершенствования учебного процесса на факультете активно внедряются информационные технологии, модульно-рейтинговая система оценки знаний студентов. Все кафедры факультета располагают современной лабораторной базой и компьютерными классами для проведения учебных занятий и выполнения студентами научных исследований. Производственные практики проводятся на передовых предприятиях республики: ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», «МТЗ – Холдинг», ОАО «МАЗ», «БЕЛАЗ-холдинг», в отраслевых и академических институтах и в других организациях. Факультет является инициатором привлечения учащихся к научно-исследовательской работе, создания на ведущих предприятиях учебно-научно-производственных объединений и филиалов кафедр. МТФ активно участвует в международных программах студенческого обмена.

Заведующий кафедрой МТФ Д. М. Кукуй являлся инициатором создания и выпуска ежеквартального научно-производственного журнала «Литье и металлургия» и Ассоциации литейщиков и металлургов Республики Беларусь, на базе которой ежегодно проводится Международная научно-техническая конференция «Литейное производство и металлургия. Беларусь». На факультете издается также межведомственный сборник научных трудов «Металлургия».

На кафедре «Охрана труда» создана испытательная лаборатория, аккредитованная в Национальной системе аккредитации Республики Беларусь. При кафедре «Металлургия литейных сплавов» функционирует научно-исследовательская ис-





различных отраслей народного хозяйства и зарубежных стран. Многие из них являются руководителями крупных предприятий и учреждений, ведущими учеными в республике и за ее пределами. Среди них Л. В. Анфимов – председатель комитета Госконтроля РБ; А. Н. Савенок – генеральный директор ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»; А. А. Михалевич – главный научный сотрудник, научный руководитель Института энергетики НАН Беларуси, академик, д-р техн. наук, проф.; Е. И. Марукович – директор Института технологии металлов НАН Беларуси, академик, д-р техн. наук, проф.; Ф. И. Пантелеенко – первый проректор БНТУ, член-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.; С. А. Захарьин – председатель Совета АО «Лиепаяс Металлург»; Л. И. Воронецкий – директор национального центра интеллектуальной собственности; И. В. Пашкевич – начальник управления таможенного комитета; М. М. Мятликов – председатель Торгово-Промышленной палаты; Р. Э. Трубицкий – директор Лидского литейно-механического завода, канд. техн. наук; Н. А. Ричко – директор Белозерского энергомеханического завода; Е. Г. Шварц – директор ЗАО «Амкодор – Лит»; А. И. Турок – директор завода «Амкодор-Логойск»; М. Г. Цыцня – директор ОАО «ЛМЗ УНИВЕРСАЛ»; Фам Ван Фа – директор завода в СРВ, полковник и многие другие.

Выпускники нашего факультета пользуются большим спросом на предприятиях машино-, приборостроения и др. Ежегодная потребность государственных и негосударственных предприятий и организаций в инженерах-металлургах и инженерах-механиках значительно превышает объемы подготовки, поэтому мы не имеем проблем с распределением и трудоустройством молодых специалистов.

Студенты факультета не только учатся, но и участвуют в спортивной и общественной жизни университета. На факультете максимально созданы условия для полноценного личностного развития, жизненного самоопределения студентов, для воспитания у них патриотических чувств, гражданской культуры и национального самосознания.

Иногородние студенты МТФ проживают в отдельном комфортном общежитии, которое находится на территории университетского студенческого городка, рядом с учебными корпусами, библиотекой и стадионом. Рядом с общежитием расположена станция метро «Академия наук». На территории общежития действует локальная компьютерная сеть, которую обслуживают сами студенты. В общежитии оборудованы кабинеты для самоподготовки к занятиям, для занятия силовыми видами спорта, для проведения культурно-массовых мероприятий. Студенческое самоуправление на факультете и в общежитии стало школой обучения молодых людей умениям и навыкам общественной деятельности, овладения управленческой культурой, формирования системы ценностных ориентаций, нравственных норм

пытательная лаборатория очистки газовых выбросов литейных цехов, аккредитованная на соответствие требованиям СТБ ИСО/МЭК 17025–2007 в сфере проведения испытаний.

По всем специальностям ведется подготовка аспирантов, действует специализированный совет по защите диссертаций. Факультет имеет широкие связи с учебными заведениями и научными организациями стран СНГ, Германии, Австрии, Словакии, Польши, Швеции, Италии, Китая. За многолетнюю историю на факультете подготовлено почти 13000 инженеров и более 800 научных сотрудников для



и принципов. Ряд проблем в общежитии по организации быта и досуга передан студенческому совету. Участвуя в его работе, студенты выступают реальными партнерами администрации общежития, несут ответственность за состояние дел в общежитии, а также реализуют свой потенциал в решении задач жизнеобеспечения студенческой молодежи. Начиная с 2014 г. всем иногородним студентам 1-го курса предоставляется место в общежитии.

Деканат, общественные молодежные организации факультета уделяют большое внимание здоровому образу жизни студентов, организации культурного досуга. На спортивной базе университета студенты факультета занимаются в группах спортивного совершенствования по различным видам спорта. Студентам, проживающим в общежитии, предоставлен тренажерный зал. Сборные команды МТФ по армрестлингу, мини-футболу ежегодно занимают призовые места на спартакиадах вуза. За время учебы студенты имеют возможность воспользоваться бесплатной оздоровительной путевкой в санаторий-профилакторий университета. Ярко и зажигательно проводятся на факультете культурно-массовые мероприятия: «Мисс общежития», «День влюбленных», «Весна БНТУ», выпускается тематическая стенгазета. Все это делает жизнь наших студентов яркой и интересной.



УДК 621.74

Поступила 11.11.2015

ЭКОЛОГИЧНАЯ ХИМИЯ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ SUSTAINABLE CHEMISTRY FOR SUSTAINABLE INDUSTRY

ДЖ. РИЦЦУТО, Ф. БУЧЕЛЛИ, М. ШАККАЛУГА, О. АВАТАНЕО,
Foundry Alfe CHEM s.r.l., Турин, Италия

G. RIZZUTO, F. BUCELLI, M. SCIACCALUGA, O. AVATANEО,
Foundry Alfe CHEM s.r.l., Turin, Italy

Foundry Alfe Chem является промышленной компанией, работающей в области смазочных материалов и химических добавок для производственных процессов. Работа проходит в рамках находящейся на стадии становления программы «зеленой химии», которая приобретает все большее значение. Цель компании – разработка более экологически безопасных продуктов, используя сырьевые материалы из возобновляемых ресурсов. В частности, Foundry Alfe Chem имеет программу самообеспечения, которая предполагает, в обозримом будущем, прямое производство возобновляемого сырья. Компания разработала новую специализированную систему Olitema, целью которой является предложить новые высокотехнологические решения с полной экологической устойчивостью. В связи с этим Foundry Alfe CHEM создала новый продукт, который представляет собой открытие среди гидравлических жидкостей класса HFC: Ecosafe Plus представляет собой пожаробезопасную биоразлагаемую гидравлическую жидкость с прекрасными инженерно-техническими характеристиками, с высокой экологической устойчивостью и с лучшими гарантиями безопасности на рабочих местах. Его формула не содержит гликоль, что обеспечивает более легкую переработку отработанной жидкости по сравнению с традиционными гидравлическими жидкостями HFC на водно-гликолевой основе. Относительно технологических свойств Ecosafe Plus был подвергнут трибологическим испытаниям в аккредитованных лабораториях (4 Ball wear test ASTM D 4172, Ball on disc test ASTM 6425, Brugger test DIN 51347, Vickers test ASTM D 2882) вместе с тестом на совместимость эластомеров (ASTM D 471) и с тестом на биоразлагаемость (OECD 310 F).

Foundry Alfe Chem is an industrial reality working in the field of lubrication and chemical auxiliaries for industrial processes, which falls within the framework of the emerging and increasingly important «green chemistry». The goal of the company is to develop products that are more environmentally friendly by using raw materials from renewable sources; specifically, Foundry Alfe Chem has a program of self-sustainability that contemplates, for the foreseeable future, the direct production of renewable raw materials. The company has developed a new dedicated product line, Olitema, whose purpose is to offer highly technological solutions with complete environmental sustainability. In this context, Foundry Alfe CHEM has created a new product which represents a breakthrough in the class of HFC hydraulic fluids: Ecosafe Plus is a biodegradable fire-resistant hydraulic fluid with high engineering and technological performances, high environmental sustainability and the best security guarantees in workplaces. Its formulation is glycols-free, and it allows for easier disposal of the exhausted fluid, compared to a traditional water/glycol-based HFC hydraulic fluid. For what concern the technological properties, Ecosafe Plus has been tested by accredited laboratories with tribological trials (4 Ball wear test ASTM D 4172, Ball on disc test ASTM 6425, Brugger test DIN 51347, Vickers test ASTM D 2882), with elastomer compatibility test (ASTM D 471) and biodegradability test (OECD 310 F).

Ключевые слова. Гидравлические жидкости класса HFC, биоразлагаемость, процесс смазки, устойчивая переработка, экологическая устойчивость, возобновляемость.

Keywords. HFC hydraulic fluid HFC class, biodegradability, lubrication, sustainable disposal, environmental sustainability, renewability.

Introduction

Foundry Alfe Chem is an industrial reality, working in the field of lubrication and chemical auxiliaries for industrial manufacturing and processes, which falls within the framework of the emerging and increasingly important sector of «green chemistry».

The purpose of the company is to develop more eco-friendly products using raw materials from renewable sources. Foundry Alfe Chem has a self-sustainability program that provides for direct production of renewable raw materials at its own biorefinery.

In this context, the company, with headquarters and research center in Turin and production units in Turin, Milan and Brindisi, has developed a new dedicated product line, Olitema, whose purpose is to offer highly technological solutions with complete environmental sustainability. Foundry Alfe Chem thus offers a portfolio of innovative eco-compatible products, suitable for different types of process and intended for various industrial sectors, in particular foundry and metalworking.

The processing of metals involves hundreds of lubricants and chemical auxiliaries all along the production chain, from manufacturing of the lubricant to its use in metal processing and down to the final user, and even more raw materials. The metal, thus, comes into contact with different substances: if they present a danger, the danger can get to the final consumer.

Moreover, the increasingly more strict legislation imposes the abandonment of some of these hazardous substances, even drafting «black lists» of products the use of which should be avoided. It is therefore crucial that metal processing companies adopt highly performing products under a technological and safety profile.

Within this reality, there is space for a very innovative product that represents the highest expression of Foundry Alfe Chem industrial policies: Ecosafe Plus, a fire-resistant water-based hydraulic fluid, exempt from glycols, biodegradable and eco-friendly, which was awarded as «Product Innovation» during Metef 2014 [1].

Olitema

Foundry Alfe Chem company aims to develop products that are more environmentally friendly by using raw materials from renewable sources; specifically, Foundry Alfe Chem has a program of self-sustainability that contemplates, for the foreseeable future, the direct production of renewable raw materials.

The corporate facilities include a biorefinery where many processes are developed to turn resources into products with the aim to switch from a petrochemical system to a technological choice increasingly based on the use of vegetal products both in terms of raw materials and chemical auxiliaries.

The project's ultimate goal is not only the production of renewable substances, but also the installation and the starting up of an industrial reality highly sustainable for the territory.

Thanks to the availability of 300–500 hectares of arable land, Foundry Alfe Chem realizes a complete cycle of production and processing of agricultural products with their transformation into materials directly usable as lubricants, chemical auxiliaries and industrial coatings or raw materials for the production of small artifacts.

Another purpose of Foundry Alfe Chem is to produce raw materials taking into account the need not to alter the appearance of the landscape, encouraging the tradition and the predisposition of local crops.

Foundry Alfe Chem is pursuing the following targets:

- Creation of a production chain that fully exploits land and aims to a controlled farming with as many as three bi-yearly harvests of non conventional crops – different from those used for the production of vegetal oils or biodiesel – that can be used as raw materials to meet the technological needs of the metalworking industry. Raw materials later undergo a secondary processing to be converted into chemical compounds for the industrial sector or chemical molecules for further processing (chemical-physical or enzymatic transformations, and/or subsequent organic synthesis).

- Reduction of the CO₂ emissions into the atmosphere in order to reach a negative balance between the CO₂ produced and that absorbed via chlorophyll photosynthesis.

- In-house production of electrical and thermal energy by means of photovoltaic panels, endothermic motors fed by biogas, lean gas and cooling water.

- Replacement of oil-based products with products from renewable sources as much as possible.

The biorefinery plant can be subdivided in 7 different lines:

1. Treatment of oilseeds with the production oil.
2. Treatment of green and sugary biomass with the production of sugars and cellulose.
3. Treatment of cattle waste with production of biogas and digested sludge.
4. Treatment of pruning, threshing residues and internal residues with production of syngas and poor gas.
5. Tertiary treatment for the processing of the obtained raw materials with production of lubricating oil, biodiesel, ethanol, bioplastics and other products derived from internal research.
6. Production of electricity and heat from biogas and poor gas.
7. Treatment of syngas to produce hydrogen and methane.

It is also possible to get polylactic acid and its comonomers to produce plastics destined mainly for the packaging industry, and special polyesters, based on the use of hydroxy acids or diols as comonomers, both obtained by fermentation.

Moreover, through anaerobic digestion processes is possible to obtain biogas to fuel engines for the production of electricity and heat, and compost to fertilize the soil.

Negative balance on CO₂ emissions

To complete the design of environmental sustainability, Foundry Alfe Chem has committed itself to reduce its emissions of carbon dioxide in the planning and development of its biorefinery.

Its purpose is the stabilization of concentrations of greenhouse gases in the atmosphere at a level that would prevent anthropogenic interference with the climate system, and the reduction of greenhouse gas emissions.

The involved amount of energy and of carbon dioxide released are described in Table 1:

Table 1. CO₂ Balance

	Produced energy MWh/y	Absorbed energy MWh/y	Biomass ton/y	CO ₂ absorbed for photosynthesis t/y	CO ₂ released t/y
TOTAL	13,775	522	18000	46164	6390

The plant absorbs more carbon dioxide than the emitted quantity, so it is possible to conclude that all the processes of Foundry Alfe Chem biorefinery can be considered sustainable and environmentally acceptable.

To better understand the difference of the impact between the renewable resources and the petrochemical products, we can consider the following ratio, assuming as a comparison a CO₂ emission value of 100 for the petrochemical derivatives:

- Impact of the use of Olitema lubricants: –30
- Impact of the use of traditional lubricants: 100

Also considering the economical side, it is possible to notice that Olitema is absolutely competitive with petrochemical products; assuming as comparison term the cost of petroleum-based products with a value of 1, it is possible to establish the following ratio:

- Cost of Olitema sustainable products: 0,8
- Cost of petroleum-based products: 1

What emerges from these considerations is the evidence that the sustainability is not an additional cost, but it represents a resource to improve both the technological performances and the environmental impact of the industrial processes.

Ecosafe plus

The product that best represents the philosophy and the commitment of Foundry Alfe Chem in the «green chemistry» is Ecosafe Plus, a new product which represents a breakthrough in the class of fire-resistant hydraulic fluids. Ecosafe Plus is a biodegradable and eco-friendly water-based hydraulic fluid (Type HFC and Viscosity Class ISO 46 and ISO 68), completely glycols-free.

Hydraulic systems often operate in difficult industrial processes and environments such as steel plants, molding, plastic deformations, die casting, handling of large products and foundries, in the presence of hot surfaces, molten metal or naked flames. In case of breakage of hydraulic circuits, the escape of high-pressure hydraulic fluid is a potential risk for fire and environmental contamination. Precisely for these severe applications, Foundry Alfe Chem has developed Ecosafe Plus; Ecosafe Plus is particularly suitable to be used in hydraulic circuits located near sources of heat, thanks to its complete non-flammability and security guarantees in case of fire.

Ecosafe Plus confirms the commitment of Foundry Alfe Chem in developing lubricants and auxiliary chemicals with high engineering and technological performances, high environmental sustainability and the best security guarantees in workplaces.

The formulation of this innovative product is based on a mixture of polymers and biopolymers and unlike conventional HFC hydraulic fluids, it is free from glycols (monoethylenic, diethylenic and others). This composition gives particular technological characteristics to the product and compared to traditional water/glycol based HFC hydraulic fluids allows greater ease of waste fluid disposal and higher environmental safety.

In addition, Ecosafe Plus has been subjected to various tests, carried out by accredited laboratories in order to evaluate and confirm its excellent performances combined with high environmental sustainability: fire-resistance, excellent performances during laboratory tests and during operation, high lubrication and resistance, high biodegradability, environmentally sustainable disposal, compatibility with elastomers.

Moreover, according to Italian and international regulations the product is not subject to any labeling [2], and the strict rules concerning transport by sea and the resulting restrictions for hydraulic fluids do not concern Ecosafe Plus [3].

Lubricating performance

Ecosafe Plus has been tested by accredited laboratories, and has been compared with a traditional water/glycol product, in order to evaluate its lubricant characteristics.

The first test was performed with «Vickers pump» (test from ASTM D 2882 regulation [4]), where Ecosafe Plus wear-resistance was compared with that of a market leader water/glycol security hydraulic fluid. The test lasted 600 hours, after which Ecosafe Plus showed vanes, rotor and stator wearing equal to 25% of that measured after the same operating period for traditional products currently on the market and containing glycols.

Therefore, Ecosafe Plus has lubricating and wear-resistant performances that are four times higher than glycol-based products that have been on the market for years. The conditions under which Vickers test was carried out and the results of the test are summarized in tables 2 and 3.

Table 2. Operating conditions of Vickers test

Test Conditions	
Test Length, (hours)	600
Discharge Pressure, (psi)	2000
Inlet Fluid Temperature, (°C)	65
Pump Speed, (rpm)	1200
Outlet Volume, (GPM)	7,5

Table 3. Vickers test results about Ecosafe Plus compared with a market leader water/glycol-based hydraulic fluid

TEST RESULTS Weight loss (g)				
	Rotor	Vanes	Stator	Total weight loss (g)
Traditional Fluid	0,402	0,045	4,159	4,606
Ecosafe Plus	0,050	0,104	1,523	1,677

Moreover, «Vane on flat» test was conducted on Ecosafe Plus, comparing it with a HFDU fluid of reference: the product completed the 8h of testing without any noticeable failure; the friction and temperature were lower than the HFDU fluid of reference. The surface damage was slightly better than the reference, and the mass loss of the disc was less pronounced with Ecosafe Plus compared to the HFDU fluid (Fig. 1).

Surface damage can also be noticed considering the roughness variation in vanes and disc (Ra surface parameter); the Ra surface parameter indicated that with Ecosafe Plus contacting surfaces are must polish compared to a HFDU fluid of reference, since Ra parameter decreased in all the cases (vanes and disc).

High lubricant performances also result in lower heat production due to wear and friction phenomena, therefore, Ecosafe Plus operating temperatures are more constant and tend to be lower than those of traditional products. Always in relation with what has been previously said, water evaporation is less noticeable and therefore, the value of product viscosity is more constant.

This results in even greater stability of the pH value, with less need of continuous and periodic analytical controls and refilling of water to compensate the evaporation phenomenon.

Brugger test confirms high lubricity

Ecosafe Plus was tested also by Brugger test (DIN 51347 regulation [5]), in which it has clearly shown higher performance than the traditional product.

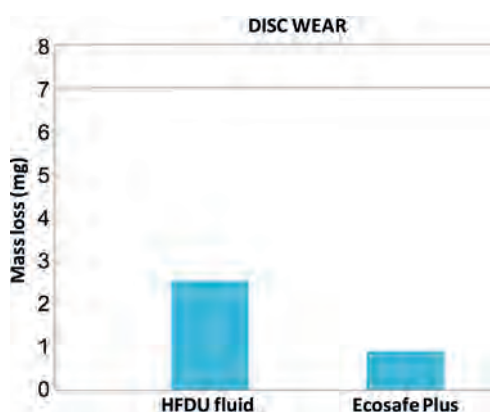


Figure 1. Mass loss of Ecosafe Plus compared to HFDU fluid after 8h of Vane Pump Test

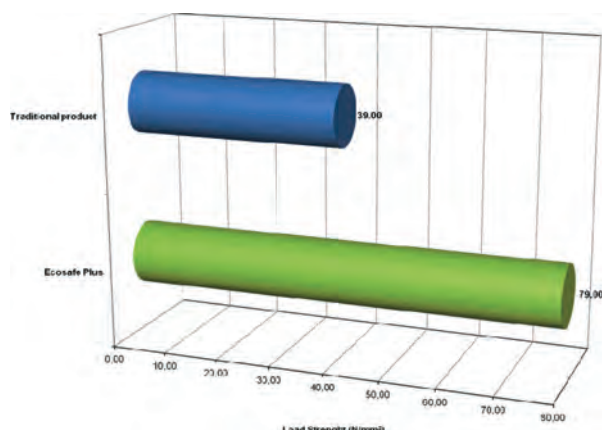


Figure 2. Brugger Test; Ecosafe Plus compared with a conventional market leader water/glycol-based hydraulic fluid

For what concern Ecosafe Plus, the test showed a load resistance equal to 79 N/mm², double than traditional hydraulic fluid of reference (39 N/mm²) (Fig. 2).

Tribological tests carried out on the product confirm its physical and chemical stability during long operating applications and its high lubricity.

Ecosafe Plus has high resistance to chemical alterations and great reduction of deposits formation. This feature allows using Ecosafe Plus for a long time, as long as external contaminations are removed with an efficient filtration system.

Ecosafe Plus has chemical and physical characteristics that are highly constant during exercise (% H₂O, viscosity, pH, etc.), thanks to its excellent lubricity and high stability of the raw materials of its composition (Table 4).

Table 4. Physical/chemical properties of Ecosafe Plus

Appearance:	clear liquid
Color:	red
Odor:	typical
pH:	8,5–9
Relative density (20 °C, g/ml):	1,05–1,10
Viscosity (40 °C, cSt):	41,0–50,6
Solubility:	water soluble
Flash point (°C):	none
Pour point (°C):	–20
Cloud point (°C):	≥70
Working temperature (°C):	40–70
Working pressure (bar):	up to 250 and more
Filtration system (μm):	5–10 min

Fire resistance and FM Approval

Ecosafe Plus has also been tested with flammability trials, in order to evaluate its fire resistance properties and thus its safety during operation. Ecosafe Plus meets the requirements and therefore passes the following tests:

- Wick Test (ISO 14935): it measure the fire resistance of fluid when soaked into absorbent or flammable materials and the extent to which the fluids will propagate fire [6].
- Hot Manifold Test (ISO 20823): it reproduces a loss of fluid at low pressure on a surface at 700 °C [7].
- Spray Ignition test (ISO 15029): the fluid mist is sprayed on an oxy-acetylene flame [8].

As a further confirmation of its fire-resistance properties, Ecosafe Plus has been certified by the american FM Global, which in turn conducted several tests of resistance to fire [9].

The registration number of the certification (FM Approval Class 6930) is: 3052383.

Complete compatibility with elastomers

A particular request that results from the needs of hydraulic oils users and that traditional HFC fluids often don't meet is compatibility with elastomers and seals that are generally used in hydraulic systems. This is the reason why Ecosafe Plus has been tested by accredited external laboratories about elastomers that are commonly



Figure 3. Ecosafe Plus is compatible with elastomers and seals that are generally used in hydraulic systems

used in «O rings», testing in accordance with ASTM D 471 regulation of compatibility with polymers (immersion in fluid for 166 h at 80 °C) [10]. The test had an extremely positive outcome: Ecosafe Plus was compatible with red and white Silicon, Viton, Teflon, EPDM, polyurethane and NBR. These conditions are due to the absence of glycol in the product formulation (Fig. 3).

High biodegradability reduces disposal costs

An important benefit from Ecosafe Plus innovative formulation is its high biodegradability.

The product has passed severe tests and was approved to be biodegradable ($\geq 70\%$ biodegradation after 28 days) according to OECD 310 F regulation [11], unlike water/glycol hydraulic fluids of normal use ($\leq 40\%$ biodegradation after 28 days). Biodegradability provides high environmental and work safety to the product, thanks to more environmental compatibility in every stage of the process (Fig. 4).

During the test, the product is not subject to any modification of its chemical-physical characteristics

nor to biological alterations, for which biodegradability does not affect Ecosafe Plus technical properties (Table 4).

Besides, the disposal of the exhausted product at its end life will prove to be easier and cheaper than the traditional hydraulic fluids, being possible to lean to a plant for the biological treatment plant of waste water or similar disposal systems.

Ecosafe Plus is not classified as dangerous and eliminates the costs and the disposal procedures as special waste.

In addition, dispersion or accidental spill of this product in areas that are sensitive to environmental pollution are easier to be cleaned-up and have lower reclamation costs.

Another very important point in favor of Ecosafe Plus is represented by its great ability to separate pollutants such as hydraulic oils, greases, various auxiliary chemicals, release agents and other products that can accumulate in the hydraulic fluid during operating conditions. This is mainly because Ecosafe Plus is glycols-free. This peculiarity enables an easier regeneration of Ecosafe Plus after a certain running time.

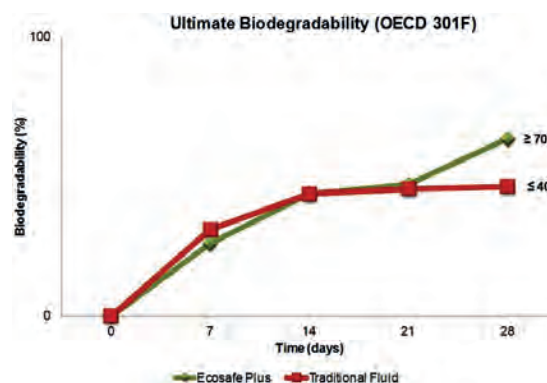


Figure 4. Biodegradability of Ecosafe Plus compared with a market leader water/glycol-based hydraulic fluid

Industrial tests confirm the advantages of Ecosafe Plus

In the light of what has been seen so far, it is possible to conclude that Ecosafe Plus meets the requirements of the main pump and system components manufacturers, as well as end users of the product.

Its performances are confirmed by the industrial tests on high-pressure aluminium injection presses, hydraulic controls for furnaces, continuous casting of steel and aluminium. In particular, we are mentioning the case study about an industrial test carried out between February 2013 and February 2014, at one of the major die-casting plants of Northern Italy.

The test compared the operating and disposal costs between the use of a traditional water/glycol-based product and the use of Ecosafe Plus.

The result of this study is that Ecosafe Plus does not require any pretreatment before being sent to a biological disposal plant, even if it is possible to use a concentrator, thanks to low COD value of exhausted product ($< 500 \text{ mg O}_2/\text{l}$) and because, according to CER classification, it is not considered as hazardous waste; in addition, the evaporated product resulting from a possible distiller can be readily reused. Traditional water/glycol hydraulic fluid, instead, must be disposed as hazardous waste according to CER classification, after pre-treatment with a concentrator, and the resulting evaporated product is not readily available for new use.

As a result, cost and management difficulties are definitely higher than those of Ecosafe Plus.

The selected raw materials, the high biodegradability and the non-toxic nature of Ecosafe Plus make this product an excellent choice to combine the best technical performance with a sustainable vision for the environment. In particular, its excellent results in tribological tests and its compatibility with the most commonly used elastomers, combined with its biodegradability, make this product a true technological innovation.

Conclusions

An R&D activity focused on the utmost integration of raw materials derived from renewable sources has led Foundry Alfe Chem to the creation of lubricants and chemical auxiliaries for the processing of metals, ensuring excellent conditions of hygiene and safety in the workplace, as well as the protection and respect for the environment. These innovative products will allow users to remarkably optimize the production both in terms of technological performance and of reduced consumption, without compromising sustainability.

In conclusion, we can say that although the current market and economic conditions in general are not positive, this should not divert the industry from the objectives of research and development for innovation in both products and processes. We are therefore convinced that, also and especially with a proper research and application of new technologies, it is possible to resume the path of economic growth in a context of proven compatibility and environmental sustainability.

References

1. <http://www.metef.com/ENG/home.asp>.
2. Regulation (CE) N. 1272/2008, Regulation (CE) N. 1907/2006.
3. Vessel General Permit (VGP), 2013.
4. ASTM D2882, 2000, «Standard Test Method for Indicating the Wear Characteristics of Petroleum and Non-Petroleum Hydraulic Fluids in Constant Volume Vane Pump (Withdrawn 2003)», ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000, DOI: 10.1520/D2882-00, www.astm.org.
5. DIN 51347, 2000, «Testing of lubricants – Testing under boundary lubricating conditions with the Brugger lubricant tester», Deutsches Institut Fur Normung E. V. (German National Standard), 2000.
6. ISO 14935:1998, «Petroleum and related products – Determination of wick flame persistence of fire-resistant fluids», 1998.
7. ISO 20823:2003, «Petroleum and related products – Determination of the flammability characteristics of fluids in contact with hot surfaces – Manifold ignition test», 2003.
8. ISO 15029-1:1999 «Petroleum and related products – Determination of spray ignition characteristics of fire-resistant fluids – Part 1: Spray flame persistence – Hollow-cone nozzle method», 1999.
9. <http://www.fmglobal.com/page.aspx?id=50000000>.
10. ASTM Standard D471, 2012a, «Standard Test Method for Rubber Property – Effect of Liquids», ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, DOI: 10.1520/D0471-12A, www.astm.org.
11. OECD 301 F, 1992, «OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3 Degradation and Accumulation», OECD, 1992, DOI: 10.1787/9789264070349-en, www.astm.org.

Сведения об авторах

Джанни Риццито, управляющий директор, Foundry Alfe Chem s. r. l., корсо Брэшиа, 77, 10155, г. Турин, Италия, <http://www.foundrychem.it/home/>, info@foundrychem.it, + 39 011.2478204.

Фьоренцо Бучелли, управляющий директор, Foundry Alfe Chem s. r. l., корсо Брэшиа, 77, 10155, г. Турин, Италия.

Марко Шаккалуга, директор R&D, Foundry Alfe Chem s. r. l., корсо Брэшиа, 77, 10155, г. Турин, Италия.

Оттавия Аватанео, ассистент R&D, Foundry Alfe Chem s. r. l., корсо Брэшиа, 77, 10155, г. Турин, Италия.

Information about the authors

Gianni Rizzuto, Managing Director, Foundry Alfe CHEM s. r. l., C. so Brescia 77, 10155, Turin, Italy, <http://www.foundrychem.it/home/>, info@foundrychem.it, + 39 011.2478204.

Fiorenzo Bucelli, Managing Director, Foundry Alfe CHEM s. r. l., C. so Brescia 77, 10155, Turin, Italy.

Marco Sciacaluga, R&D Director, Foundry Alfe CHEM s. r. l., C. so Brescia 77, 10155, Turin, Italy.

Ottavia Avataneo, R&D Assistant, Foundry Alfe CHEM s. r. l., C. so Brescia 77, 10155, Turin, Italy.



УДК 621.746

Поступила 18.11.2015

КОНСТРУКЦИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА ДЛЯ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ЧУГУНА CRYSTALLIZER DESIGN FOR SEMI-CONTINUOUS MOLDING OF CAST IRON UNITS

*А. Н. КРУТИЛИН, П. Е. ЛУЩИК, А. А. АНДРИЦ, Л. П. ДОЛГИЙ,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь*

*A. N. KRUTILIN, P. E. LUSHCHIK, A. A. ANDRITS, L. P. DOLGIJ,
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

Рассмотрены основные технологические параметры, оказывающие влияние на коробление кристаллизатора при полунепрерывном литье чугуна. Проведен анализ конструктивных особенностей кристаллизатора на его коробление. На основании теоретического анализа в системе моделирования ProCast определена оптимальная конфигурация рабочей гильзы кристаллизатора.

The key technological parameters having impact on a crystallizer contraction at semi-continuous molding of cast iron are considered. The analysis of design particularities of a crystallizer on its contraction is carried out. On the basis of the theoretical analysis in ProCast system of modeling the optimum configuration of a working liner of a crystallizer is defined.

Ключевые слова. Непрерывное литье, формирование отливки, кристаллизатор, коробление.

Keywords. Continuous molding, casting formation, crystallizer, contraction.

При фундаментальном подходе к процессу формирования литой заготовки при непрерывном литье требуется анализ всего комплекса происходящих в ней термодинамических, гидродинамических, диффузионных и тепловых явлений, а также процессов, оказывающих влияние на изменение геометрии рабочей поверхности кристаллизатора, особенно в зоне формирования начальной корки.

Кристаллизатор является основным технологическим узлом установки непрерывного литья, в котором происходит формирование отливки, его конструкция в значительной мере определяет стабильность процесса, качество получаемых заготовок и технико-экономическую эффективность применения технологического процесса.

Одним из наиболее важных условий совершенствования конструкции кристаллизаторов является понимание происходящих в нем процессов. Основные требования к кристаллизатору – обеспечить максимальный отвод тепла от затвердевающей заготовки и получить на выходе из кристаллизатора достаточную толщину корки, которая позволит вести процесс с максимально допустимой скоростью литья. Естественно, что производительность установки и качество заготовки во многом определяется тем, насколько кристаллизатор удовлетворяет всем технологическим требованиям.

Проведенный ранее анализ доминирующих факторов, оказывающих влияние на стабильность процесса, показал, что основную роль в процессе формирования оказывают температурные условия, а влияние напряжений, возникающих от действия ферростатического давления и трения отливки о стенки кристаллизатора, носит второстепенный характер.

На начальной стадии формирования корки при непосредственном контакте жидкого металла и водоохлаждаемой стенки кристаллизатора интенсивность теплообмена между отливкой и кристаллизатором максимальная. Экспериментальные исследования показывают, что плотного контакта между поверхностью заготовки и стенками кристаллизатора не существует. Периодический контакт затвердевающей отливки со стенками кристаллизатора как по высоте, так и периметру заготовки ведет к образованию неравномерного фронта затвердевания, происходит искажение геометрии отливки.

При дальнейшем движении слитка в кристаллизаторе между корочкой и стенками кристаллизатора происходит образование газового зазора, возрастает термическое сопротивление, интенсивность теплообмена падает. Характер изменения газового зазора оказывает влияние как на температурное поле по сечению заготовки, так и на развитие усадочных процессов, что ведет к образованию значительных напряжений и возникновению деформации в затвердевающей отливке, которые увеличивают вероятность образования дефектов типа зависаний, искажения геометрии отливки и т. д.

На образование разнотолщинности непрерывнолитой заготовки оказывают влияние неравномерная подача металла по периметру заготовки, а также динамическое воздействие падающей струи расплава на затвердевающую корку. С повышением температуры перегрева расплава и скорости истечения струи неравномерность фронта затвердевания возрастает.

Изменение размеров отливки происходит не только при охлаждении, но и в результате силового взаимодействия отливки и кристаллизатора. Величина газового зазора между отливкой и кристаллизатором зависит от технологических параметров литья и конструктивных особенностей кристаллизатора.

При непрерывной разливке стали используются кристаллизаторы с уменьшением размеров по направлению движения слитка, что обусловлено желанием компенсировать усадку сплава с целью увеличения интенсивности теплообмена между отливкой и кристаллизатором.

Широкое использование графита на установках вертикального полунепрерывного литья сдерживается его высокой стоимостью и повышенным износом. Применение кристаллизаторов с металлическими рабочими втулками позволило значительно увеличить срок службы кристаллизаторов. Общеизвестно, что лучшим материалом, удовлетворяющим условиям работы кристаллизатора, является медь. Однако эксперименты, проведенные в лабораторных условиях, показали, что материал кристаллизатора не оказывает заметного влияния на скорость затвердевания металла в кристаллизаторе. Интенсивность охлаждения, а, следовательно, и скорость кристаллизации зависит от теплопроводности материала только в начальный момент при непосредственном контакте расплавленного металла с рабочей поверхностью кристаллизатора. Продолжительность этого контакта незначительна из-за усадочных процессов, происходящих в затвердевающей отливке. Высокое термическое сопротивление газового зазора между отливкой и кристаллизатором значительно снижает влияние материала рабочей втулки кристаллизатора на скорость кристаллизации.

При вертикальном полунепрерывном литье чугуна сборные кристаллизаторы со стальными рабочими втулками выдерживают до заметного коробления 250–300 заливок, т. е. почти в 1,5 раза меньше, чем с медными. Изменение качества отливки при переходе с медной втулки на стальную в процессе эксплуатации на промышленных установках не обнаружено. С экономической точки зрения все это дает основание рекомендовать для промышленного использования, особенно при получении цилиндрических заготовок, кристаллизаторы сборной конструкции с рабочими втулками из малоуглеродистой стали.

Наряду с материалом рабочей втулки на стойкость кристаллизатора и интенсивность охлаждения оказывает система водяного охлаждения. Конструкция кристаллизатора должна обеспечивать равномерное охлаждение рабочей втулки кристаллизатора по периметру. Интенсивность теплообмена определяется расходом воды и величиной проходного сечения между кожухом кристаллизатора и рабочей втулкой. Экспериментальные исследования показали, что скорость протекания воды, обеспечивающая пузырьковый режим кипения, для кристаллизатора диаметром 100 мм достигается при величине зазора 3 мм и расходе воды 4,5 л/с. С увеличением диаметра кристаллизатора расход воды должен быть увеличен. Температура воды на выходе из кристаллизатора не должна превышать 40–50 °С. Нарушение геометрической формы рабочей поверхности кристаллизатора в процессе эксплуатации способствует возникновению «зависаний корки».

В зоне формирования начальной корки коробление втулки максимальное. Градиент температуры по толщине рабочей втулки в этой зоне на участке длиной ~100 мм достигает максимума (на 50–100 °С выше, чем в других зонах кристаллизатора), соответственно и термические напряжения в этой зоне больше. По мере движения затвердевающей заготовки в кристаллизаторе градиент температуры по толщине втулки падает. Для предотвращения образования поверхностных дефектов в зоне «зависаний», а также возможного заклинивания чугунной заготовки гильза кристаллизатора должна иметь увеличение внутреннего диаметра в сторону движения слитка.

Кроме того, необходимо учесть, что в чугунах в процессе затвердевания наряду с усадкой происходит предкристаллизационное или так называемое предусадочное расширение, которое связывают с выделением свободного графита из расплава (~0,25%).

Проведена серия экспериментов по выбору оптимальной величины конусности рабочей втулки кристаллизатора. Опробованы кристаллизаторы диаметром 100 мм с разницей по диаметру между верхом и низом в 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, и 1,0 мм при высоте кристаллизатора 200 мм. Наилучшие результаты получены на кристаллизаторах с $\Delta d = 0,6$ мм. Величину $\Delta d = 0,8$ мм следует считать предельной, так как дальнейшее увеличение размера привело к значительному увеличению количества прорывов металла на выходе из кристаллизатора.

Результаты проведенных исследований были положены в основу конструирования кристаллизатора для промышленной установки. В ходе предварительных экспериментов были испытаны кристаллизаторы сварной и сборной конструкции. Вынужденная односторонняя подача расплавленного металла приводит к более быстрому выходу из строя кристаллизатора сварной конструкции по причине коробления. Если для отливок диаметром 100 мм стойкость сварного кристаллизатора до расточки составляет 200–250 заливок, то односторонний подвод металла сокращает этот период до 120–150 заливок, что недостаточно для условий промышленной эксплуатации. Сложность механической обработки, сравнительно низкая стойкость, а также ограниченность использования различных цветных металлов и сплавов в качестве материала для рабочей втулки кристаллизатора привели к необходимости разработки кристаллизатора сборной конструкции.

Кристаллизатор сборной конструкции представляет собой достаточно жесткую металлоконструкцию, воспринимающую основные механические нагрузки, он состоит из рабочей втулки, охлаждающего кожуха с коллектором и патрубками для равномерного подвода воды, крепежных фланцев. Кристаллизатор комбинированного типа позволил провести большой объем экспериментальных работ по определению оптимальных технологических параметров процесса.

Постоянный контроль за характером коробления рабочей втулки кристаллизатора позволил установить зоны, в которых вытягиваемый слиток отрывается от стенок кристаллизатора, и где наиболее плотный контакт. Описанная картина тепловой работы кристаллизатора достаточно точно отражает особенности технологического процесса.

Из опыта работы на установке полунепрерывного литья установлено, что деформированный профиль кристаллизатора имеет характерную бочкообразную форму с сужением в зоне формирования начальной корки.

Для того чтобы уменьшить коробление кристаллизатора в зоне формирования начальной корки, опробованы два варианта конструкции втулки: с поперечными ребрами жесткости и выступающими бобышками. На рис. 1, 2 приведены трехмерные изображения анализируемых вариантов.

Математическое моделирование в системе ProCast при одинаковых технологических параметрах литья в медный кристаллизатор позволило теоретически определить распределения температур в отливке при использовании различных конструкций кристаллизатора (рис. 3, 4) и твердой фазы в отливке (рис. 5).

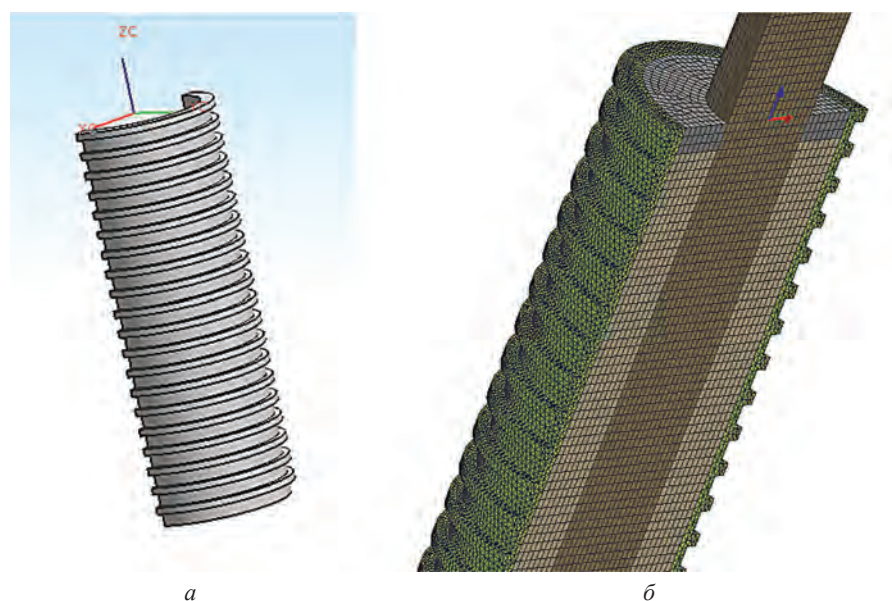


Рис. 1. Трехмерная модель кристаллизатора с ребрами (а) и конечно-элементная модель системы «отливка-кристаллизатор-стержень» (б)

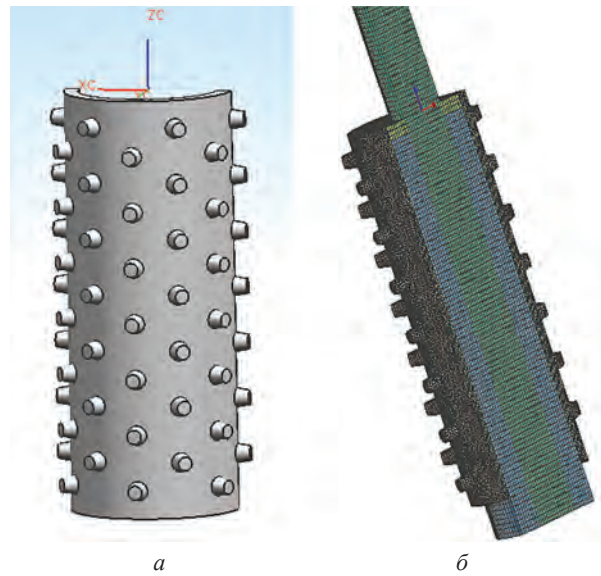


Рис. 2. Трехмерная модель кристаллизатора с бобышками (а) и конечно-элементная модель системы «отливка-кристаллизатор-стержень» (б)

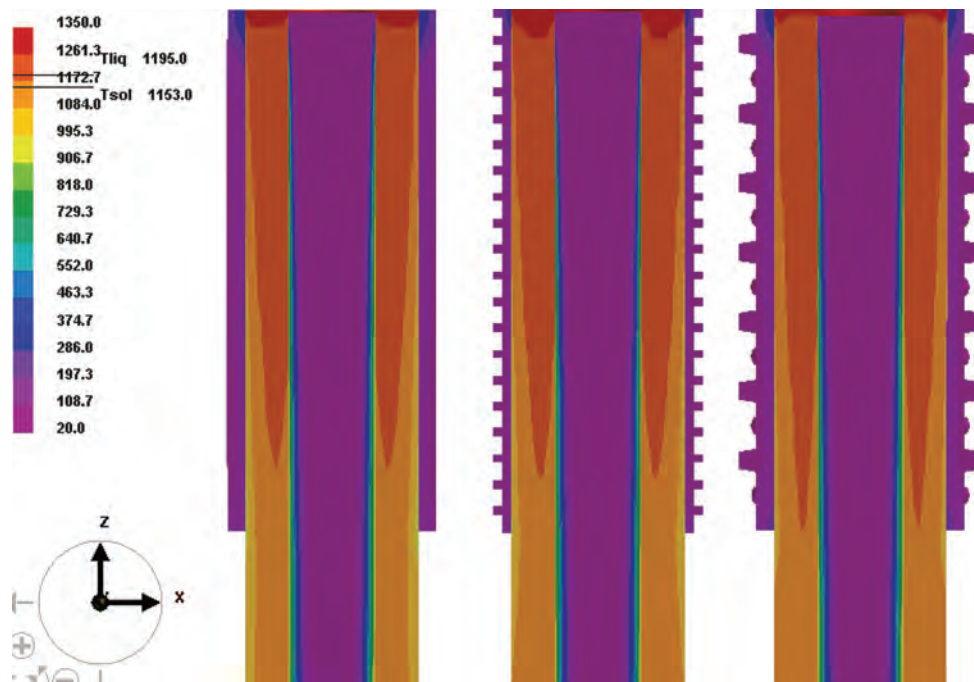


Рис. 3. Распределение температур в отливке при использовании различных конструкций кристаллизатора

Анализ представленных результатов свидетельствует о том, что независимо от изменения конфигурации наружной поверхности рабочей втулки кинетика кристаллизации и распределение температур по высоте отливки практически остаются неизменными. Данный факт подтверждается экспериментальными исследованиями. Факторами, которые оказывают большое влияние на коробление кристаллизатора, являются конструктивные особенности кристаллизатора, в первую очередь это относится к креплению медной рабочей втулки в стальном кожухе кристаллизатора. В процессе экспериментальных исследований опробованы два варианта крепления: жесткое защемление только верхней части рабочей втулки и жесткое двухстороннее защемление. На рис. 6 приведены расчетные данные эффективных напряжений в плоском кристаллизаторе, кристаллизаторе с поперечными ребрами и бобышками при двухстороннем защемлении. Характерной особенностью конфигурации рабочей втулки кристаллизатора в верхней части является бочкообразная форма и расширяющаяся юбка в нижней части втулки ниже места защемления. Деформации кристаллизатора при закреплении в верхней и нижней части приведены на рис. 7.

Наименьшие напряжения и минимальные деформации имеют место при двухстороннем защемлении у кристаллизатора с рабочей втулкой, выполненной с поперечными ребрами.

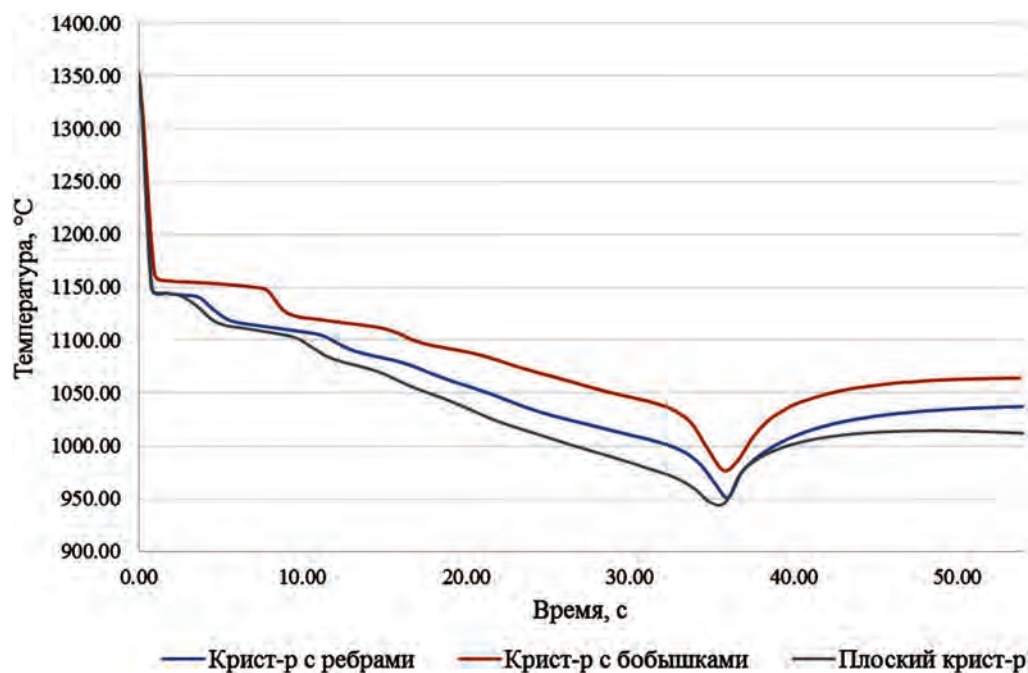


Рис. 4. Изменение температур на поверхности отливки при использовании различных конструкций кристаллизатора

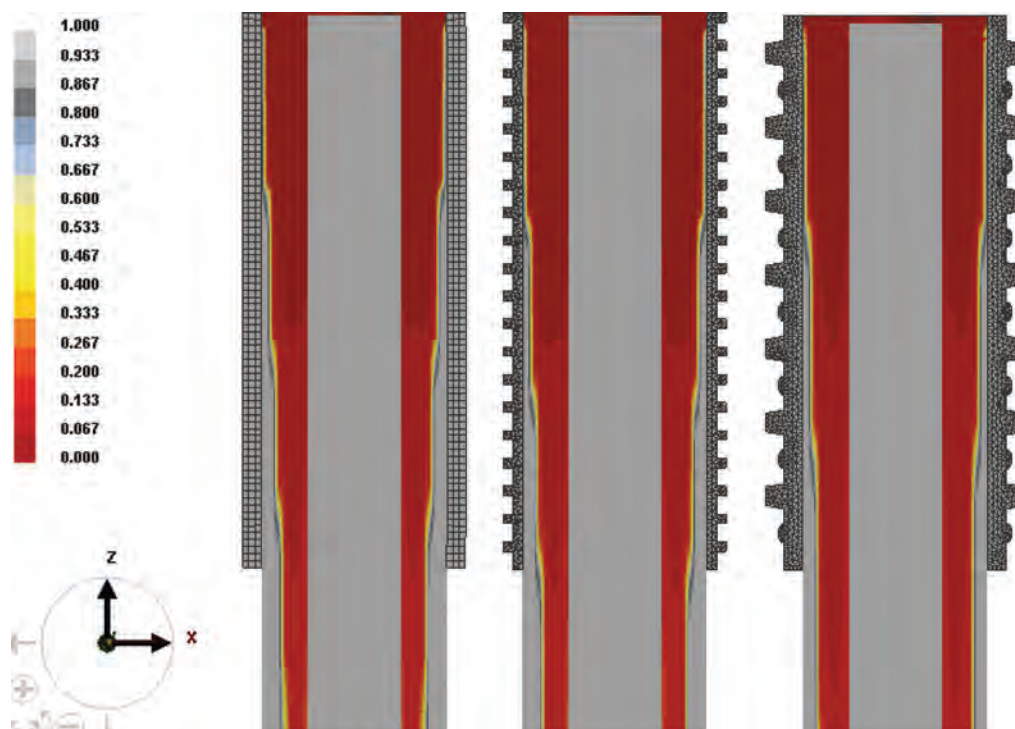


Рис. 5. Распределение твердой фазы в отливке при использовании различных конструкций кристаллизатора

На рис. 8 представлены расчетные данные относительной стойкости рабочей втулки кристаллизатора с защемлением в верхней и нижней части. Относительная стойкость рабочей втулки с поперечными ребрами выше, чем при литье в кристаллизатор без ребер и кристаллизатор с бобышками.

Аналогичные расчеты (рис. 9–15) проведены и для случая одностороннего защемления в верхней части рабочей втулки кристаллизатора. Однозначно можно утверждать, что использование только верхнего крепления позволяет существенно уменьшить процесс коробления рабочей втулки. Изменение температур на поверхности отливки и величины зазора между отливкой и кристаллизатором для трех вариантов исполнения рабочей втулки практически идентично. Возникающие напряжения и связанные с ними деформации значительно уменьшаются. Относительная стойкость кристаллизатора с верхним защемлением и поперечным оребрением существенно выше, чем в случае двухстороннего защемления.

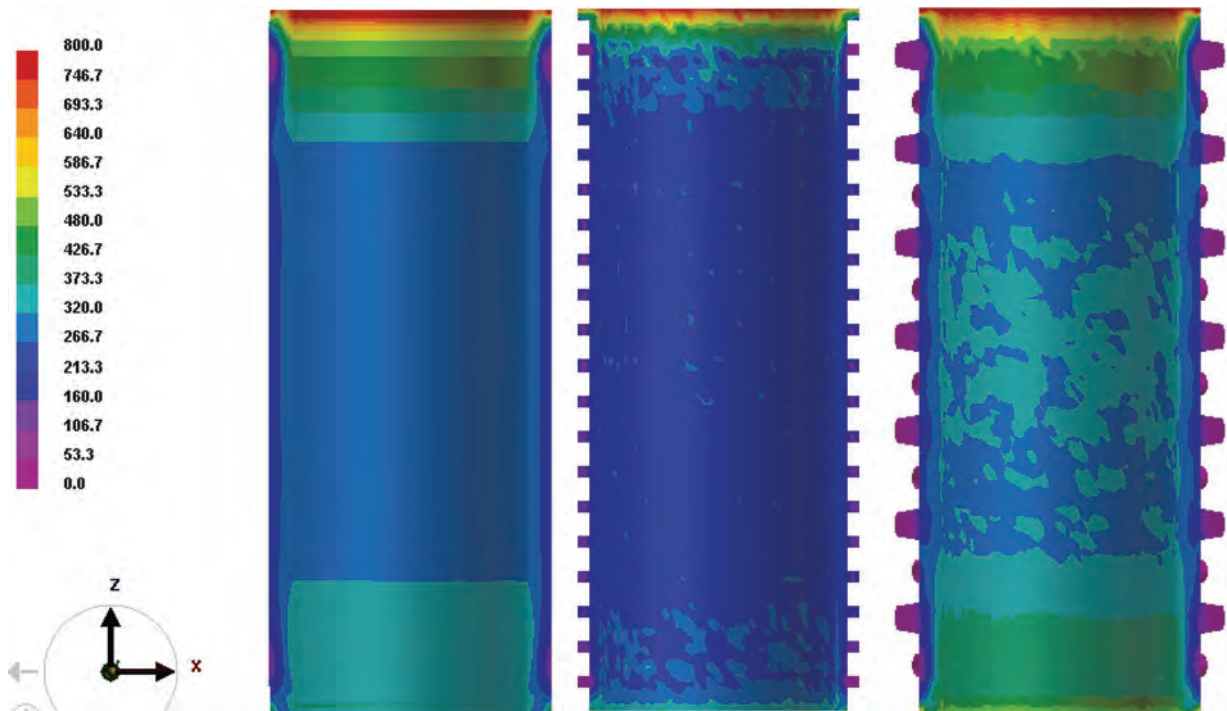


Рис. 6. Эффективные напряжения в кристаллизаторе в зависимости от конструкции при закреплении в верхней и нижней части. $\times 50$

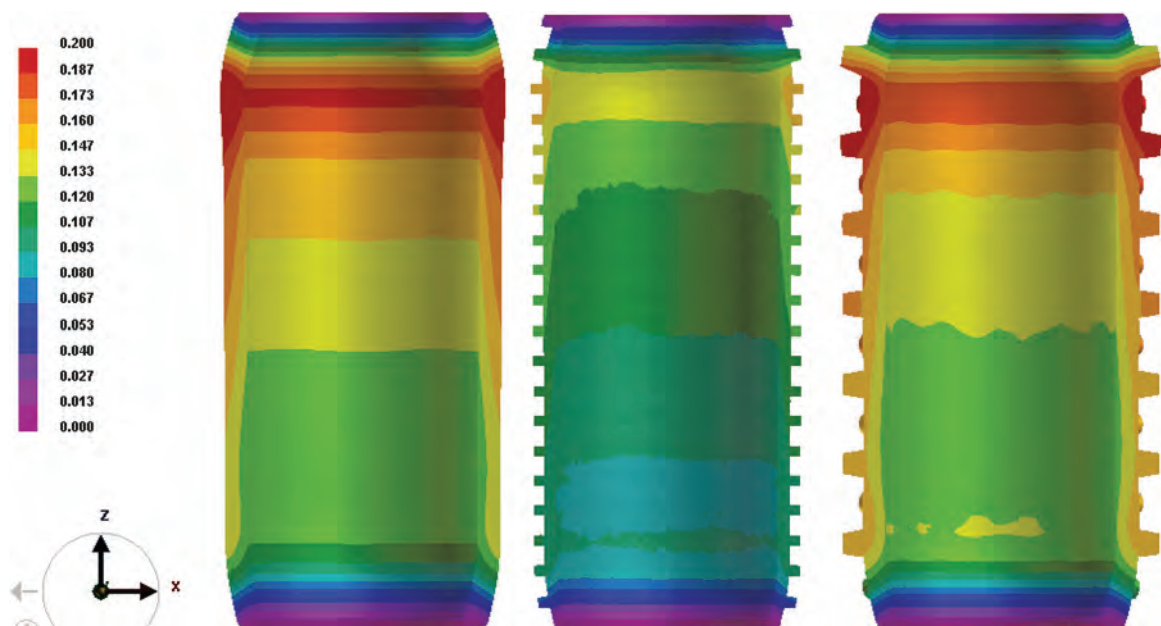


Рис. 7. Деформации кристаллизатора в зависимости от конструкции при закреплении в верхней и нижней части. $\times 50$

Коробление медной втулки кристаллизатора в процессе эксплуатации подтверждает теоретические положения о зонах взаимодействия отливки и стенок кристаллизатора во время разливки.

Уменьшение газового зазора между отливкой и кристаллизатором положительно сказывается на скорости извлечения заготовки и, несмотря на то что в пределах кристаллизатора отводится до 30% тепло-содержания жидкого расплава, стабильность процесса литья должна возрастать. Однако минимизация этого зазора ведет к увеличению силы трения, что может стать причиной нарушения стабильности процесса.

Практика показывает, что скорость коробления рабочей втулки со временем уменьшается по мере приближения рабочей поверхности к определенной форме.

Изучение процесса получения заготовок прямоугольного сечения показывает, что характер деформации в сравнении с цилиндрическими заготовками практически не изменяется, однако проблема состоит

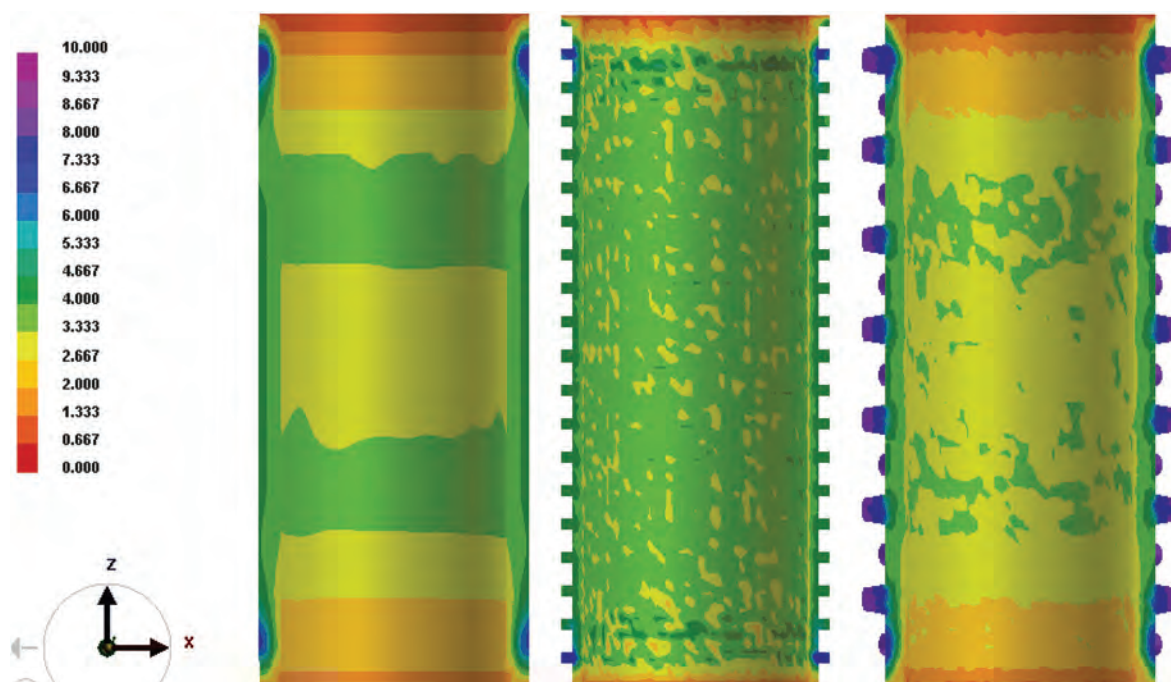


Рис. 8. Относительная стойкость кристаллизатора в зависимости от конструкции при закреплении в верхней и нижней части

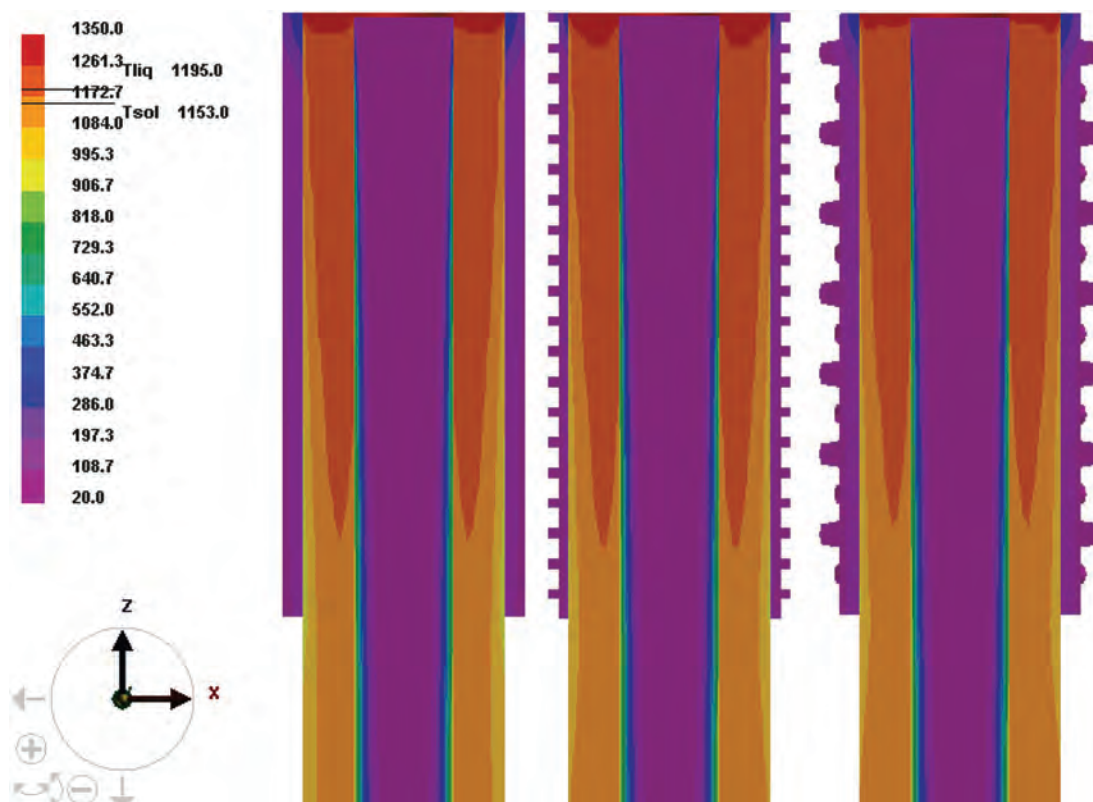


Рис. 9. Распределение температур в отливке при использовании различных конструкций кристаллизатора

в увеличении скорости затвердевания и охлаждения затвердевающей заготовки в углах. При литье заготовок из чугуна с низким углеродным эквивалентом в углах заготовок появляется цементит, что вызывает необходимость в проведении высокотемпературного отжига.

Для обеспечения равномерного затвердевания заготовки и снижения интенсивности охлаждения в углах возможно нанесение на определенную высоту специальных рисок на поверхности кристаллизатора. Их глубина и размеры могут по-разному влиять на формирование начальной корки затвердевающего металла. С одной стороны, если металл не затекает в эти риски, происходит уменьшение интенсив-

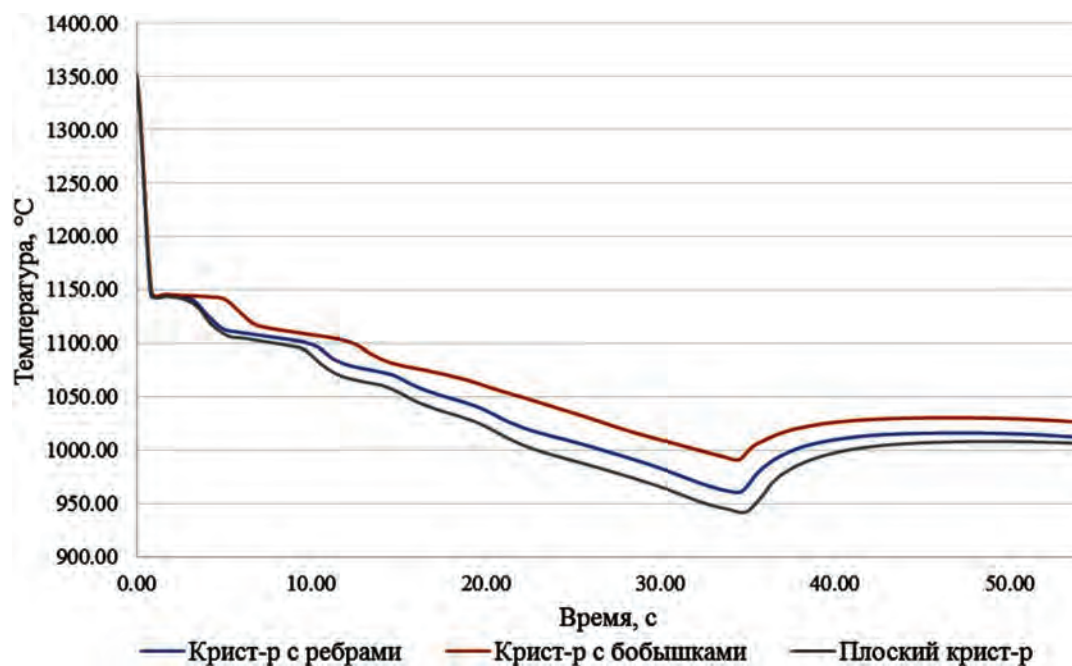


Рис. 10. Изменение температур на поверхности отливки при использовании различных конструкций кристаллизатора

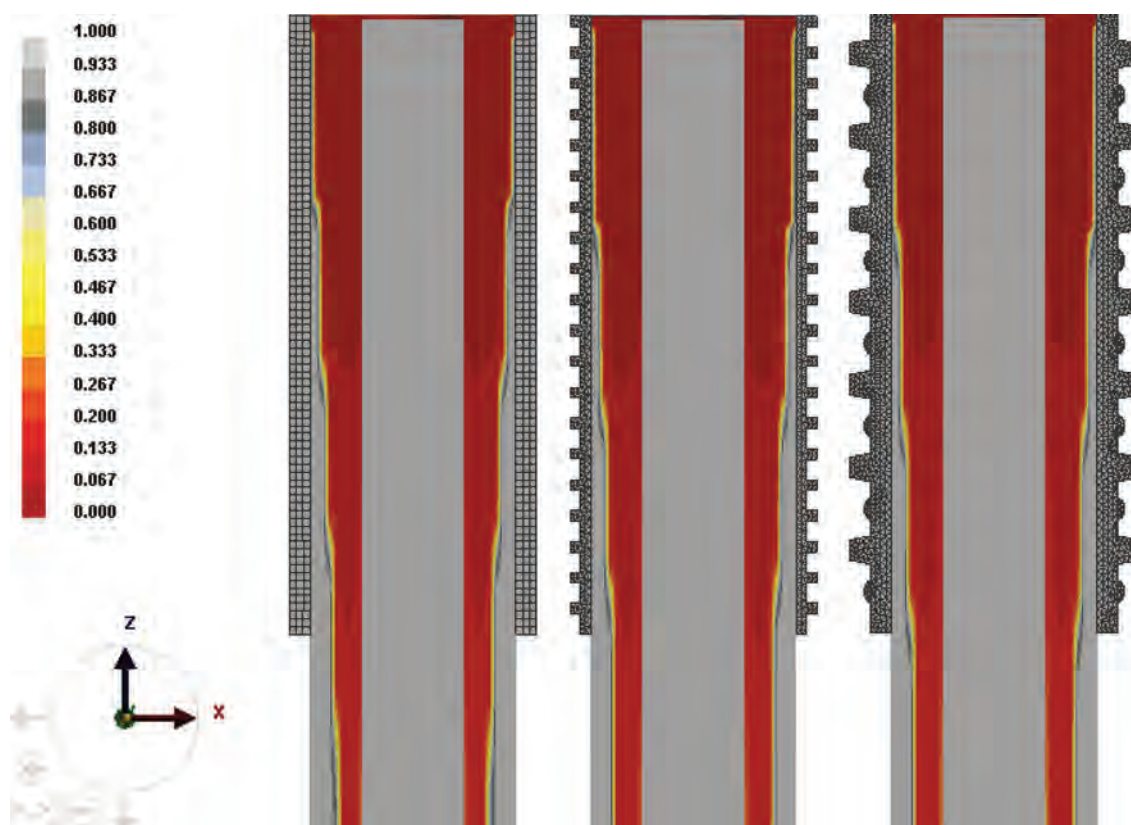


Рис. 11. Распределение твердой фазы в отливке при использовании различных конструкций кристаллизатора

ности теплообмена, что оказывает негативное влияние на производительность процесса, но способствует получению качественной поверхности. В случае если происходит заполнение рисок металлом, скорость затвердевания по периметру заготовки выравнивается, практически исключается образование такого дефекта, как разнотолщинность.

Таким образом, наиболее эффективными являются меры, приводящие к оптимизации теплового и напряженно-деформированного состояния формирующейся оболочки слитка в кристаллизаторе. Учитывая, что кристаллизатор должен в течение длительного времени работать с сохранением геометрических размеров, с целью обеспечения качества получаемых заготовок, необходимо продолжить работы по соз-

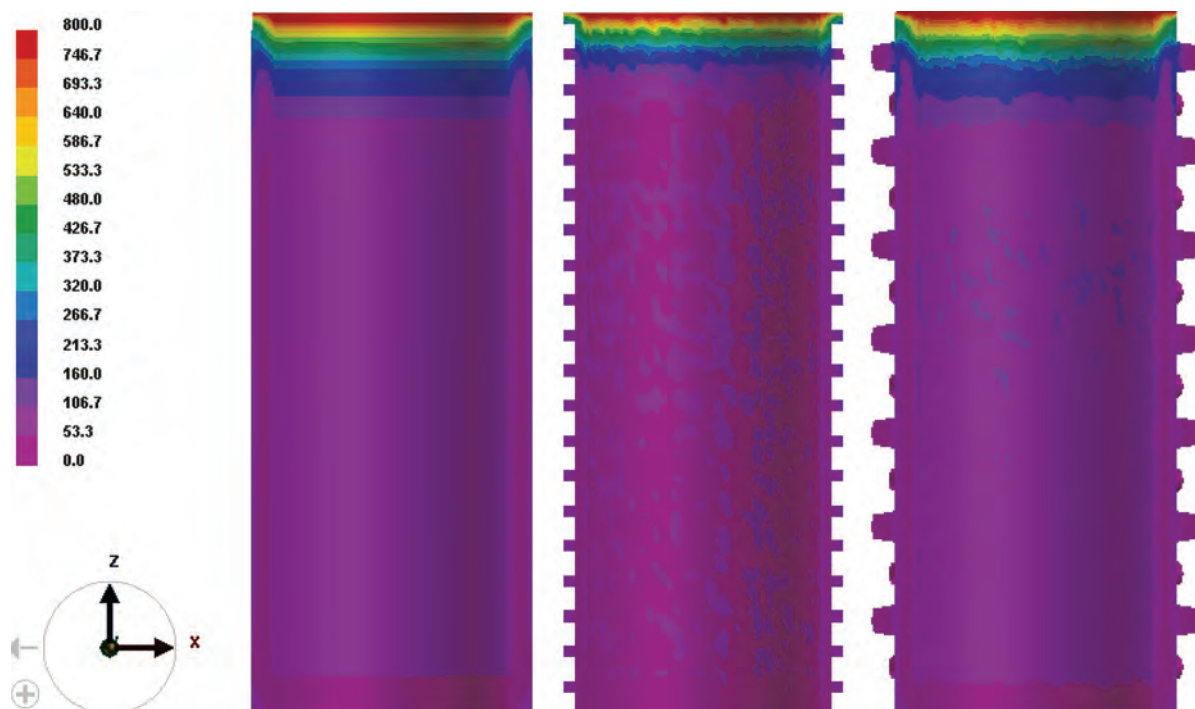


Рис. 12. Эффективные напряжения в кристаллизаторе в зависимости от конструкции при закреплении только в верхней части

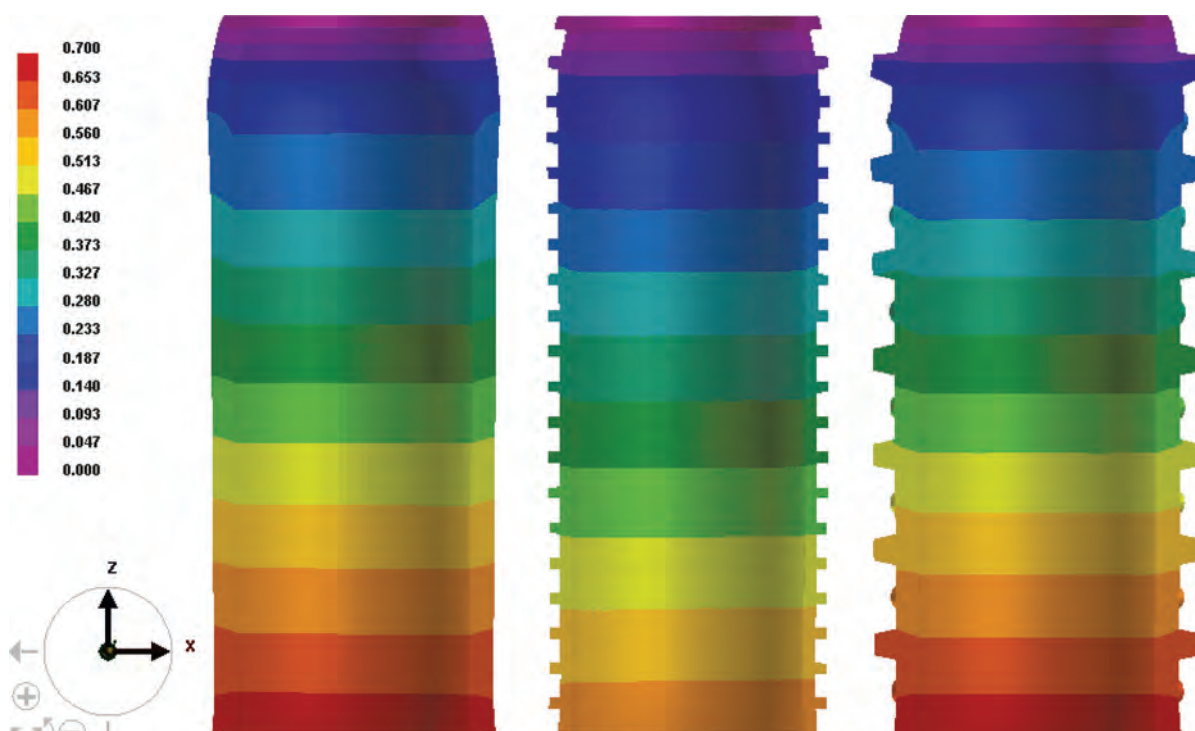


Рис. 13. Деформации кристаллизатора в зависимости от конструкции при закреплении только в верхней части. $\times 50$

данию оптимальной конструкции кристаллизатора, обеспечивающей минимальное коробление рабочей гильзы кристаллизатора, ее рациональной конфигурации, обеспечения равномерности ее охлаждения.

Экспериментальные данные и результаты математического моделирования показывают, что использование поперечного оребрения позволило снизить напряжения, а, следовательно, и деформации в рабочей втулке кристаллизатора. Кристаллизатор данной конструкции позволил значительно уменьшить количество поверхностных дефектов.

Таким образом, на основе имитационного моделирования разработаны рекомендации по выбору оптимальной конструкции кристаллизатора для получения заготовок круглого и прямоугольного сечения деталей гидро- и пневмоаппаратуры.

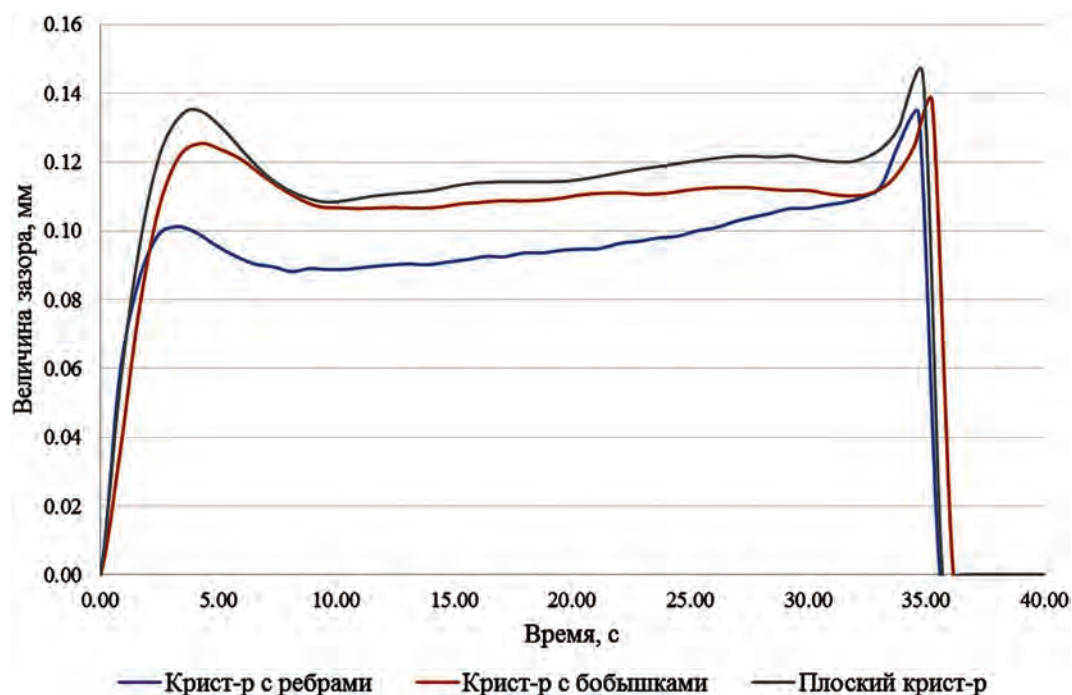


Рис. 14. Изменение величины зазора между отливкой и кристаллизатором

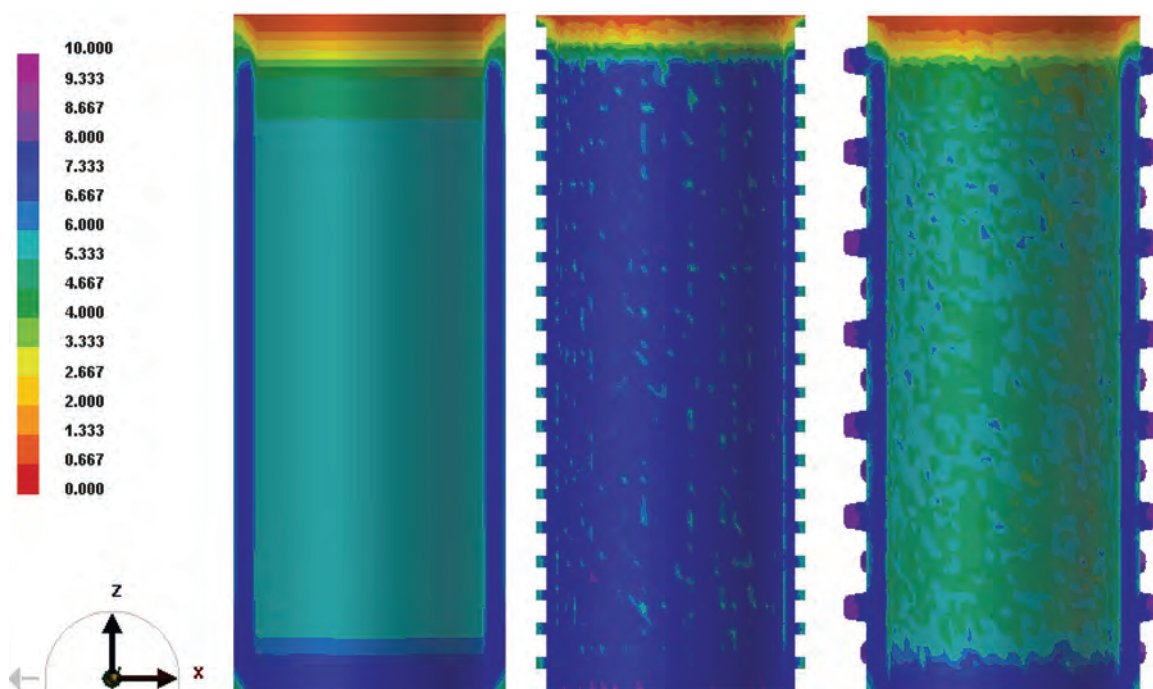


Рис. 15. Относительная стойкость кристаллизатора в зависимости от конструкции при закреплении только в верхней части

Сведения об авторе

Крутилин Александр Николаевич, Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь. E-mail: kant-minsk@tut.by.

Information about the author

Krutilin Aleksandr, Belarusian National Technical University, Nezavisimosti ave., 65, 220013, Minsk, Republic of Belarus. E-mail: kant-minsk@tut.by.



УДК 621.74.5

Поступила 10.10.2015

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВАГРАНОЧНОГО ПАРКА MODERNIZATION OF CUPOLA EQUIPMENT

С. Л. РОВИН, УП «Технолит», г. Минск, Беларусь, Л. Е. РОВИН, Т. М. ЗАЯЦ, Л. Н. РУСАЯ,
Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, г. Гомель, Беларусь

S. L. ROVIN, Technolit Co, Minsk, Belarus, L. E. ROVIN, T. M. ZAYATS, L. N. RUSAYA, Gomel State
Technical University named after P. O. Sukhoj, Gomel, Belarus

В статье представлен автоматизированный ваграночный комплекс, разработанный научно-производственным предприятием «Технолит» совместно с ГГТУ им. П. О. Сухого, введенный в эксплуатацию весной 2015 г. на заводе «Стройэкс» в г. Челябинске Российской Федерации. Замена старых вагранок открытого типа на новые закрытые ваграночные установки, оснащенные системой автоматического контроля и управления, многоступенчатой системой мокрой пылегазоочистки, системами дозирования и загрузки шихты, шламоудаления и замкнутого водоснабжения, грануляции шлака, механизированного удаления провала, отдельного дутья, автоматикой управления уровнем шихты и температурно-дутьевым режимом, позволила предприятию увеличить объемы производства и повысить качество чугуна, на 20% снизить удельный расход кокса и почти в 30 раз уменьшить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.

This article presents an automated cupola complex, developed by scientific-production enterprise «Technolit» together with GSTU named after P. O. Sukhoi, launched in the spring of 2015 at the plant «Stroiex» in the city of Chelyabinsk (the Russian Federation). The old cupolas (open type) have been replaced by the new cupolas of the closed type, equipped with automatic control and management system and multistage wet gas treatment system. Cupolas are equipped with systems of post-combustion gases and the batch charging, the separate systems of air blast, systems of sludge removal and recirculation of water, the slag granulation installations, mechanized cleaning of cupola furnace and automatic safety system. These activities allowed the company to increase production and improve the quality of cast iron, reduce the coke consumption by 20% and reducing emissions of pollutants into the atmosphere almost 30 times.

Ключевые слова. Вагранка, модернизация, автоматизация контроля и управления, система пылегазоочистки.

Keywords. Cupola, modernization, automatic control management system, the gas treatment system.

Введение

Чугун является основным литейным сплавом по объему производства отливок. При этом вагранки сохраняют ведущую роль в выплавке чугуна, прежде всего серого. Вместе с тем, в Беларуси, как и в других странах СНГ, основной парк вагранок значительно устарел. Большинство вагранок имеют возраст 50 лет и более. Это вагранки открытого типа, холодного дутья, без устройств для грануляции шлака, очистки выбросов, удаления провала и систем контроля. Многие вагранки не оснащены системами набора, взвешивания и загрузки шихты, эксплуатируются по короткому циклу плавки в 1–2 смены, управляются в ручном режиме. Расход кокса для получения жидкого чугуна с температурой 1360–1400 °С, как правило, составляет не менее 15–18% от массы металлозавалки.

В то же время современные вагранки – это в абсолютном большинстве установки закрытого типа, в состав которых, помимо собственно плавильного агрегата, входит развитая периферия, в том числе системы рекуперации тепла отходящих газов и подогрева дутья, набора и загрузки шихты, многоступенчатой очистки ваграночных газов, охлаждения корпуса, грануляции шлака, системы контрольно-измерительных приборов и компьютерного управления и т. д. В Беларуси такими вагранками оснащено лишь одно предприятие – ОАО «Гомельстройматериалы». Следует однако отметить, что в данном случае речь идет о вагранках, на которых получают минеральный расплав для изготовления теплоизоляционных матов. Образующийся при этом чугун является вредным отходом, который должен отделяться от расплава и на большинстве предприятий просто уходит в отвал. На ОАО «Гомельстройматериалы» для



Рис. 1. Старые вагранки ООО «Стройэкс»

слива чугуна в изложницы вместо сброса в отвал вагранки оборудованы специальной установкой, разработанной УП «Технолит» совместно с ГГТУ им. П. О. Сухого. Внедрение этой установки позволило предприятию дополнительно к основной продукции ежегодно получать более 2 тыс. т чугуна.

Эксплуатация существующих морально устаревших вагранок представляет серьезную опасность для окружающей среды. Замена устаревших вагранок современными комплексами иностранного производства требует крупных капиталовложений – порядка 2–6 млн. долл. в зависимости от производительности вагранок. Альтернативой могут служить новые ваграночные установки и системы, предлагаемые УП «Технолит» совместно с ГГТУ им. П. О. Сухого, адаптированные к условиям действующих цехов и требующие значительно меньших затрат на внедрение. Новые установки имеют блочную структуру и соответственно позволяют осуществлять модернизацию агрегатов поэтапно, по мере необходимости и финансовых возможностей.

Результаты внедрения. Примером реализации такого подхода к решению проблемы является новый ваграночный комплекс, внедренный в 2015 году на заводе «Стройэкс» в г. Челябинске вместо устаревших 3-тонных вагранок открытого типа (рис. 1). Следует отметить, что замена старых вагранок осуществлялась без остановки производства, поэтапно.

Новый комплекс состоит из двух вагранок закрытого типа, которые объединены едиными системами мокрой пылегазоочистки, дозирования и скиповой загрузки шихты, грануляции шлака, водоснабжения и шламоудаления, КИПиА, механизированной уборки провала (рис. 2).

Каждая ваграночная установка оснащена устройством дистанционного закрытия/открытия днища с системой блокировки, раздельным дутьем, боковой загрузкой по склизу, стационарным копильником, автоматизированным узлом дожигания отходящих газов, мокрым пылеуловителем (МПУ) с внутренним



Рис. 2. Новый ваграночный комплекс

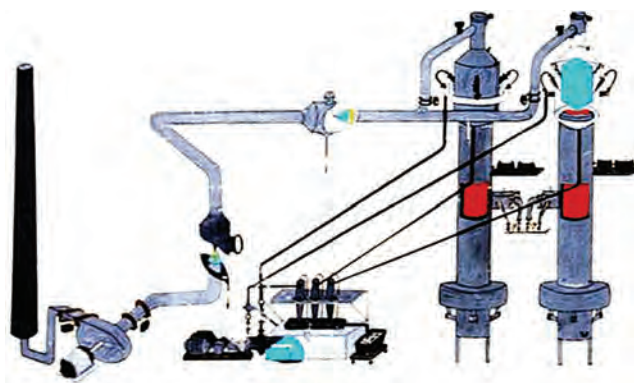


Рис. 3. Схема нового ваграночного комплекса

цилиндрическим обтекателем и приводным клапаном для сброса газов в атмосферу в случае отключения второй ступени очистки. В пылеуловителе установлены винтовые форсунки, устойчиво работающие на оборотной воде, очищаемой в гидроциклонах, установленных на сливе из МПУ. Схема нового ваграночного комплекса показана на рис. 3.

Для набора шихты установлены суточные бункера, оснащенные пластинчатыми питателями и взвешивающими устройствами. От бункеров шихта по транспортеру поступает в тару скипа. Особенностью системы загрузки является использование одного неповоротного скипа для загрузки двух вагранок. В верхней точке скипа находится перекидной лоток, по которому шихта поступает в вагранки, работающие попеременно (сутки через сутки). Подобная схема загрузки была внедрена авторами на Пуховичском опытно-экспериментальном заводе на блоке 5-тонных вагранок, где она успешно работает уже несколько десятков лет.

Ваграночный комплекс оснащен развитой системой КИПиА, обеспечивающей непрерывный контроль хода плавки и работы всех исполнительных механизмов. Для стабилизации уровня шихты в вагранке установлены датчики уровня, разработанные в ГГТУим. П. О. Сухого и впервые опробованные на вагранках ОАО «Гомельстройматериалы» в 2000 г. Позже такие системы контроля были с успехом внедрены и на чугуноплавильных вагранках различной мощности от 3 до 20 т/ч.



Рис. 4. Система управления ваграночным комплексом

Система очистки отходящих газов, примененная в данном проекте, включает в себя узел дожигания и две ступени очистки газов от пыли и водорастворимых газообразных загрязняющих веществ. На первой ступени осуществляется промывка газов диспергированной водой, в мокром пылеуловителе (МПУ), на второй очистка происходит за счет конденсации образующихся паров в длинном газоходе. Образующиеся при конденсации капли осаждаются и отделяются от газов в двух последовательно установленных лопастных каплеуловителях. Обезвреживание СО обеспечивается работой автоматизированного узла дожигания. Аналогичная система пылегазоочистки внедряется сегодня на 20-тонных вагранках Минского тракторного завода.

На выходе из второй ступени пылегазоочистки установлены дымосос и дымовая труба высотой 22 м. Ваграночный блок снабжен системой замкнутого бессточного водоснабжения и шламоудаления. Грязная вода из МПУ и каплеотделителей очищается в напорных гидроциклонах и сливается в бак-накопитель емкостью 12 м³, шлам сбрасывается в бак-отстойник, где отстаивается и уплотняется. Очищенная вода снова подается на орошение в МПУ и газоход второй ступени пылегазоочистки, а сгущенный шлам по мере накопления вывозится к месту временного хранения, а затем на полигоны промышленных отходов. Такая система шламоудаления практически устраняет ручной труд по очистке бака-накопителя. Самоочистка бака производится через резервный гидроциклон один-два раза в месяц. Потери воды на испарение (~3–5%) компенсируются из системы технического водоснабжения автоматически с помощью регулятора уровня.

Особо стоит отметить решение проблемы нейтрализации стоков. Вода, используемая в системе очистки при поглощении оксидов серы и азота из отходящих газов, приобретает кислую реакцию до pH 4–6. Это приводит к коррозии трубопроводов, если не нейтрализовать оборотную воду с помощью щелочных растворов. В то же время в установках грануляции шлака, которыми оснащен блок вагранок, вода приобретает щелочную реакцию (pH 8–9). Учитывая это, системы водоснабжения грануляции и шламоудаления объединены и стоки взаимно нейтрализуют друг друга. Естественно это не снимает необходимость постоянного контроля кислотности оборотной воды.

Обезвреживание СО в отходящих газах обеспечивается путем дожигания в трубе вагранки выше завалочного окна. Для поджигания газов установлена блочная горелка с номинальным расходом 25 м³/ч. Узел дожигания оснащен системой КИПиА, которая следит за температурой горящих газов и при устой-

чивом горении снижает расход горелки до минимума (15% от номинала). Кроме того, система обеспечивает безопасность работы узла.

Вагранка с управляемым отдельным дутьем и контролируемой системой загрузки обладает достаточно гибким топливно-дутьевым режимом. Это позволяет установить и поддерживать наиболее экономичный режим плавки. Ввод в эксплуатацию нового ваграночного комплекса позволил снизить среднечасовой расход кокса с 16 до 12% от металлозавалки.

Блок вагранок обслуживается двумя рабочими: завальщиком и вагранщиком. Управление вагранкой осуществляется с центрального пульта, где, помимо контрольно-измерительных приборов и органов управления, установлен монитор с мнемосхемой, отражающей состояние всех узлов ваграночного комплекса и технологических параметров плавки. Информация о работе вагранок дублируется в кабинете начальника цеха на экране монитора компьютера (рис. 4). Весь ход плавки записывается в оперативной памяти ПК, что позволяет анализировать параметры техпроцесса за длительный период, оценивая влияние тех или иных режимных параметров на технико-экономические показатели плавки.

Уборка и вывоз провала механизированы и осуществляются с помощью рельсовой тележки, которая устанавливается под днищем вагранки перед выбивкой, а затем вывозится на шихтовой двор.

Экологические характеристики плавильного блока соответствуют жестким требованиям действующих стандартов, санитарных норм и правил: остаточная концентрация CO – 0,1–0,3%, пыли – 0,1–0,2 г/м³, SO₂ – 60–80 мг/м³, NO₂ – 30–40 мг/м³.

Внедрение нового ваграночного комплекса позволило предприятию перейти на трехсменный режим работы, на 40% увеличить объем производства и повысить качество чугуна, на 20% сократить удельный расход кокса и в 25 раз снизить количество загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу.

Сведения об авторах

Ровин Сергей Леонидович, УП «Технолит», Беларусь, 220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 24. Тел./факс +375 17 292 85 20. E-mail: technolit@list.ru, technolit@tut.by.

Ровин Леонид Ефимович, Заяц Татьяна Михайловна, Русая Людмила Николаевна, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Беларусь, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48. E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by.

Information about the authors

Rovin Sergey, Technolit company, 24 Kolasa str., Minsk, 220013, Belarus. Tel./fax +375 17 292 85 20. E-mail: technolit@list.ru, technolit@tut.by.

Rovin Leonid, Zayats Tatsiana, Rusaya Liudmila, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj, October ave. 48, 246746, Gomel, Belarus. E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by.



УДК 621.74

Поступила 18.11.2015

ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА И ЛИТЕЙНОГО СТЕРЖНЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КАЧЕСТВА ВНУТРЕННИХ ПОЛОСТЕЙ ОТЛИВОК

THE PROCESSES OF THE LIQUID METAL AND THE MOLD CORE INTERACTION DURING THE FORMATION OF THE INTERNAL CAVITY OF THE CASTING

И. Б. ОДАРЧЕНКО, И. Н. ПРУСЕНКО, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, г. Гомель, Беларусь

I. B. ODARCHENKO, I. N. PRUSENKO, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj, Gomel, Belarus

Представлен анализ взаимосвязи физико-механических, химических процессов, протекающих в зоне контакта металл-стержень с параметрами качества литейных стержней. Определен характер взаимосвязи данных процессов с формированием размерной, геометрической точности, шероховатости и отсутствием дефектов на внутренней поверхности отливки.

The analysis of the relation of physical-mechanical and chemical processes occurring in the metal-core contact area with perfection factors of the mold core is presented. The nature of interrelation of these processes with the formation of dimensional accuracy, geometric relationship, roughness and absence of defects on the internal surface of the casting is defined.

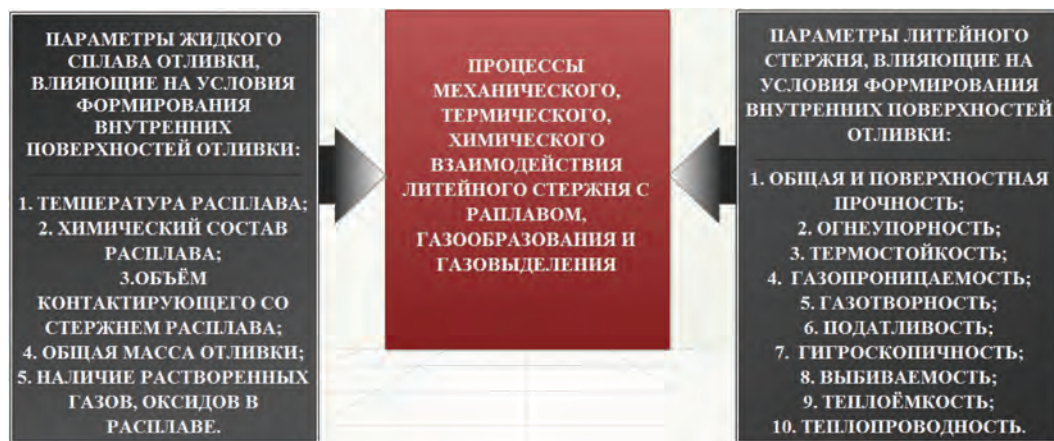
Ключевые слова. *Качество отливок, внутренние полости отливок, литейные стержни, механическое взаимодействие металла и стержня, термическое взаимодействие металла и стержня, химическое взаимодействие металла и стержня, газообразование, газовыделение.*

Keywords. *Quality of castings, internal cavity of the casting, mold core, mechanical interaction of the metal and the core, thermal interaction of the of the metal and the core, chemical interaction of the metal and the core, gasification, gas emission.*

Качество внутренних полостей отливок формируется литейным стержнем как изделием, эксплуатационные свойства которого должны обеспечивать формирование геометрически точных полостей с заданной шероховатостью поверхности. Поэтому стержень должен противостоять искажению геометрических и линейных размеров в условиях термомеханического воздействия расплава при заливке и кристаллизации отливки, а также предупреждать возникновение дефектов на внутренних полостях литых изделий.

С этой точки зрения объектом управления качеством внутренних полостей отливок являются процессы, протекающие в зоне контакта металл-стержень в период формирования, кристаллизации и охлаждения тела отливки. Взаимодействие жидкого металла и литейного стержня в зоне контакта носит комплексный характер, позволяющий выделить наиболее важные в рассматриваемом аспекте процессы механического, термического, химического воздействия, а также процессы газообразования и газовыделения (см. рисунок), оказывающие значительное влияние на формирование критериев качества внутренних полостей отливок.

Процессы механического взаимодействия литейного стержня с расплавом обусловлены силовыми нагрузками, которые испытывает литейный стержень при заливке расплавом: гидростатическое давление расплава, гидродинамическое и эрозионное воздействие на поверхность стержня. Соответственно литейные стержни должны удовлетворять определенным требованиям по общей и поверхностной прочности для предупреждения разрушения, сохранения целостности стержня и формирования требуемой шероховатости отливки.



Условия, формирующие качество внутренних поверхностей отливок

При рассмотрении механического нагружения литейного стержня в процессе заполнения, кристаллизации и охлаждения отливки требуемая прочность обеспечивается сочетанием прочностных показателей стержневой смеси, конструктивным исполнением и размерами поперечного сечения «тела» литейного стержня. Поскольку технологически не всегда возможно изменение размеров и сечений внутренних поверхностей отливок, наиболее значимой возможностью управления прочностью стержня является управление прочностью стержневой смеси. Прочность стержневой смеси, как правило, наряду с характеристикой зернового и минералогического состава огнеупорного наполнителя определяется реакционной способностью связующей композиции, размером и формой образованных манжет [1].

В этом отношении известная гамма современных связующих материалов позволяет обеспечить необходимый уровень прочности для литейных стержней отливок мелкого и среднего развеса без применения дополнительных технологических мероприятий.

Кроме того, следует учитывать, что в процессе кристаллизации отливки (усадка металла) стержень формирует и подвергается воздействию различных по своему характеру сил (растягивающих, сжимающих, изгибающих), возникающих в результате препятствия свободной усадке сплава, что создает условия для возникновения внутренних напряжений и деформаций как в отливке, так и в стержне. Поэтому при определенных прочностных показателях литейный стержень параллельно должен обладать пластичными свойствами, обеспечивающими возможность сопровождения объемных и линейных расширений отливки.

Соответственно сочетание прочностных и пластических свойств литейного стержня должно быть таковым, чтобы создавались такие условия механического нагружения системы металл-стержень, которые обеспечивали бы стабильность линейных размеров отливки, исключая искажение геометрических параметров внутренних полостей на всех стадиях: во время заливки, кристаллизации и охлаждения отливки. При этом несбалансированность системы, превышение механических нагрузок над прочностными и пластичными свойствами литейного стержня становится причиной образования таких характерных дефектов, как стержневой перекосяк, разностенность, прорыв металла, холодные и горячие трещины, недолив, нарост, залив, засор, просечки, песчаные раковины.

Характер процессов термического взаимодействия жидкого металла и литейного стержня при формировании внутренних поверхностей отливок определяется возникновением значительного градиента температур между отливкой и стержнем после заполнения полости формы расплавом и переходом тепла от отливки в стержень. При этом литейный стержень является интенсификатором процессов охлаждения, кристаллизации сплава отливки. Интенсивность отвода тепла от металла формирует структуру поверхностного слоя внутренних полостей отливки, влияет на ее механические свойства, а также на вероятность образования дефектов в период кристаллизации.

С другой стороны, при вхождении в контакт с жидким металлом литейный стержень попадает сначала в условия воздействия термоудара, а затем передачи значительного количества тепла и длительного воздействия высоких температур. При этом стержневая смесь наружной части стержня подвергается необратимым изменениям. Материал огнеупорного кварцевого наполнителя претерпевает ряд модификационных превращений, связанных с объемными изменениями зерен наполнителя. Балластные материалы в виде низкоогнеупорных примесей наполнителя подвергаются расплавлению с образованием легко-

плавких эвтектик (полевые шпаты ($K_2O \times Al_2O_3 \times 6SiO_2$, $Na_2O \times Al_2O_3 \times 6SiO_2$, $CaO \times Al_2O_3 \times 6SiO_2$), слюды ($K_2O \times Al_2O_3 \times 6SiO_2 \times 2H_2O$, $K_2O \times 6(Mg, Fe)O \times Al_2O_3 \times 6SiO_2 \times 2H_2O$) и др.). Также при высокотемпературном воздействии расплава на литейный стержень происходит термическая деструкция связующих компонентов с выделением коксового остатка и газообразных продуктов.

В целом структура стержневой смеси изменяется по мере удаления от границы термического взаимодействия, что приводит к снижению прочностных характеристик, теплопроводящих свойств, газопроницаемости. Полное разупрочнение стержневой смеси происходит лишь в поверхностном слое стержня после формирования корки внутренней поверхности отливки и уже не оказывает существенного влияния на геометрическую, размерную точности и шероховатость поверхности отливки.

Поэтому для сохранения геометрических параметров отливки, предупреждения образования пригара, отбела и других дефектов материал стержня при этой температуре должен обладать оптимальным соотношением прочностных характеристик и пластичности, огнеупорностью, термостойкостью, теплопроводностью. С точки зрения термического взаимодействия важно управлять интенсивностью теплообмена, обеспечивающего необходимые условия кристаллизации и охлаждения отливки, что возможно за счет регулирования состава стержневой смеси, условий уплотнения и конструкции стержня (наличие полости в стержне).

Химические процессы, протекающие в зоне контакта металл-стержень, характеризуются взаимодействием компонентов стержневой смеси и продуктов их термической деструкции с элементами сплава. При этом в процессах химического взаимодействия участвуют, с одной стороны, диоксид кремния, минеральные примеси, входящие в состав огнеупорного наполнителя и компоненты связующих композиций, а также химические элементы и оксиды металлов расплава – с другой.

Так, известно [2], что химическое взаимодействие диоксида кремния с оксидами железа, марганца протекает по реакции:



Указанные оксиды взаимодействуют с поверхностным слоем частиц SiO_2 , образуя легкоплавкие силикаты ($2Fe \cdot SiO_2$, $2MnO \cdot SiO_2$), которые после затвердевания спекаются в трудноотделимый слой на внутренней полости отливки. Интенсивность протекания реакций определяется, в первую очередь, температурой расплава, огнеупорностью, химической активностью огнеупорного наполнителя к оксидам металлов, наличием на поверхности стержня высокоогнеупорного покрытия. По такой же схеме протекает химическое взаимодействие оксидов металлов с указанными ранее легкоплавкими балластными примесями огнеупорного наполнителя. Примеси, как правило, снижают огнеупорность наполнителя. В результате на более ранних стадиях образуются устойчивые химические связи между оксидами металлов сплава и легкоплавкими силикатными соединениями примесей, которые связывают металл с частицами огнеупорного наполнителя. Основным продуктом такого взаимодействия являются химически связанные с поверхностью отливки твердые силикаты.

Еще одной разновидностью химического взаимодействия жидкого металла и литейного стержня являются химические процессы термической диссоциации карбонатов ($CaCO_3$, $FeCO_3$, $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ и др.) с образованием значительного объема углекислого газа, способствующего повышенному газонасыщению зоны контакта металл-стержень, и соответственно предрасполагающего к образованию газовых дефектов на внутренних поверхностях и в теле отливки.

Также известно, что в результате химического взаимодействия в зоне контакта металл-стержень протекают реакции, вызывающие насыщение металла соединениями азота, серы, фосфора. Соединения этих элементов входят в состав связующих композиций на основе органических компонентов наиболее распространенных стержневых смесей карбамидного, карбамидофуранового, фенолофуранового классов и других смол. В области литейного производства реакции и механизм перехода азота, серы, фосфора в сплав слабо изучен и описан фрагментарно. Известно, что насыщение черных сплавов азотом, серой и фосфором происходит с их концентрацией в зоне ликваций и вызывает отклонение химического состава сплава отливки от заданного с вытекающими из этого последствиями.

Таким образом, следует заключить, что процессы химического взаимодействия в зоне контакта металла с литейным стержнем протекают по трем основным направлениям:

1. Химические реакции между расплавами эвтектик диоксида кремния, силикатсодержащих минеральных примесей, входящих в состав огнеупорного наполнителя, и химическими элементами и оксида-

ми металлов расплава. Конечным продуктом реакций являются твердые силикатные соединения, связанные с поверхностью отливки, в виде химического пригара на внутренних полостях отливки.

2. Реакции химической деструкции компонентов стержневой смеси, сопровождающиеся газообразованием и соответственно приводящие к нежелательному газонасыщению зоны контакта металл – стержень.

3. Химическая диффузия соединений азота, серы и фосфора в сплав отливки в результате взаимодействия органических компонентов связующей системы стержневой смеси с жидким расплавом.

С точки зрения формирования качества внутренних полостей отливок цель управления процессом химического взаимодействия компонентов жидкого сплава и литейного стержня заключается в минимизации химических реакций с образованием инородных для металла соединений, оксидов и газообразных продуктов термической деструкции. В этом отношении литейный стержень следует рассматривать с точки зрения оптимизации рецептуры стержневых смесей с учетом содержания в них легкоплавких и газообразующих примесей, мигрирующих химических элементов (азот, сера, фосфор), а также возможностей применения высокоогнеупорных покрытий на поверхности стержня.

Протекание интенсивных газодинамических процессов в зоне металл-стержень обусловлено выделением значительного количества газов в результате диссоциации, испарения, возгонки составляющих компонентов стержневой смеси с формированием в данной зоне избыточного давления газовой среды. При этом процессе происходит инжекция образованных газов (углекислого газа, бензола, толуола, этилбензола, ксилола и др.), а также воздуха, находящегося в межзерновых каналах скелетной структуры стержневой смеси, как во внутренние слои стержня, так и в расплав. Газонасыщение сплава отливки недопустимо, поскольку вызывает образование газовых раковин, ситовидных раковин, газовой пористости, газовой шероховатости, вскипов, а также отклонение от заданной шероховатости внутренней поверхности отливки.

Известно, что инжекция газов из литейного стержня в расплав происходит, когда:

$$P_{\Gamma} > P_{\text{м}} + P_{\text{к}} + P_{\text{з}}, \quad (3)$$

где P_{Γ} – давление газа в рассматриваемой точке поверхности контакта металл-стержень; $P_{\text{м}}$ – гидростатическое давление расплава в той же точке; $P_{\text{к}}$ – капиллярное давление или давление газа, необходимое для преодоления поверхностного натяжения металла; $P_{\text{з}}$ – давление газа над зеркалом металла [3].

Исходя из этого, для регулирования газового взаимодействия в зоне металл-стержень необходимо контролировать газотворность стержневой смеси и газопроницаемость литейного стержня путем применения стержневых смесей, обеспечивающих необходимую прочность литейного стержня при минимальном содержании связующего материала, использовании наполнителей, свободных от легкоплавких примесей (в первую очередь, карбонатов), использовании наполнителей с оптимальной зернистостью, применении эффективных систем вентиляции стержня.

Таким образом, управление качеством внутренних полостей отливок возможно через комплекс мер по регулированию процессов механического, термического, химического взаимодействия, газообразования и газовой выделения. С этой точки зрения параметры жидкого сплава отливки (температура, химический состав, объем контактирующего со стержнем расплава, общая масса отливки, наличие растворенных газов, оксидов в расплаве) определяют соответствующий комплекс требований к литейным стержням по следующим показателям: общей и поверхностной прочности, огнеупорности, термостойкости, гигроскопичности, газотворности, газопроницаемости, податливости, выбиваемости, теплоемкости и теплопроводности (см. рисунок).

В этом случае сбалансированность протекающих процессов в зоне контакта металл-стержень позволит добиться условий кристаллизации отливки, обеспечивающих формирование заданной геометрической, размерной точности, шероховатости внутренних полостей отливок, а также отсутствие дефектов на этих полостях.

Литература

1. Жуковский С. С. Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм: справочник – М.: Машиностроение, 2010. 256 с.
2. Кукуй Д. М. Теория и технология литейного производства / Д. М. Кукуй, В. А. Скворцов, Н. В. Андрианов. В 2-х ч. Ч. 2. Технология изготовления отливок в разовых формах. Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2011. 406 с.
3. Соляков Д. А. Процессы газовой выделения из стержней горячего и холодного отверждения / Д. А. Соляков, А. Н. Болдин, А. И. Яковлев. М.: Машиностроение-1, 2004. 200 с.

References

1. Z h u k o v s k i j S. S. *Holodnotverdezhushhie svyazujushhie i smesi dlja litejnyh sterzhnej i form: spravochnik* [Cool hardening bindings and mixes for mold cores and molds]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 256 p.
2. K u k u j D. M., S k v o r c o v V. A., A n d r i a n o v N. V. *Teorija i tehnologija litejnogo proizvodstva* [The Teory and Technology of Foundry Prodaction]. V 2 ch. Ch. 2. *Tehnologija izgotovlenija otlivok v razovyh formah* [Technology of Casting Production in Expendable molds]. Minsk, Novoe znanie Publ., 2011. 406 p.
3. S o l j a k o v D. A., B o l d i n A. N., J a k o v l e v A. I. *Processy gazovydelenija iz sterzhnej gorjachego i holodnogo otverzhdenija* [Gas evalution from the cores made by Hot-box- and Cold-box-amin-processes]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2004. 200 p.

Сведения об авторах

Одарченко Игорь Борисович, Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого. Пр. Октября 48, Гомель, Республика Беларусь. E-mail: oda2009@gmail.com. Тел.: + 375 44 721 17 26.

Прусенко Иван Николаевич, Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого. Пр. Октября 48, Гомель, Республика Беларусь. E-mail: inprusenko@gmail.com. Тел.: + 375 29 535 69 01.

Information about the authors

Odarchenko Igor, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj. Oktober Avenue 48, Gomel, Republic of Belarus. E-mail.: oda2009@gmail.com. Tel.: + 375 44 721 17 26.

Prusenko Ivan, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj. Oktober Avenue 48, Gomel, Republic of Belarus. E-mail.: inprusenko@gmail.com. Tel.: + 375 29 535 69 01.



УДК 622.56.001

Поступила 12.10.2015

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ И ПЕРВИЧНЫХ ЧАСТИЦ КРЕМНИЯ В СИЛУМИНАХ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ MODIFICATION OF EUTECTIC AND PRIMARY PARTICLES OF SILICON IN SILUMINS. DEVELOPMENT PROSPECTS

А. Т. ВОЛОЧКО, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь

A. T. VOLOCHKO, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Проанализированы основные подходы в модифицировании силуминов. Приведены результаты воздействия различных комплексных модификаторов на структуру и свойства алюминиево-кремниевых сплавов. Рассмотрены перспективы создания силуминов, отличающихся не только прочностными, но и пластическими свойствами.

The principal approaches to modification of silumins have been analyzed. Results of the effect of various complex modifying agents on the structure and properties of aluminum-silicon alloys have been presented. Prospects of production of silumins that are different not only in strength properties but also in plastic properties have been analyzed.

Ключевые слова. Силумины, эвтектика, легатуры, модифицирование, наноразмерные тугоплавкие частицы, направленная кристаллизация, традиционные методы литья.

Keywords. Silumins, eutectic point, alloying elements, modification, nanodimensional refractory particles, directed crystallization, conventional methods of casting.

Особую группу конструкционных материалов представляют алюминиевые сплавы, среди которых силумины зарекомендовали себя в качестве наиболее широко используемых в машиностроении.

В зависимости от содержания кремния силумины имеют различную структуру (рис. 1), которая определяет не только эксплуатационные свойства материала, но и возможности обработки давлением, термообработки, а также стойкость инструмента при их механической обработке.

В качестве основных составляющих бинарных силуминов, кристаллизующихся в условиях равновесия, в зависимости от содержания кремния можно выделить:

- для доэвтектических сплавов (содержание кремния до 12,2 ат.%, 11,7 мас.%) это твердый раствор алюминия α -фаза и эвтектика из кремнийсодержащего α -твердого раствора;
- для заэвтектических сплавов это практически чистый кремний β -фаза, погруженный в эвтектическую матрицу.

Важнейшими аспектами повышения свойств силуминов являются форма, размер и соотношение эвтектических и первичных частиц кремния, а также исключение дендритной формы кристаллов α -твердой фазы.

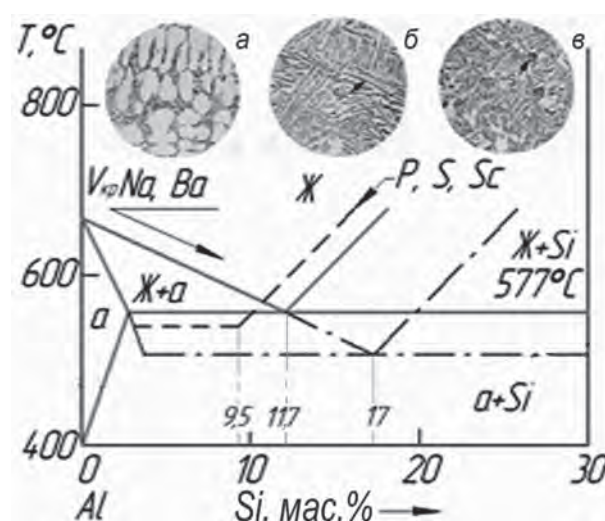


Рис. 1. Фрагменты диаграммы состояния в условиях равновесия (сплошная линия) и типичные структуры доэвтектического (а), эвтектического (б), заэвтектического (в) состояния и возможности сдвига эвтектической точки в условиях модифицирования примесными атомами Ва (штрихпунктирная линия), солями NaPO_3 (штриховая линия)

Анализ многочисленных факторов, влияющих на свойства силуминов, показывает, что важная роль в формировании качественных отливок принадлежит процессам модифицирования, поскольку изменить структурное состояние кремния другими методами, в том числе последующей термомеханической обработкой, не всегда представляется возможным. Только специальными методами обработки металлов давлением, такими, как поперечно-винтовая прокатка, возможно диспергировать кремний в сплаве [1]. Однако для возможности пластического деформирования силуминов необходимо, чтобы они имели достаточные пластические свойства. Путем введения небольших добавок элементов-модификаторов представляется возможным изменить морфологию и дисперсность кремния как в эвтектике, так и первичных кристаллов и существенно (на 80–100%) повысить уровень пластичности силуминов. Это открывает путь для создания литейно-деформационных технологий формирования свойств и формообразования ответственных изделий машиностроения.

Для развития теории и практики модифицирования, а также разработки новых комплексных модификаторов необходимо получить ответы на следующие вопросы:

- какая роль инициирующего действия отдельных фаз примесных атомов зародышевого действия и какое влияние они оказывают на кристаллизацию других фаз;
- какова роль поверхностно-активных веществ в зоне разделения фаз;
- какая фаза при кристаллизации является ведущей и какая последовательность их образования.

Анализ структурного состояния силуминов, кристаллизующихся в условиях неравновесного состояния, позволяет полагать, что кристаллизация происходит в несколько стадий. Первая начинается с выделения первичного кремния, причем не только в заэвтектических силуминах, но и в эвтектических и при определенных концентрациях в доэвтектических [2]. Вторая стадия связана с тем, что вокруг этих кристаллов образуются зоны жидкости, сильно обедненные кремнием, что создает условия для зарождения так называемых псевдопервичных зерен дендритов α -твердого раствора. Именно по этой причине при определенных условиях охлаждения и наличии примесей в структуре эвтектических и заэвтектических сплавов появляется нехарактерная дендритная структура α -фазы, которая приводит к снижению механических свойств и в особенности антифрикционных. На третьей стадии обычно происходит кристаллизация эвтектики.

Следовательно, важнейшей задачей является целенаправленное управление литой структурой и свойствами силуминов при объемной кристаллизации отливок в обычных нестационарных процессах традиционного литья.

Анализ научной литературы и собственные исследования [2–6] применения различных модификаторов для модифицирования первичного кремния показывают, что наиболее эффективны такие элементы, как фосфор, сера, кальций, цезий, лантан и ряд других (рис. 2).

Обработка фосфором в составе медьфосфористых лигатур измельчает кремний β -фазу в 4–10 раз. При этом резко повышается износостойкость. Среди недостатков применения медьфосфористых лигатур можно отметить большую стоимость, значительный перегрев расплава ($T > 850^\circ\text{C}$), длительность выдержки > 20 мин и укрупнение эвтектической структуры.

Характерная особенность силуминов состоит в том, что в условиях неравновесной кристаллизации при наличии примесей зачастую в эвтектических и заэвтектических сплавах можно выявить доэвтектическую структуру с дендритными зёрнами α -фазы, что делает продукцию, выпускаемую из этих сплавов,



Рис. 2. Классификация применяемых модификаторов алюминиевых сплавов в зависимости от характера их воздействия на структуру

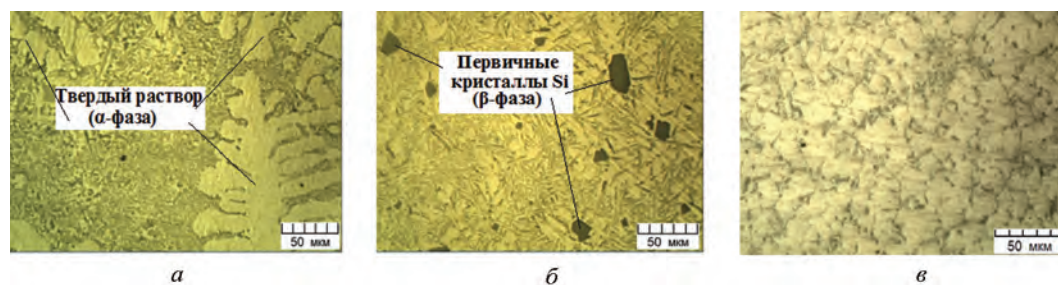


Рис. 3. Микроструктура силуминов, нехарактерная для равновесных условий кристаллизации: *а* – немодифицированного эвтектического сплава АК12М2МгН с дендритами (α -фаза); *б* – модифицированного доэвтектического сплава АК9 лигатурой с NaPO_3 с включениями первичного кремния (β -фаза); *в* – заэвтектического силумина АК17 без включений первичного кремния (β -фаза) ($V_{\text{кр}} = 10^2\text{--}10^3$ град/с)

неконкурентоспособной, не позволяет повысить ресурс работы механизмов машин, достичь высоких эксплуатационных характеристик.

Нехарактерные для равновесной кристаллизации виды структур представлены на рис.3.

Одними из сильных модификаторов дендритов α -твердого раствора являются титан, бор, которые при попадании в расплав образуют ультрадисперсные интерметаллидные соединения AlB_2 , TiB_2 , TiAl_3 , ZrAl_3 , являющиеся центрами кристаллизации. В связи с тем что эти элементы имеют высокую температуру плавления, на практике их вводят в расплав или в виде алюминиевых лигатур (типа $\text{Al-5 мас.\%Ti-1 мас.\%B}$) или в виде комплексных солей типа K_2TiF_6 , KBF_4 , K_2ZrF_6 [3,8].

Добавки Ti (до 1,7%) или B (до 0,07%) в литейные сплавы системы Al-Si-Cu вызывают измельчение зерна и уменьшение междендритных расстояний [9]. Для более эффективного измельчения зерна оптимальным соотношением Ti/B в тройных лигатурах является соотношение 1/4 при содержании титана в сплаве 0,13 мас.%, а для уменьшения междендритного расстояния соотношение должно быть 2/1 [10].

Важный момент повышения эффективности модифицирующих лигатур – не только химический состав, но и способ получения и последующей их обработки [11–14]. Так, получение лигатур Al-B-Ti в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) позволяет уменьшить зародышеобразующую фазу [14]. Положительно влияет на модифицирование структуры и последующая пластическая деформация лигатуры [7,12].

В качестве комплексных модификаторов, действующих на дендриты α -твердого раствора и эвтектику, предлагаются лигатуры систем Al-Sr-Ti-B, Ni-Cr-Al-Ti [15]. Причем использование для их изготовления нанопорошков вместо обычносплавленных лигатур несколько повышает механические свойства.

В последнее время повышенный интерес исследований по поиску модифицирования первичной и кремниевой фазы в эвтектике связан с так называемой концепцией сдвига псевдоэвтектической точки по направлению к компоненту с более высокой точкой плавления Si за счет примесных атомов [6, 16]. Особый интерес представляет Ba.

Так, известно, что элементарный барий образует при температурах $\sim 870^\circ\text{C}$ твердый раствор с $\sim 0,5$ ат.% концентрацией кремния и не взаимодействует с алюминием. Поэтому полагают, что добавление 1–4 мас.% Ba в расплав силумина, содержащего 14–17 мас.% Si, позволяет получить эвтектическую структуру сплава без первичных выделений кремния [6]. Проведение процесса охлаждения расплава методом направленной кристаллизации привело к получению оригинальной волокнистой структуры кремния размером 10–30 нм по образцу роста снопа пшеницы, расходящегося из точки зарождения (рис. 4). Такие сплавы, обладающие наноразмерными кремниевыми частицами, имеют достаточно высокие механические свойства, предел прочности до 475 МПа при деформации разрушения до 5 %.

При объяснении механизмов появления такой структуры с помощью высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии ряду исследователей [16] удалось установить, что кремниевые частицы имеют внешнюю поверхность, параллельную внутренней плоскости двойника.

Сдвиг псевдоэвтектической точки и наноразмерность ширины кремниевых волокон подтверждают последние теории по модифицированию заэвтектических силуминов [6,16] и о роли бимолекулярных пленок оксида алюминия и их действие в расплаве в качестве первичных кремниевых зародышей, вырастающих в кремниевые частицы β -фазы.

Центры бимолекулярных пленок могут быть увеличены образованием фосфида алюминия AlP . Предполагается, что барий при попадании в расплав может загрязнять бимолекулярные центры зарож-

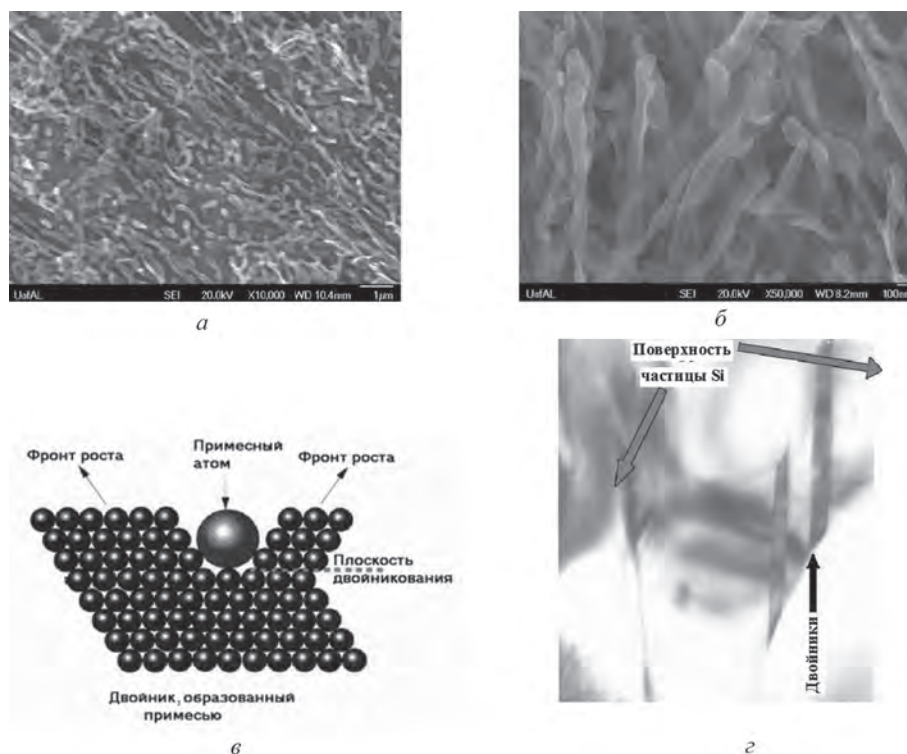


Рис. 4. Микрофотография направленно кристаллизованного сплава Al-17 мас.% Si-3 мас.% Ba ($V = 0,25$ мм/с): а, б – наноразмерная волокнистая морфология кремния; в – схема образования двойников в кристаллах кремния; з – кремниевая частица, содержащая внутренние двойники [16]

дения β -фазы Si, которые в таком случае становятся неактивными и не могут расти в виде отдельных кристаллов, и по сути, допускают переохлаждение расплава.

Бимолекулярные пленки Al_2O_3 в расплаве действуют в качестве подложки для первичных Si-зародышей, которые впоследствии могут вырасти в β -фазу. Центры зарождения таких подложек могут быть увеличены образованием AIP. В этом случае использование технологии получения алюминиевых лигатур-модификаторов методом экструзии порошковой шихты из алюминия, ПАВ, тугоплавких и специально активированных для технологии in-situ компонентов существенно расширяет возможности комплексной модификации основных структурных составляющих силумина [17,18].

К числу комплексных модификаторов следует отнести лигатуры, в которых в качестве добавок используют порошки в виде наночастиц [8,17–19]. Для введения и синтеза наноразмерных тугоплавких частиц предлагается так называемая технология in-situ. Сущность ее сводится к тому, что порошки на стадии приготовления лигатур подвергают механоактивации или термической обработке таким образом, что при попадании в расплав они активно взаимодействуют с матричным сплавом, одновременно модифицируя и упрочняя структуру материала. При разработке комплексных модификаторов в последние годы интерес исследователей вызывают наноразмерные ультрадисперсные порошки типа Al_2O_3 , TiC, SiC, NB, SiO_2 , AlN_3 , стеклоуглерод и др., тугоплавкие химические соединения. Модифицирующая способность таких наночастиц базируется на их большом энергетическом потенциале и огромной удельной поверхности, обеспечивающей при незначительном их содержании ~0,1–0,5 мас.% перекрытие площади границ раздела [17].

В результате совместных исследований ФТИ и ОИМ НАН Беларуси [20] разработаны принципы допирования силуминов несмачиваемым диоксидом кремния и нитридом бора. Так, путем активации исходного порошка, увеличением удельной поверхности до 70 раз и нанесением методом химико-термической обработки на такие частицы титана и бора были получены порошки SiO_2 и TiB с образованным слоем тугоплавких соединений TiB, TiB_2 и дисперсного титана. Использование таких порошков в составе экструдированных алюминиевых лигатур способствует значительному (в 2–3 раза) измельчению α -фазы (дендритов). Кроме того, при активации порошков гексагонального нитрида бора была установлена интенсификация его разложения и фазового превращения в очень твердый кубический нитрид бора, что позволяет упрочнить силумины на 20–30 %, повысить износостойкость в 2–3 раза.

В качестве комплексного модификатора, позволяющего не только модифицировать, но и упрочнять структуру силумина, в ФТИ НАН Беларуси разработаны алюминиевые лигатуры-модификаторы [21], содержащие карбамид $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$. Введение таких лигатур в расплав благодаря взаимодействию более активного так называемого атомарного азота (продукта разложения карбамида) с алюминием способствует синтезу в расплаве наноразмерных глобулярных частиц нитридной фазы AlN (до 30 нм) (рис.5).

Сравнительные исследования показали, что все эти синтезируемые тугоплавкие элементы способствуют повышению микротвердости как α -твердого раствора, так и эвтектики. При обработке эвтектического силумина АК12М2МгН (рис. 5) алюминиевыми лигатурами, где в качестве наполнителя использовали $\text{SiO}_{2(\text{BTi})}$ в количестве 5 мас.%, стабильно образуется структура, характерная для заэвтектических силуминов с первичными кристаллами кремния β -фазы. Очевидно, что содержание кремния в этом сплаве увеличивается до 15 мас.% по реакции $\text{SiO}_2 + \text{Al} \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Si}$. В этом случае включения оксидов Al_2O_3 соответствуют наноуровню и также являются дополнительными центрами кристаллизации.

Однако методы модифицирования с помощью тугоплавких частиц имеют ряд недостатков:

- при получении отливок традиционными методами литья, при длительном выстаивании расплава очень трудно достичь равномерности распределения;
- синтез самих ультрадисперсных частиц, способов их подготовки, завышенное количество требуемых модификаторов для эффективного модифицирования требуют существенной корректировки температурно-временных параметров процесса литья при необоснованном уровне достигаемых свойств;
- технологии ввода и стабилизации таких частиц, исключение коагуляции и седиментации требуют использования специальных устройств.

Важным с практической точки зрения остается вопрос, как, не меняя состав силумина (особенно близкого к доэвтектическим эвтектическим типа АК9, Ал 25, АК12М2МгН и др.), целенаправленно добиться гарантированного формирования эвтектической структуры без дендритов α -фазы или заэвтектической структуры с дисперсными включениями кремния. Необходимость в таких сплавах при минимальном содержании кремния (9–12 мас.%) связана с перспективой их использования в трибологических сопряжениях (узлах трения), когда благодаря мелким включениям кремния повышается износостойкость сплава, расширяются температурно-нагрузочные условия эксплуатации [21]. В этом случае улучшается обрабатываемость резанием и расширяются возможности для обработки давлением.

В качестве элемента, оказывающего сильное модифицирующее влияние только на кремниевую эвтектическую составляющую, используется стронций в виде алюминиевых лигатур с содержанием Sr 10–50 мас.%. Этот элемент длительное время (до 2 ч) при инкубационном периоде около 5 мин сохраняет модифицирующее действие. Однако в случае дополнительного использования фосфора для зарождения β -фазы он является дезактиватором. Кроме того, ввиду своей токсичности и вредного влияния на здоровье человека стронций не нашел широкого применения в промышленности. Для модифицирования кремния в эвтектике широкое распространение получил натрий в виде солей NaF , NaCl , Na_3AlF_6 как в отдельности, так и в составе многокомпонентных флюсов [3].

Однако совместное введение натрия с фосфором в составе медьфосфористых лигатур для комплексной обработки не оказывает модифицирующего воздействия, более того приводит к огрублению кристаллов кремния [2] по причине того, что у фосфора сродство с натрием больше, чем с алюминием. В этом случае образуется Na_3P , огрубляющий структуру.

В качестве выхода из этого положения для заэвтектических силуминов (содержание Si 16–22 мас.%) предлагалась двухстадийная обработка. На первой стадии при достаточно высокой температуре (не менее 800–850 °С) вводится фосфор, дается длительная выдержка не менее 15–20 мин, затем при снижении температуры расплава до 760–800 °С добавляется натрий. При этом модифицирующее действие обеспечивается при соотношении $\text{P} : \text{Na} = (3-5) : 1$ (рис.6).

В отличие от специальных технологий литья (непрерывная кристаллизация, гранульные и порошковые процессы, направленная кристаллизация при обработке расплава барием и др.), когда эвтектическая

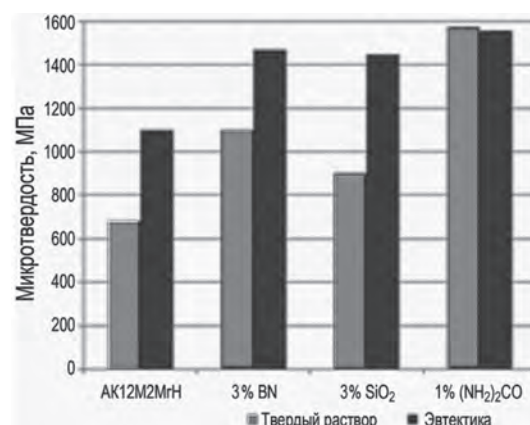


Рис. 5. Значения микротвердости α -твердого раствора и эвтектики исходного и модифицированных сплавов

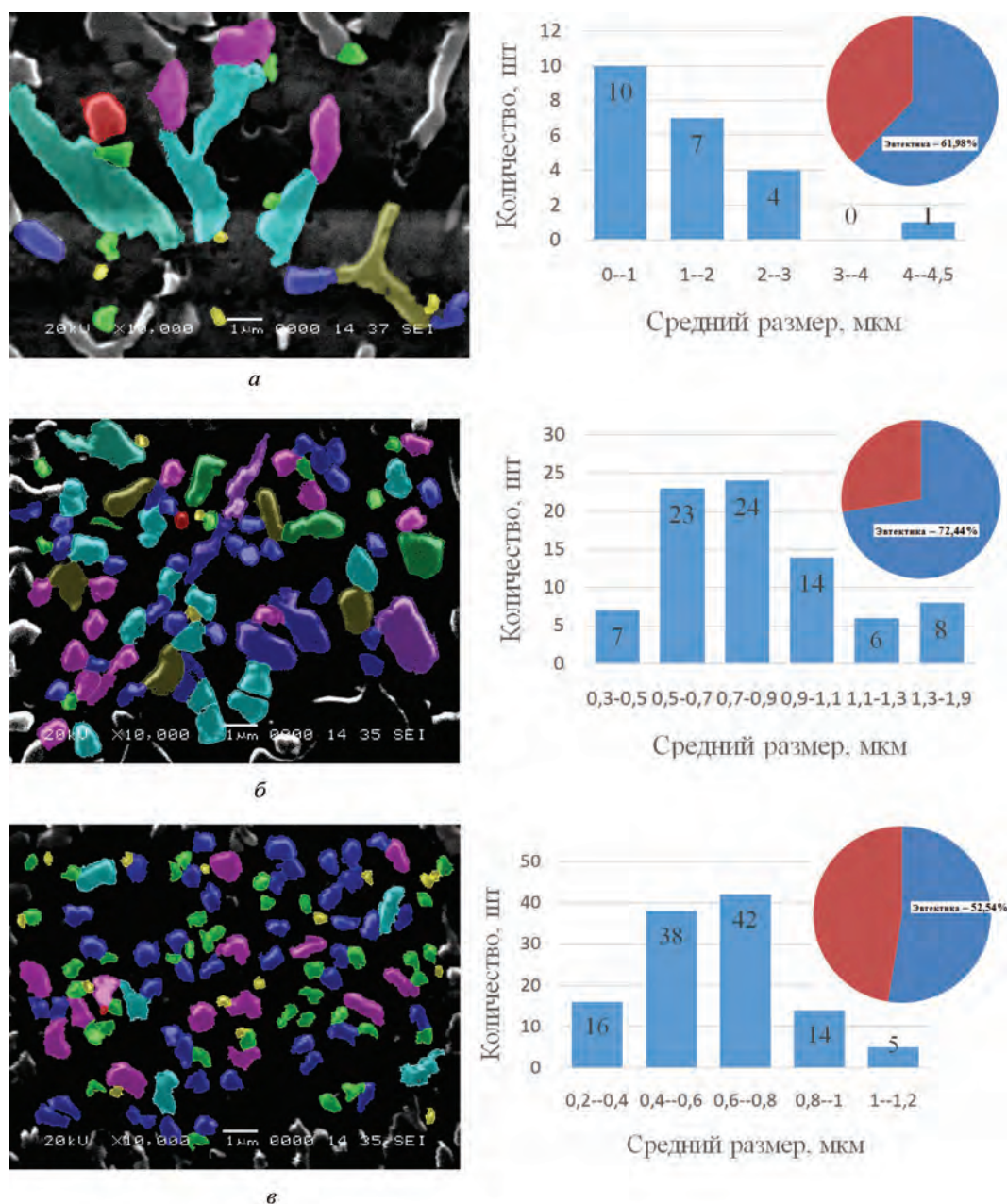


Рис. 6. Микроструктура и номограммы распределения кремния в эвтектике по фракциям в эвтектике силумина АК12М2МгН: а – исходный; б – обработанный лигатурой с NaF; в – обработанный лигатурой с NaPO₃

точка сдвигается в сторону кремния и весь кремний находится в эвтектике, а первичные кристаллы β -фазы появляются только при его содержании 14–20 мас.%, в ФТИ НАН Беларуси [19] предложен способ модифицирования, основанный на смещении эвтектической точки в сторону алюминия (см. рис. 1). Это позволяет экономить кремний и добиться необходимых свойств материала, в первую очередь триботехнических. Достичь положительных результатов удалось благодаря возможности двойного модифицирования бездендритной структуры силумина при использовании экструдированных алюминиевых лигатур, содержащих натриевые соли фосфорных кислот (триполифосфат, метафосфат, трифосфат натрия) из расчета содержания фосфора не более 0,05–0,12 мас. %.

Представленные на рис. 6 сравнительные результаты микроструктуры и номограммы распределения кремния в эвтектике указывают на комплексный характер воздействия трифосфата натрия в составе алюминиевых лигатур. Причем следует отметить его более эффективное воздействие на эвтектический кремний в сравнении с такими сильными модификаторами, как NaF. Ощутимым результатом явился и тот факт, что в структуре доэвтектического АК9, эвтектического АК12М2МгН при кокильном литье стабильно формируются мелкодисперсные кристаллы β -фазы, что позволяет повысить механические

(в том числе пластические) свойства сплава на 40–100 %. Кроме того, уменьшается интенсивность изнашивания на 50–60 %.

Таким образом, благодаря использованию предложенных модификаторов расширяются возможности применения силуминов для более жестких условий форсированной работы в узлах и механизмах машин, в особенности для изделий триботехнического назначения. Обладая достаточным уровнем пластичности (не менее 4–6 %), литейные заготовки из силуминов могут подвергаться обработке давлением для повышения свойств и обеспечения точности формы изделия.

Литература

1. Ковалев Д. А. Исследование и разработка технологии процесса поперечно-винтовой прокатки для повышения пластичности заэвтектических силуминовых сплавов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2011.
2. Модифицирование силуминов стронцием / Под ред. К. В. Горева. Минск: Наука и техника, 1985. 143 с.
3. Мальцев М. В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1964. 212 с.
4. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Модифицирование сплавов. Минск: Беларуская навука, 2009. 192 с.
5. Немененок Б. М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов. Минск: Технопринт, 1999. 272 с.
6. Shamsuzzoha M., Nasrac L., Berry J. Nano-Refinement of Eutectic and Primary Silicon Fibers in Al-Si Alloys for High Strength Structural Applications AFS American Foundry Society, Proceedings 2012, p.12–101.
7. Волочко А. Т., Садох А. М. Алюминий: технологии и оборудование для получения литых изделий. Минск: Беларуская навука, 2011. 387 с.
8. Волочко А. Т., Королев С. П., Галушко А. М., Шегидевич А. А. Анализ структурообразования силуминов // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2013. № 3. С. 18–25.
9. Bang Hong H u, Hang L i. Grain refinement of DIN226S alloy at lower titanium and boron addition levels // Materials Processing Technology. 1998. Vol. 74. P. 56–60.
10. Никитин К. В. Исследование и разработка технологических основ избирательного модифицирования силуминов: Дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2001. 185 с.
11. Venkateswarlu K., Murti B. S., Chacraaborti M. Effect of hot rolling and heat treatment of Al-STi-IB master alloy on the grain refining efficiency of aluminium // Materials Science and Engineering. 2001. Vol. A301. P. 180–186.
12. Nikitin V. I., Jie Wang i, Kandalova E. G., Makarenko A. G., Li Yong g. Preparation of Al-Ti-B grain refiner by SHS technology // Scripta Materialia. 2000. Vol. 42. N 6. February 28. P. 561–566.
13. Nikitin V. I., Merzhanov A. G., Makarenko A. G., Kandalova E. G., Lukyanov G. S. SHS method of production of Al-Ti-B master alloy // Book of Abstracts: 4-th International Symposium on SHS. Toledo, Spain, October 6–9, 1997. P. 64.
14. Jie Wanqi, Kandalova E. G., Zhang Ruijie, Nikitin V. I. Preparation of Al₃Ti/Al composites with SHS method // Rare Metal Materials and Engineering. 2000.
15. Использование комплексного модификатора на основе нанодispersных порошков для повышения качества отливок / А. В. Петридис [и др.] // Технология металлов. 2005. № 1. С. 26–31.
16. Shamsuzzoha M., Juretzko F. R., Haque A. Development of high-strength hypereutectic Al-Si alloys by nano-refining the constituent Si-phases // Aluminum Alloys: Fabrication, Characterization and Application (TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)). 2008. P. 207–211.
17. Чернышова Т. А., Кобелева Л. И., Быков П. А. и др. Наноструктурирование дисперсно-армированных алюмомагнитных композиционных материалов // Физика и химия обработки материалов. 2012. № 4. С. 53–61.
18. Волочко А. Т., Клушин В. А., Соколов В. Н., Овчинников В. В., Изобелло А. Ю. Поршень двигателя внутреннего сгорания. Пат. РБ 6192, 2010.
19. Волочко А. Т., Шегидевич А. А. Способ получения полуфабрикатов из силуминов. Заявка №а20130910; заявл. 30.07.2013.
20. Волочко А. Т., Комаров А. И., Комарова В. И., Изобелло А. Ю. Модифицирующее воздействие субмикронного диоксида кремния, структурированного наночастицами бора и титана, на процесс формирования микроструктуры и свойств поршневого сплава // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2010. № 2. С. 11–19.
21. Волочко А. Т., Изобелло А. Ю., Овчинников В. В. Комплексная обработка силуминов дисперсными частицами и атомарным азотом // Литье и металлургия. 2009. № 3. С. 218–226.

References

1. Kovalov D. A. Issledovanie i razrabotka tehnologii protsessa poperechno-vintovoy prokatki dlya povysheniya plastichnosti zaevtekticheskikh siluminovykh splavov [Research and Development of Helical Rolling Technology for Improvement of Plasticity of Hypereutectic Silumin Alloys: CSc Thesis Abstract]. Moscow, 2011. 16 p.
2. Modifitsirovanie siluminov strontsiem [Modification of Silumins by Strontium]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1985. 143 p.
3. Maltsev M. V. Modifitsirovanie strukturyi metallov i splavov [Modification of Structure of Metals and Alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1964. 212 p.
4. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. Modifitsirovanie splavov [Modification of Alloys]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009. 192 p.
5. Neimenenok B. M. Teoriya i praktika kompleksnogo modifitsirovaniya siluminov [Theory and Practice of Complex Modification of Silumins]. Minsk, Tehnoprint Publ., 1999. 272 p.
6. Shamsuzzoha M., Nasrac L., Berry J. Nano-Refinement of Eutectic and Primary Silicon Fibers in Al-Si Alloys for High Strength Structural Applications AFS American Foundry Society, Proceedings 2012. P. 12–101.

7. Volochko A. T., Sadoha M. A. *Alyuminiy: tehnologii i oborudovanie dlya polucheniya lityih izdeliy* [Aluminum: Technology and Equipment for Manufacturing of Cast Products]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2011. 387 p.
8. Volochko A. T., Korolev S. P., Galushko A. M., Shegidevich A. A. Analiz strukturoobrazovaniya siluminov [Analysis of Structure Formation of Silumins]. *Vestsi NAN Belarusi. Ser. fiz.-tehn. navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Sciences Series*. 2013, no. 3, pp. 18–25.
9. Banghong Hu, Hang Li. Grain refinement of DIN226S alloy at lower titanium and boron addition levels = *Materials Processing Technology*. 74 (1998), pp. 56–60.
10. Nikitin K. V. Issledovanie i razrabotka tehnologicheskikh osnov izbiratel'nogo modifitsirovaniya siluminov [Research and Development of Technological Basis of Selective Modification of Silumins]. *CSc Thesis*. Vladimir, 2001. 185 p.
11. Venkateswarlu K., Murti B. S., Chacraaborti M. Effect of hot rolling and heat treatment of Al-STi-IB master alloy on the grain refining efficiency of aluminium. *Materials Science and Engineering*. 2001. Vol. A301, pp. 180–186.
12. Nikitin V. I., Jie Wangi, Kandalova E. G., Makarenko A. G., Li Yong. Preparation of Al-Ti-B grain refiner by SHS technology. *Scripta Materialia*, 2000. Vol. 42, no. 6, February 28, pp. 561–566.
13. Nikitin V. I., Merzhanov A. G., Makarenko A. G., Kandalova E. G., Lukyanov G. S. SHS method of production of Al-Ti-B master alloy. *Book of Abstracts: 4-th International Symposium on SHS*. Toledo, Spain, October 6–9, 1997, p. 64.
14. Jie Wanqi, Kandalova E. G., Zhang Ruijie, Nikitin V. I. Preparation of Al₃Ti/Al composites with SHS method. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2000.
15. Ispolzovanie kompleksnogo modifikatora na osnove nanodispersnykh poroshkov dlya povysheniya kachestva otlivok [Application of a Complex Modifier based on Nanodispersed Powders for Improvement of Cast Quality]. A. V. Petridis [and others]. *Tehnologiya metallov = Metals Technology*. 2005, no. 1, pp. 26–31.
16. Shamsuzzoha M., Juretzko F. R., Haque A. Development of high-strength hypereutectic Al-Si alloys by nano-refining the constituent Si-phases // *Aluminum Alloys: Fabrication, Characterization and Application* (TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)), 2008, pp. 207–211.
17. Chernyishova T. A., Kobeleva L. I., Byikov P. A., Bolotova L. K., Kalashnikov I. E., Volochko A. T., Izobello A. Yu. Nanostrukturirovanie dispersno-armirovannykh alyumomatrichnykh kompozitsionnykh materialov [Nanostructuring of Dispersion-reinforced Aluminum Matrix Composite Materials]. *Fizika i himiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Processing*, 2012. no. 4, pp. 53–61.
18. Volochko A. T., Klushin V. A., Sokolov V. N., Ovchinnikov V. V., Izobello A. Yu. *Porshen dvigatelya vnutrennego sgoraniya* [Piston of Internal Combustion Engine]: BY Patent No. 6192, 2010.
19. Volochko A. T., Shegidevich A. A. Sposob polucheniya polufabrikatov iz siluminov [Method of Production of Semi-finished Products from Silumins]. *Application No. a20130910*; submitted 30.07.2013.
20. Volochko A. T., Komarov A. I., Komarova V. I., Izobello A. Yu. Modifitsiruyushee vozdeystvie submikronnogo dioksida kremniya, strukturirovannogo nanochastitsami bora, ititana, na protsess formirovaniya mikrostruktury i svoystv porshneвого сплава [Modifying Effect of Submicron Silicon Dioxide Structured with Nanoparticles of Boron and Titanium on Formation of Structure and Properties of Piston Alloy]. *Vestsi NAN Belarusi. Ser. fiz.-tehn. navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Sciences Series*. 2010, no. 2, pp. 11–19.
21. Volochko A. T., Izobello A. Yu., Ovchinnikov V. V. Kompleksnaya obrabotka siluminov dispersnyimi chastitsami i atomarnym azotom [Complex Treatment of Silumins Using Dispersed Particles and Atomic Nitrogen]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and Metallurgy*. 2009, no. 3, pp. 218–226.

Сведения об авторах

Волочко Александр Тихонович, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, ул. Купревича, 10, 220141, г. Минск, Республика Беларусь, E-mail: volochkoat@mail.ru. Тел.: +375296756862.

Information about the authors

Volochko Alexander, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevich Str., Minsk, 220141, Belarus, E-mail: volochkoat@mail.ru. Tel.: +375296756862.



УДК 621.74

Поступила 18.11.2015

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И УРОВНИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ

MANUFACTURING CAPABILITIES AND THE LEVELS OF THE MOLD CORES QUALITY MANAGEMENT

*И. Н. ПРУСЕНКО, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого,
г. Гомель, Беларусь*

I. N. PRUSENKO, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj, Gomel, Belarus

Рассмотрены возможности управления свойствами исходных материалов в стержневой смеси, процессами смешивания, формообразования, а также условиями технологической подготовки литейных стержней для формирования качественных бездефектных внутренних поверхностей отливок с требуемой геометрической, размерной точностью и шероховатостью.

The possibilities of the management of the original material properties in the mold core blend, the processes of molding sand preparation, shaping and the conditions of technological preparation of mold cores for shaping high quality defect-free internal surfaces of the castings with required geometric relationship, dimensional accuracy and the surface roughness are considered.

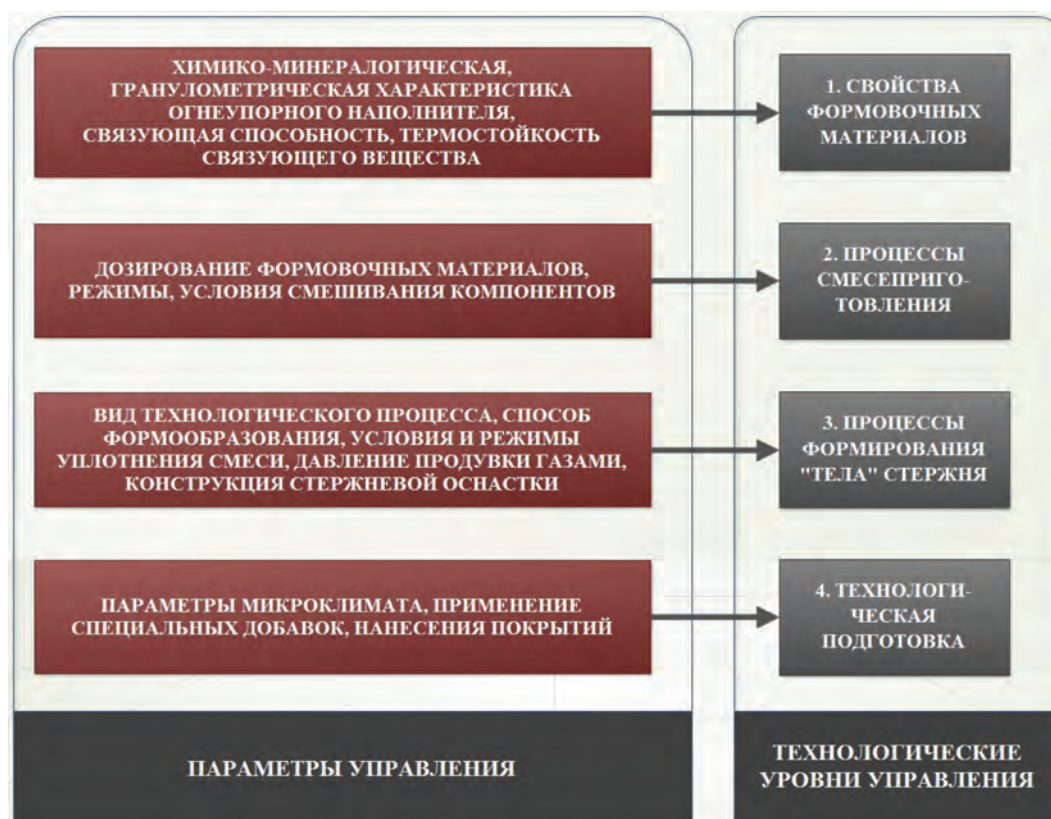
Ключевые слова. *Литейные стержни, свойства формовочных материалов, процессы смешивания, процессы формообразования, технологическая подготовка.*

Keywords. *Mold core, properties of molding materials, processes of molding sand preparation, processes of shaping, technological preparation.*

Качество внутренних поверхностей отливок определяется критериями размерной и геометрической точности, шероховатостью поверхности, а также отсутствием дефектов на стенках внутренних полостей отливок. Все эти показатели формируются в процессе заливки, кристаллизации и охлаждения сплава в литейной форме в результате процессов физико-химического взаимодействия, протекающих в зоне контакта металл-стержень. При этом литейный стержень является основным элементом, эксплуатационные свойства которого предопределяют указанные параметры качества внутренних поверхностей отливок.

Формирование размерной и геометрической точности внутренних поверхностей отливок характеризуется соответствием геометрических и размерных характеристик литейного стержня, заданным при его проектировании, и, в основном, определяется точностью модельной оснастки, характеристиками плотности и теплофизическими свойствами стержня. При этом плотность стержня характеризуется абсолютным значением и равномерностью распределения, зависит от реологических свойств стержневой смеси, режимов и условий формирования «тела» стержня (условия уплотнения, продувки катализаторами или отвердителями, температурного воздействия). Теплофизические свойства литейного стержня в данном случае характеризуют возможные изменения геометрических, линейных размеров и объема стержня при длительном воздействии высоких температур. Они определяются совокупностью таких характеристик огнеупорного наполнителя, как огнеупорность, теплоемкость, теплопроводность, коэффициент объемного расширения зерна песка. Шероховатость поверхности литейного стержня зависит, главным образом, от состава стержневой смеси (гранулометрический состав), параметров смешивания (соотношение компонентов смеси, качество их смешивания), режимов и условий формирования стержня (степень и равномерность уплотнения), а также от условий технологической подготовки (нанесения красок, антипригарных покрытий).

Формирование качественных бездефектных внутренних поверхностей отливок с требуемой геометрической, размерной точностью и шероховатостью возможно посредством управления свойствами литейных стержней (см. рисунок).



Принципиальная схема управления качеством внутренних поверхностей отливок

Здесь следует выделять четыре технологически возможных уровня управления: управление свойствами формовочных материалов, процессами смесеприготовления, процессом формирования «тела» стержня, параметрами условий технологической подготовки литейного стержня. Принципы управления заключаются в оптимизации технологических параметров процесса их производства и подготовки по следующим группам факторов: свойства исходных формовочных материалов, свойства стержневой смеси, свойства стержня, условия технологической подготовки стержней к использованию.

Сущность управления качеством внутренних поверхностей отливок заключается в обеспечении заданного комплекса эксплуатационных свойств литейного стержня. Такое обеспечение формируется качеством исходных формовочных материалов и реализуется за счет управления на различных стадиях процесса изготовления и подготовки литейного стержня к использованию.

Основная возможность формирования заданных свойств литейного стержня связана с оптимальным подбором формовочных материалов: огнеупорного наполнителя, связующих компонентов, комплексных добавок. В основе подхода к выбору компонентов стержневой смеси лежит принцип химической, термической инертности к расплаву металла, минимизируя процессы механического, термического, химического и газового воздействия. Известно [1], что только огнеупорный наполнитель является относительно инертным материалом, формирующим физико-механические и теплофизические свойства литейного стержня. Все остальные составляющие композиции стержневой смеси являются, по сути, вредными, вынужденно используемыми материалами, проявляющими активность в условиях воздействия жидкого расплава на литейный стержень. Связующие материалы вынужденно применяются, в первую очередь, для придания прочности стержневой смеси, стабилизируя ее структуру, тем самым, обеспечивая возможность формирования литейного стержня. Вместе с тем, наличие связующих компонентов снижает пористость структуры стержневой смеси, вносит значительное количество газовыделений в зоне контакта металл-стержень, засоряет стержень твердыми частицами продуктов сгорания, препятствуя отводу газов и тепла. Исходя из этого, количество связующего материала должно быть минимально достаточным, чтобы структура литейного стержня удовлетворяла процессам теплопередачи, была устойчива к механическим воздействиям, соответствовала условиям образования и отвода газов.

Степень реализации свойств формовочных материалов значительно зависит от процессов смесеприготовления, формообразования, технологической подготовки стержня. Основной задачей управления па-

раметрами качества литейных стержней на уровне процессов смесеприготовления является достижение требуемого уровня физико-механических свойств стержневой смеси при минимально возможном содержании связующей композиции и вспомогательных добавок. Такая возможность обеспечивается при сочетании двух условий: наличие оптимального соотношения компонентов смеси и условий смешивания, обеспечивающих эффективное равномерное распределение связующей композиции и добавок на поверхности частиц огнеупорного наполнителя минимально тонким равномерным слоем. Поэтому процессы смешивания и приготовления стержневых смесей следует рассматривать как процесс интенсификации свойств и взаимодействия формовочных материалов.

Соответственно условия равномерного распределения компонентов стержневой смеси, обеспечивающие минимально допустимую толщину оболочки связующего материала на поверхности наполнителя, формирование манжет имеют важное значение в формировании литейным стержнем заданных эксплуатационных свойств, в первую очередь, прочностных, а также газопроводящих и теплофизических.

При формировании стержня следует исходить из необходимости обеспечения равномерности распределения его механических, тепло- и газопроводящих свойств. В этом отношении стабильность структуры стержневой смеси, обеспеченная эффективным смесеприготовлением, в определенной мере предопределяет возможность обеспечения равномерности свойств стержня. Однако на практике такая возможность будет реализована лишь в случае равномерного уплотнения стержневой смеси по всему объему стержня. Поэтому управление параметрами качества литейного стержня на стадии его формирования заключается в создании определенных условий формообразования, учитывающих конструктивные особенности и требования к стержню. Кроме того, в реальных условиях для сложных литейных стержней зачастую требуются дифференцированные свойства отдельных его элементов. Решение такой сложной задачи возможно лишь сочетая возможности управления на стадиях проектирования и формообразования стержня. В связи с этим подготовка подобных решений на основе данных компьютерного моделирования условий работы литейных стержней является актуальной научной и практической задачей.

Управление на уровне «Технологическая подготовка литейных стержней» предполагает проведение полной структуризации стержневой смеси на стадии сформированного литейного стержня, стабилизации комплекса эксплуатационных свойств. В результате структура литейного стержня приобретает окончательные свойства: происходит более полная полимеризация связующих компонентов, в результате чего литейный стержень набирает окончательную прочность, снижается возможность газовыделений при термической деструкции. Кроме того, данный этап предполагает проведение дополнительных мероприятий для корректировки сформированных эксплуатационных свойств литейного стержня через нанесение огнеупорных антипригарных покрытий и красок.

Литейное производство, являясь многономенклатурным, зачастую охватывает производство отливок различных по массе, габаритным размерам, группам сложности и др. В соответствии с этим в процессе заливки создаются разные условия при формировании внутренних поверхностей отливок, связанные с различной интенсивностью теплоотвода, процессами газообразования и газовыделения, условиями формирования термических напряжений и др. Поэтому при выборе базовой технологии и разработке механизмов управления качеством внутренних полостей отливок следует учитывать специфику и условия работы литейных стержней под воздействием жидкого металла.

Литература

1. Б р е ч к о, А. А. Формовочные и стержневые смеси с заданными свойствами / А. А. Бречко, Г. Ф. Великанов. Л.: Машиностроение, 1982. 216 с.

References

1. B r e c h k o A. A., V e l i k a n o v G. F. *Formovochnye i sterzhnevye smesi s zadannymi svojstvami* [Molding and core mixtures with desired properties]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1982. 216 p.

Сведения об авторе

Прусенко Иван Николаевич, УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого». Пр. Октября 48, Гомель, Республика Беларусь. E-mail: inprusenko@gmail.com. Тел.: + 375 29 535 69 01.

Information about the author

Prusenko Ivan, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj. Oktober Avenue 48, Gomel, Republic of Belarus. E-mail: inprusenko@gmail.com. Tel.: + 375 29 535 69 01.



УДК 666.3/7

Поступила 08.10.2015

ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРИ ЛИТЬЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ INSULATING CERAMIC INSERTS FOR CASTING PRODUCTS FROM ALUMINUM ALLOYS

А. Т. ВОЛОЧКО, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь

A. T. VOLOCHKO, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

В статье рассмотрены вопросы изготовления керамических теплоизолирующих элементов-вставок для многократного использования при кокильном литье алюминиевых сплавов. Представлены результаты изготовления керамических изделий из синтезированных материалов на основе волластонита, вторичного шамота, алюминиевого шлака и др. Показана перспективность их применения.

The paper analyses production of reusable ceramic insulating inserts applied in permanent mold casting of aluminum alloys. It presents results of manufacturing of ceramic products from synthesized materials based on wollastonite, secondary grog, aluminum slag, etc. The paper demonstrates prospects of their applying.

Ключевые слова. Отливка, кокильное литье, керамический теплоизолирующий элемент-вставка, волластонит, алюминиевый шлак, вторичный шамот, теплопроводность, термостойкость керамики.

Keywords. Casting, permanent mold casting, ceramic insulating inserts, wollastonite, aluminum slag, secondary grog, thermal conductivity, ceramics thermostability.

Изготовление изделий методом литья включает заливку расплавленного металла в форму, затвердевание и извлечение отливки из формы. Назначение литниковой системы (в том числе прибылей) заключается в обеспечении спокойного заполнения формы расплавом и в подпитке кристаллизующейся отливки, когда в ней происходят усадка, удаление газов, примесей и шлака. Металл в прибыльной части должен поддерживаться в жидком состоянии более длительное время, чем в отливке. При использовании металлических кокилей (рис. 1) из-за высокого коэффициента теплопроводности прибыльная часть может составлять до 40–50% массы отливки. В последующем этот объем металла идет на переплав, причем около 4–5% его выгорает безвозвратно. Кроме того, при переплаве дополнительно расходуются энергия и трудовые затраты.

В качестве предложений гарантированного удержания тепла и более длительного сохранения расплава в жидком состоянии в прибыльной части отливки предлагается использование экзотермических и теплоизоляционных материалов с низким коэффициентом теплопроводности для изолирования рас-

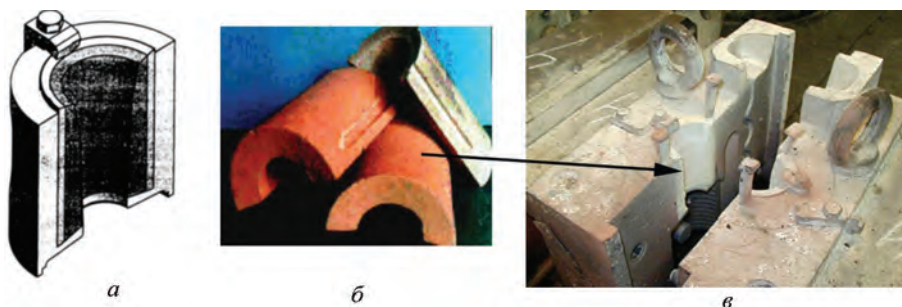


Рис. 1. Схема расположения керамического утеплительного элемента многократного использования: а – биметаллическое исполнение вставки; б – моноисполнение вставки; в – кокиль для литья с керамической вставкой

плава от контакта с формой. В этом случае необходимый объем прибыльной части снижается до 10–30% объема отливки.

Так, в литейном производстве как черных, так и цветных металлов и сплавов для поддержания тепла и разогрева достаточно широко используются экзотермические материалы. В качестве восстановителя для экзотермических смесей чаще всего используется алюминиевый порошок в количестве 10–30 мас.%, а в качестве окислителей – оксиды металлов ZnO , CuO , Fe_2O_3 , SiO_2 , NiO , Mn_3O_4 , SnO и др. [1–3]. При использовании таких вставок давление, создаваемое в закрытой прибыли за счет протекания экзотермической реакции, является существенным фактором для обеспечения питания отливки даже в условиях, когда высота отводной прибыли меньше высоты питаемого узла отливки. После окончания экзотермической реакции материал оболочки сохраняет свои теплоизоляционные свойства, продолжая обеспечивать направленное затвердевание в отливке. Одним из ограничивающих факторов широкого использования таких вставок является вероятность загрязнения металла продуктами экзотермических реакций. Кроме того, экзотермические вставки – это одноразовый продукт, что значительно удорожает стоимость отливки.

В отличие от экзотермических использование керамических многоразовых утеплительных элементов, отличающихся высокой термостойкостью, позволяет получать не менее 1000 отливок.

В Физико-техническом институте НАН Беларуси для металлургического производства, в первую очередь алюминиевых сплавов, разработан ряд керамических материалов на основе синтетического сырья, вторичных ресурсов, отходов производства [4–6]. В качестве синтезированного сырья применяли искусственный волластонит $CaSiO_3$, а в качестве вторичного сырья, отходов производства – бой шамотных и магнезиальных огнеупоров, окалину, алюминиевый шлак и др.

В процессе исследований предложены конструкции разъемных и неразъемных утеплительных вставок в моно- и биметаллическом исполнении (рис. 1) [6,7].

Среди опробованных технологий формования утеплительных вставок различной пористости использовали прессование в жестких пресс-формах и виброуплотнение. Общая схема форм для получения вставок приведена на рис. 2.

При создании керамического материала с использованием вторичного шамота исходили из следующих положений:

1. Шамот в качестве заполнителя составляет жесткий скелет и сохраняет постоянство объема, уменьшает формовочную влажность, усадку и вовлекается в химические процессы только с поверхности частиц. В шихте эта фракция является основной (до 60–70 мас.%) по массе и объему.

2. Высокопрочная глина, бентонит – это сырье, обеспечивающее при оптимальном содержании 10–15 мас.% в силу своих пластифицирующих свойств формуемость шихты. При большем ее содержании происходят объемные изменения при термообработке, что приводит к образованию трещин.

3. Алюминиевый шлак характеризуется постоянством объема при термообработке, поэтому при смешивании с высокопрочной глиной может использоваться как тонкомолотая добавка, повышающая тер-

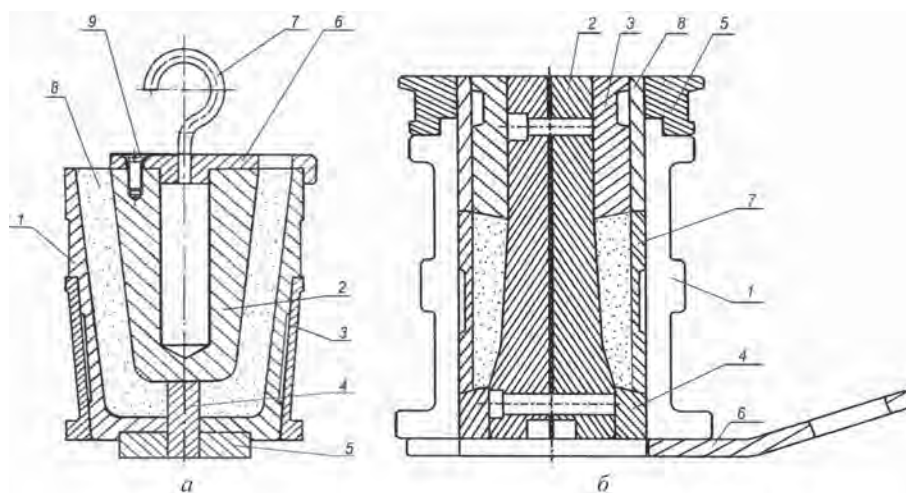


Рис. 2. Форма для получения заготовок из керамического материала: а – 1 – полуматрица; 2 – стержень; 3 – подкладное кольцо; 4 – выталкиватель; 5 – кольцо; 6 – крышка; 7 – крюк; 8 – керамическая вставка; 9 – винты и пресс-форма для прессования утеплительной вставки; б – 1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – полуштулка; 4 – полукольцо; 5 – кольцо; 6 – вилка; 7 – вкладыш; 8 – вкладыш верхний

мо- и шлакоустойчивость материала и активно участвующая в физико-химических процессах, протекающих при термообработке.

Для материала, выполненного на основе вторичного шамота измельченного до размера менее 500 мкм, в качестве добавок размером до 100–300 мкм использовали огнеупорные глины, полые микросферы на основе алюмосиликатов до 5 мас.%, алюминиевый шлак до 10–15 мас.%

В качестве связующего, позволяющего производить термообработку полученных изделий при невысоких температурах 560–590 °С, наиболее эффективными оказались шлакофосфатные связки и другие фосфоросодержащие компоненты (ортофосфорная кислота, триполифосфат натрия). Кроме того, фосфоросодержащие компоненты обеспечивают в структуре такой керамики за счет образования фосфатов металлов очень высокую термо- и шлакоустойчивость [8]. Причем использование фосфоросодержащих компонентов должно определяться таким количеством, чтобы обеспечить в материале содержание P_2O_5 в пределах 5–7 %. Влажность шихты для технологичности при различных методах формования обеспечивается корректировкой воды. Смесь должна характеризоваться подвижностью не более $2 \cdot 10^{-2}$ м по осадке конуса в соответствии с ГОСТ 10181.1–81. Алюмофосфатные растворы получали при соотношении $P_2O_5/Al_2O_3 = 3:4$.

Свойства утеплительной керамики также определяются пористостью, выбором процесса формования. Так, при увеличении пористости снижаются конструкционная прочность, шлакоустойчивость, уменьшается коэффициент теплопроводности. В связи с этим при выборе технологии формования необходимо определиться с конструкцией вставки и требованиями к свойствам материала.

Как показала практика, наиболее перспективным для получения утеплительных элементов в моно- и биметаллическом исполнении из вторичных ресурсов и синтетического сырья является прессование в жестких пресс-формах, позволяющее в широких пределах менять пористость и конечные свойства материала.

Для определения давления прессования и его влияния на прочность керамики экспериментально установлена зависимость остаточной пористости P от давления при различной концентрации связующего (рис. 3). Увеличение концентрации связующего несколько снижает давление прессования. Так, для получения пористости заготовок менее 10% необходимо давление более 60–70 МПа.

Попытка получения изделий пластическим методом формования при содержании связующего более 20% не дало положительных результатов по причине разогрева образца, его вспучивания и растрескивания. Кроме того, при хранении на образцах выявлен белый кристаллический налет, идентифицированный как гидроксид алюминия $Al(OH)_3$.

Для повышения механической прочности образцов после прессования, необходимой при их транспортировке и последующей термообработке, в состав керамики вводили добавки, среди которых опробованы аглопоритовая и керамзитовая пыль, бентонит, высокопрочная глина. Наиболее эффективными и доступными являются огнеупорная глина, бентонит. Вместе с тем, отмечено [9], что увеличение их содержания приводит к снижению огнеупорности при температуре более 1600–1700 °С. Однако при литье алюминиевых сплавов ($T < 1000$ °С) и для обеспечения коэффициента теплопроводности 0,3–0,5 Вт/(м·К) эти добавки наиболее приемлемые.

Использование в качестве добавок частиц алюминиевого шлака повышает механическую прочность, термо- и шлакоустойчивость (рис. 4). Однако его количество в керамике ограничивается 25–30%. В процессе термообработки образцов также происходит их вспучивание и растрескивание, нарушается сплошность материала.

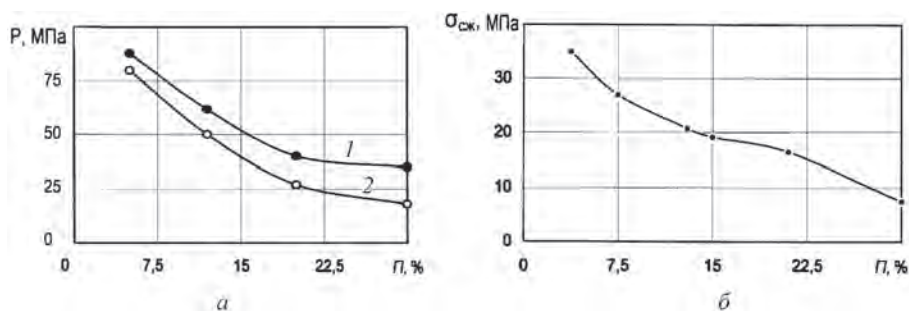


Рис. 3. Прессуемость керамических вставок, изготовленных из шихты на основе шамота с добавками 10% алюминиевого шлака и 10% бентонита при содержании связующего ортофосфорной кислоты 10% (1) и 20% (2) (а) и зависимость прочности керамики при добавлении 10% ортофосфорной кислоты от ее пористости (б)

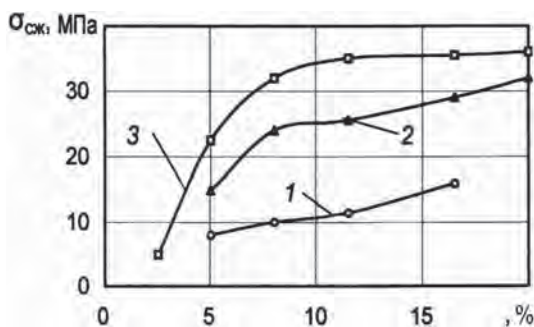


Рис. 4. Влияние количества связующего (ортофосфорная кислота) и пластифицирующей добавки – бентонита на прочность КОМ на основе шамота с 30% алюмошлака: 1 – влияние ортофосфорной кислоты; 2 – влияние бентонита; 3 – совместное влияние ортофосфорной кислоты и бентонита

Наряду с керамическими материалами из вторичного шамота, алюминиевого шлака особый интерес при изготовлении вставок представляют частицы из волластонита CaSiO_3 , относящегося к цепочным силикатам и имеющего волокнистую форму (рис. 5). Этот интерес связан с ухудшающейся в мире экологической обстановкой и сегодня он широко используется в качестве заменителя, вредного для здоровья из-за своего канцерогенного эффекта, асбеста. Причем, как показывает мировая практика, в объеме производства изделий из волластонита предпочтение отдается синтезированному волластониту, который также может быть получен из отходов производства [11, 12]. Он нашел широкое применение в качестве добавок-наполнителей в цветной металлургии, производстве огнеупоров, технологии производства цемента и др.

Особенность волластонита – инертность к химическому взаимодействию с расплавом алюминия, что позволяет использовать его в металлургии алюминия и его сплавов. Важными параметрами, определяющими свойства изделий из волластонита, являются дисперсность порошков, соотношение длины и диаметра частиц.

Для получения керамических вставок использовали синтезированный β -волластонит (соотношение длины и диаметра не более (10–15):1) размером до 40 мкм.

Образцы керамики готовили следующим образом. Смешивали волластонит с компонентами (глина, цемент) при различном массовом соотношении. Содержание волластонита изменяли в пределах 50–100 мас.%, в качестве добавок использовали высокоогнеупорную глину Веселовского месторождения, портландцемент М500, диспергированный шамот фракции менее 500 мкм. Кроме того, использовали добавки алюминиевого шлака дисперсностью менее 315 мкм. В состав добавки входили: шлак – 30–35 мас.%, шамот – 30–35, глина – 30–35% на основе алюминий-бор-фосфатной связки. Затем полученную смесь формовали полусухим прессованием при давлении 30 МПа. Опытные образцы сушили при 120 °С и обжигали при температуре до 1100 °С. Затем определяли физико-химические свойства по стандартным методикам.

Как показали исследования, наименьшей прочностью на изгиб (2–5 МПа) обладает материал, полученный на основе цементного связующего.

Как следует из рис. 6, достаточной прочностью при минимальной пористости обладают образцы, полученные на основе системы волластонит-глина. При этом с увеличением доли глинистой составляющей

Использование сферолизированных частиц керамики (полых микросфер), заполненных двуокисью азота, существенно снижает коэффициент теплопроводности материала до значений $\lambda = 0,2–0,3$ Вт/(м·К), способствует более длительному удержанию тепла вставкой [10].

Таким образом, эффективность введения алюминиевого шлака в состав шихты для получения вставок обеспечивается в комплексном сочетании гранулометрического состава с содержанием других составляющих (связующее 7–12%; пластифицирующие добавки 10–30%).

При увеличении пористости вставок от 5–8 до 20–25% снижается предел прочности при сжатии почти в 2 раза (с 30–35 до 14–18 МПа), что может привести к уменьшению количества заливок от использования одной керамической вставки.

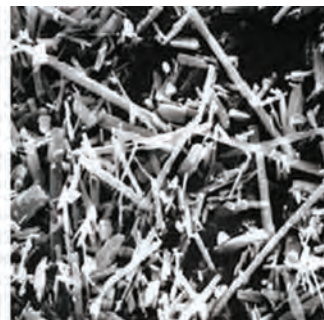
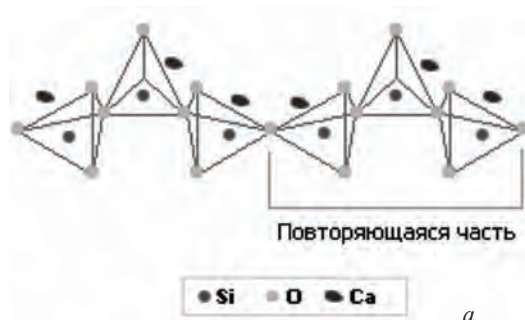


Рис. 5. Структура волластонита, характеризующаяся повторяющимися, переплетенными тройными четырехгранниками кварца, имеет волокнистую структуру (а) и кристаллы искусственного волластонита (б). б – $\times 1700$

щей повышается прочность и снижается пористость. Керамические изделия, полученные на основе синтетического волластонита и добавок огнеупорной глины, в зависимости от содержания 30–50 мас.% имеют прочность на изгиб 8–16 МПа и прочность на сжатие 20–50 МПа, что вполне приемлемо для вставок утеплителей прибыли.

Кроме того, ассортимент таких изделий имеет более широкую область применения, и, в первую очередь, для металлургии алюминия и его сплавов. Это изделие в виде тепловых насадок, подводящих лотков, дозаторов литейных форм и др.

Гарантированное удержание тепла при использовании керамических вставок определяется не только низким коэффициентом теплопроводности материала (не более 0,3–0,5 Вт/(м·К)), но и толщиной используемой вставки. Так, на примере кокильного литья поршней дизельных двигателей массой ~ 4,5 кг выполнен расчет и получены экспериментальные данные, показывающие возможность нахождения металла в расплавленном состоянии в прибыльной части до 10 мин, что позволяет получить отливку без погрешностей кристаллизации и уменьшить прибыльную часть до 10 % массы отливки.

Утеплительные вставки прибыльной части, изготовленные из разработанной керамики, позволяют изменять их теплофизические свойства и, тем самым, регулировать процесс питания получаемой отливки. Необходимость учета изменения коэффициента теплопроводности иллюстрируется на примере расчета скорости кристаллизации $d\zeta/dt$ алюминиевого сплава, залитого в утеплительную вставку, изготовленную из керамики.

Величина коэффициента теплопроводности алюминиевых сплавов обычно составляет примерно 70–150 Вт/(м·К).

Сравнение этих данных с коэффициентом теплопроводности материала утеплительной вставки свидетельствует о том, что процесс теплообмена между закристаллизовавшейся коркой металла у стенки вставки и самой стенкой будет характеризоваться критерием $Bi_1 \ll 1$ [13, 14]. Тогда для оценки скорости роста твердой корки металла в результате его охлаждения в объеме утеплительной вставки можно использовать следующую формулу:

$$U = \frac{Q_1}{\frac{LX_1}{Bi_1} \zeta}. \quad (1)$$

Здесь

$$L = \frac{\rho_1}{c_1(t_s - t_c)}; \quad Bi_1 = \frac{\alpha_1 X_1}{\lambda_1}, \quad (2)$$

где Q_1 – коэффициент температуропроводности отливки; α_1 – коэффициент теплоотдачи поверхности отливки; ρ_1 – удельная теплота кристаллизации металла отливки; c_1 – удельная теплоемкость отливки; ζ – толщина затвердевшей корки отливки; t_s – температура солидуса сплава; t_c – температура среды.

Как следует из (1), минимальная скорость затвердевания имеет место в начале процесса, когда толщина затвердевшей корки отливки $\zeta = 0$. Далее по мере увеличения ζ скорость затвердевания возрастает и максимальная линейная скорость затвердевания имеет место на оси цилиндрической отливки в конце процесса затвердевания.

В формулу (1) толщина стенки утеплительной вставки явным образом не входит. Но при выборе температуры среды t_c оказывается, что она зависит от толщины стенки утеплительной вставки X_2 . Согласно формулам (2), эту зависимость приблизительно можно представить так:

$$t_c \sim \frac{t_s + t_o f(X_2)}{1 + f(X_2)}, \quad (3)$$

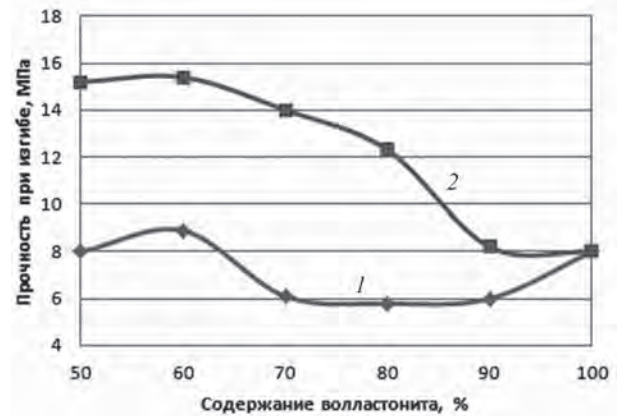


Рис. 6. Изменение прочности различных систем керамических изделий при изгибе в зависимости от содержания волластонита: 1 – волластонит (шлак-шамот-глина); 2 – волластонит-глина

$$f(X_2) = \frac{\lambda_2 n_2}{\alpha_1 X_2},$$

где λ_2 – коэффициент теплопроводности материала утеплительной вставки; n_2 – показатель параболы температурного поля в утеплительной вставке; t_0 – температура окружающей среды.

Для конкретных размеров отливки и утеплительной вставки проведен анализ величины скорости кристаллизации отливки согласно формулам (1)–(3). Имеем $\lambda_1 = 120$ Вт/(м·К), $\lambda_2 = 0,5$ Вт/(м·К); $C_1 = 900$ Дж/(кг·К); $t_s = 600$ °С; $t_0 = 20$ °С; $\rho_1 = 3,8 \cdot 10^5$ Дж/кг; $Q_1 = 5 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $n_1 = 1,25$; $n_2 = 0,5$; $X_1 = 20$ мм; $X_2 = 20$ мм. Так как жидкий металл в утеплительной вставке является прибылью, то толщина ее затвердевшей корки ζ должна быть как можно меньше, чтобы прибыль могла выполнять свою непосредственную функцию источника жидкого металла. Примем, что $\zeta = 4$ мм, тогда скорость кристаллизации составляет примерно 0,05 мм/с. При этом утеплительная вставка прогреется на всю толщину и температура ее внешней поверхности повышается на 10–50 град. Из этого можно сделать вывод, что вставку с толщиной стенки 20 мм в тепловом отношении можно рассматривать как бесконечное тело.

Если принять, что $\zeta = 4$ мм и уменьшать толщину стенки вставки X_2 , то, согласно формуле (1) и результатам расчета, скорость кристаллизации начинает существенно зависеть от X_2 , лишь когда X_2 становится меньше 7 мм. Например, при $\zeta = 4$ мм и $X_2 = 5$ мм, $U_2 = 0,04$ мм/с. Однако утеплительная вставка толщиной стенки $X_2 = 5$ мм не обладает достаточной механической прочностью, чтобы служить в качестве утеплительной вставки прибыльной части отливки.

Таким образом, при выборе толщины стенки утеплительной вставки, ее конструкции с учетом свойств материала необходимо исходить, прежде всего, из условий обеспечения: технологичности изготовления на всех этапах производства; конструктивной прочности материала на уровне $\sigma_{сж} > 10$ –25 МПа; $\sigma_{сж} > 8$ –10 МПа и невысокого (менее 0,3–0,5 Вт/(м·К)) коэффициента теплопроводности; термостойкости, обеспечивающей многократное использование (не менее 800–1000 заливок).

Литература

1. Смирнов В. Н., Ярополов И. И. Патент RU № 2017575. Состав экзотеплоизоляционной смеси для обогрева прибылей, 1994.
2. Ласковнев А. П., Овчинников В. В., Волочко А. Т., Макарова Ж. Е., Чурко Н. А. Патент РБ № 1577. Утеплительная вставка для алюминиевых сплавов, 2004.
3. <http://www.rantal-impex.ru>
4. Волочко А. Т., Ласковнев А. П., Овчинников В. В., Жданович О. Е. Патент РБ № 1075. Утеплительная вставка для литья алюминиевых сплавов, 2003.
5. Волочко А. Т., Подболотов К. Б., Дятлова Е. М. Огнеупорные и тугоплавкие керамические материалы. Минск: Беларуская навука, 2013. 385 с.
6. Волочко А. Т. Переработка и использование алюминиевых отходов в производстве порошков, паст, композиционных и керамических материалов. Минск: Беларуская навука, 2006. 302 с.
7. Ласковнев А. П., Овчинников В. В., Жданович О. Е. Производство алюминиевых поршней для высокофорсированных двигателей внутреннего сгорания. Минск: Экоперспектива, 2004. 190 с.
8. Волочко А. Т. Синтез огнеупорной керамики на основе фосфатного связующего и многокомпонентных систем оксидов // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2013. № 2. С. 33–40.
9. Розанова В. С., Довбыш А. В. Пути улучшения стойкости огнеупорных материалов, применяемых в производстве алюминия // Технология легких сплавов. 1981. № 9. С. 20–22.
10. Пат. РБ № 9508. Огнеупорная керамическая масса. 2007.
11. Керамика из природного волластонита для литейных установок алюминиевой промышленности / Л. Н. Русанова [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. 2008. № 5. С. 39–44.
12. О применении волластонита в производстве композиционных строительных материалов и изделий на основе цемента / В. И. Эйрих [и др.] // Строительные материалы. 2002. № 1. С. 14.
13. Вейник А. И. Теория затвердевания отливки. М.: Машиностроение, 1960. 435 с.
14. Вейник А. И. Расчет отливки. М.: Машиностроение, 1964. 403 с.

References

1. Smirnov V. N., Yarpolov I. I. *Sostav ekzoteploizolyatsionnoy smesi dlya obogreva pribyiley* [Composition of Exothermic Mixture for Heating-up of Shrinkage Heads]. Patent RU, no. 2017575, 1994.
2. Laskovnev A. P., Ovchinnikov V. V., Volochko A. T., Makarova Zh. E., Churko N. A. *Uteplitel'naya vstavka dlya alyuminiyevykh splavov* [Warmth-keeping Insert for Aluminum Alloys]. Patent BY, no. 1577, 2004.
3. <http://www.rantal-impex.ru>

4. Volochko A. T., Laskovnev A. P., Ovchinnikov V. V., Zhdanovich O. E. *Uteplitel'naya vstavka dlya litya alyuminievykh splavov* [Warmth-keeping Insert for Casting of Aluminum Alloys]. Patent BY, no. 1075, 2003.
5. Volochko A. T., Podbolotov K. B., Dyatlova E. M. *Ogneupornye i tugoplavkie keramicheskie materialy* [Refractory and Heat-resistant Ceramic Materials]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013. 385 p.
6. Volochko A. T. *Pererabotka i ispolzovanie alyuminievykh othodov v proizvodstve poroshkov, past, kompozitsionnykh i keramicheskikh materialov* [Wastes for Production of Powders, Pastes, Composite and Ceramic Materials]. Minsk, Belaruskaya nauka Publ., 2006. 302 p.
7. Laskovnyov A. P., Ovchinnikov V. V., Zhdanovich O. E. *Proizvodstvo alyuminievykh porshney dlya vysokoforsirovannykh dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Production of Aluminum Pistons for High-boosted Internal Combustion Engines]. Minsk, Ekoperspektiva Publ., 2004. 190 p.
8. Volochko A. T. Sintez ogneupornoy keramiki na osnove fosfatnogo svyazuyushchego i mnogokomponentnykh sistem oksidov [Synthesis of Refractory Ceramic Materials Based on a Phosphate Binding Agent and Multicomponent Oxide Systems]. *Vestsi Natsional'nay Akademii navuk Belarusi. Ser. fizika-tekhnicheskikh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Ser. Physical-technical Sciences*, 2013, no. 2, pp. 33–40.
9. Rozanova V. S., Dovbyish A. V. Puti uluchsheniya stoykosti ogneupornykh materialov, primenyaemykh v proizvodstve alyuminiya [Ways of Increasing the Durability of Refractory Materials Applied in Production of Aluminum]. *Tekhnologiya legkikh splavov = Technology of light alloys*, 1981, no. 9, pp. 20–22.
10. Volochko A. T., Laskovnev A. P., Batsevich O. G.-A., Ovchinnikov V. V., Belov I. A. *Ogneupornaya keramicheskaya massa* [Refractory Ceramic Mixture]. Patent BY, no. 9508, 2007.
11. Keramika iz prirodnogo wollastonita dlya liteynykh ustanovok alyuminievoy promyshlennosti [Natural Wollastonite Ceramics for Casting Machines of Aluminum Industry]. L. N. Rusanova [i dr.]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika = Refractories and Technical Ceramics*, 2008, no. 5, pp. 39–44.
12. O primenenii wollastonita v proizvodstve kompozitsionnykh stroitelnykh materialov i izdeliy na osnove tsementa [Application of Wollastonite in Production of Composite Constructional Materials and Cement-based Products]. V. I. Eyrih [i dr.]. *Stroitelnye materialy = Building materials*, 2002, no. 1, p. 14.
13. Veynik A. I. *Teoriya zatverdeniya otlivki* [Theory of Casting Solidification]. Moscow, Mashgiz Publ., 1960, 435 p.
14. Veynik A. I. *Raschyot otlivki* [Calculation of Casting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964, 403 p.

Сведения об авторе

Волочко Александр Тихонович, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», ул. Купревича, 10, 210141, Минск, Республика Беларусь. E-mail: volochkoat@mail.ru. Тел.: + 375 29 675-68-62.

Information about the authors

Volochko Alexander, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevich Str., Minsk, 220141, Belarus. E-mail: volochkoat@mail.ru. Tel.: + 375 29 675-68-62.



УДК 669.131.6:539.378.6

Поступила 13.08.2015

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГРАФИТИЗИРУЮЩЕГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ СЕРОГО ЧУГУНА С ПОМОЩЬЮ ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННОЙ ГАЗИФИЦИРУЕМОЙ МОДЕЛИ

INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF GRAY CAST IRON GRAPHITIZING MODIFICATION BY DISPERSION-FILLED CONSUMABLE PATTERN

И. А. НЕБОЖАК, В. В. СУМЕНКОВА, О. И. ШИНСКИЙ, В. Д. БАБЮК, Е. А. ЖИДКОВ,
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина

I. A. NEBOZHAK, V. V. SUMENKOVA, O. I. SHYNSKY, V. D. BABYUK, E. A. ZHYDKOV, Physical and
Technological Institute of Metals and Alloys of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

На примере образцов из серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 определены основные критерии оценки процесса графитизирующего модифицирования матричного расплава – концентрация кремния и коэффициент его усвоения. Путем исследования влияния этих показателей на структуру и свойства полученных отливок доказана эффективность внутриформенного модифицирования жидкого чугуна дисперсным ферросилицием марки ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80) по ЛГМ-процессу.

The key criteria of the process of graphitizing modification of matrix melt silicon concentration and silicon assimilation evaluated were on samples of gray cast iron grade СЧ20 State Standard 1412-85. These criteria of evaluation on the structure and properties of casting ingots proved an efficiency of intra-mold modification of molten gray cast iron by dispersed ferrosilicon grade ФС75 State Standard 1415-93 (ISO 5445-80) using lost-foam casting (LFC-process).

Ключевые слова. Аппроксимация, газомодель, графитизирующий элемент, графическая интерпретация, длина включений пластинчатого графита, концентрация кремния, коэффициент усвоения кремния, кремний, ЛГМ-процесс, литейная форма, литой образец, литье по газифицируемым моделям, математическая обработка, материал, матричный расплав, модифицирование, отливка, параметры микроструктуры, пенополистирол, перлит, пластинчатый графит, полином, серый чугун, твердость, феррит, ферросилиций, функциональная зависимость, характер зависимости, цементит, экспериментальные данные, эмпирическое уравнение.

Keywords. Approximation, consumable pattern, graphitizer, graphical interpretation, length of inclusions of flaked graphite, silicon concentration, silicon assimilation quotient, silicon, lost-foam casting (LFC-process), casting mold, casting specimen, mathematical treatment, material, matrix melt, modification, ingot, microstructure parameters, foam polystyrene, pearlite, flaked graphite, polynomial, gray cast iron, hardness, ferrite, ferrosilicon, functional relation, temper of functional relation, cementite, experimental data, empirical equation.

Производство тонкостенного чугунного литья в песчано-глинистых литейных формах (ЛФ) и особенно в кокилях часто сопровождается отбелом поверхностного слоя отливок, глубина которого зависит от ряда факторов: толщины стенки литой заготовки, химического состава и температуры заливаемого чугуна, материала ЛФ и др. Повышенное содержание Fe_3C в поверхностном слое отливки приводит к неравномерности физико-механических свойств чугуна по сечению литой заготовки, а в случае тонкостенного кокильного литья – к сквозному отбелу и хрупкости отливок. Существует несколько способов устранения этого недостатка, среди которых наиболее распространенным является изменение химического состава чугуна путем введения графитизирующих элементов (ГЭ) в расплав [1] или длительного отжига литых заготовок. Наиболее доступным ГЭ является кремний, содержание которого в чугуне определяет его твердость [2] и обрабатываемость [1].

Отличительной особенностью процесса литья по газифицируемым моделям (ЛГМ-процесса) является присутствие газомодели (ГМ) в «полости» ЛФ в процессе формообразования и заполнения ЛФ распла-

вом. Кроме того, ГМ в большинстве случаев получают в полости пресс-формы из гранулированного пенополистирола. Эти обстоятельства и позволили вводить в состав ГМ дисперсные присадки [3] и, тем самым, сразу решить двудеиную задачу: осуществлять иннокулирование расплава в «полости» ЛФ с од-новременной утилизацией отходов ферросплавного производства. Имплантирование иннокуляторов в ГМ проводится холодным плакированием поверхности гранул пенополистирола дисперсными присад-ками.

В начале 70-х годов прошлого века в ФТИМС НАН Украины было проведено ряд исследований [4–6], связанных с легированием и модифицированием сталей и чугунов в «полости» ЛФ. Однако эти исследо-вания были единичными и не имели системного характера. В 90-х годах XX столетия исследования, на-правленные на легирование и модифицирование чугуна в «полости» ЛФ, возобновили и продолжают их проводить до сегодняшнего дня [7–12]. Дисперсно-наполненные ГМ получают по методике, описанной в [7].

Путем иннокулирования матричного расплава в «полости» ЛФ по ЛГМ-процессу [3, 7] удалось осу-ществить графитизирующее модифицирование чугунных отливок дисперсным ферросилицием марки ФС75, ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80). Методика исследования, а также металлургические и технологиче-ские параметры ЛГМ-процесса приведены в работах [9, 12].

Так как исследования влияния технологических параметров (независимых факторов) ЛГМ-процесса, в частности, содержания дисперсного ферросилиция в «теле» ГМ, плотности пенополистирола, скоро-сти заливки металла в «полость» ЛФ и его температуры на показатели усвоения модификатора (концен-трацию кремния после модифицирования матричного расплава ($[Si]_M$) и коэффициент его усвоения ($k_{[Si]}$)), параметры микроструктуры (количества перлита (П), феррита (Ф), цементита (Fe_3C), пластинча-того графита (ПГ), а также длину включений пластинчатого графита ($l_{ПГ}$)) и основные механические свойства литых образцов (твердость (НВ)) из серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84) провести на всех отливках физически сложно, то нами был использован метод полнофакторного экспе-римента. Исходя из этих соображений, в качестве подопытной отливки был избран литой образец с ин-дексом «14».

Известно [1], что микроструктура литых образцов как из серого, так и белого чугунов представляет собой ту группу факторов, от которых, в первую очередь, зависят механические и специальные свойства отливок. Таким образом, чтобы влиять на структурообразование вышеуказанных чугунов, необходимо знать, как влияют на микроструктуру материала литых образцов те или иные металлургические и техно-логические факторы ЛГМ-процесса. Для серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 такими факторами являются $[Si]_M$ и $k_{[Si]}$. Последний в общем случае был рассчитан по формуле:

$$k_{[Si]} = \frac{[Si]_M - [Si]_0}{C_{Si}^{ГМ}}, \quad (1)$$

где $[Si]_0$ – концентрация кремния в исходном матричном расплаве, % (мас. доля); $C_{Si}^{ГМ}$ – концентрация кремния (от массы литого образца) в газомодели, % (мас. доля).

Так как $[Si]_0 = 1,75$, а $C_{Si}^{ГМ} = 0,75$, то формулу (1) можно записать в виде:

$$k_{[Si]} = \frac{[Si]_M - 1,75}{0,75}. \quad (2)$$

На примере исследуемой отливки, т. е. отливки с индексом «14», экспериментально установлено (табл. 1), что каждому конкретному значению как $[Si]_M$ в сером чугуне, так и $k_{[Si]}$ соответствует свое кон-кретное значение количества П, Ф, Fe_3C , ПГ, а также $l_{ПГ}$. Это свидетельствует о том, что параметры ми-кроструктуры серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412–85 зависят прежде всего от показателей усвоения кремния, т. е. $[Si]_M$ и $k_{[Si]}$.

Графическая интерпретация результатов эксперимента (рис. 1) показала, что между большинством параметров микроструктуры и $[Si]_M$ в объеме отливки из серого чугуна существует ярко выраженная по-линомиальная зависимость и только влияние $[Si]_M$ на количество Fe_3C носит степенной характер. По мере увеличения $[Si]_M$ от 1,54 до 2,41% количество П постепенно уменьшается. Его максимум достигает 94%, в то время как минимум этой структурной составляющей материала литого образца равен 56%. Количество Ф в структуре серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 в интервале концентраций от 1,54 до 2,41% монотонно возрастает. При $[Si]_M = 1,54\%$ его содержание составляет 0%. Дальнейшее увеличе-ние концентрации кремния в объеме подопытной отливки приводит к тому, что при $[Si]_M = 2,41\%$ коли-

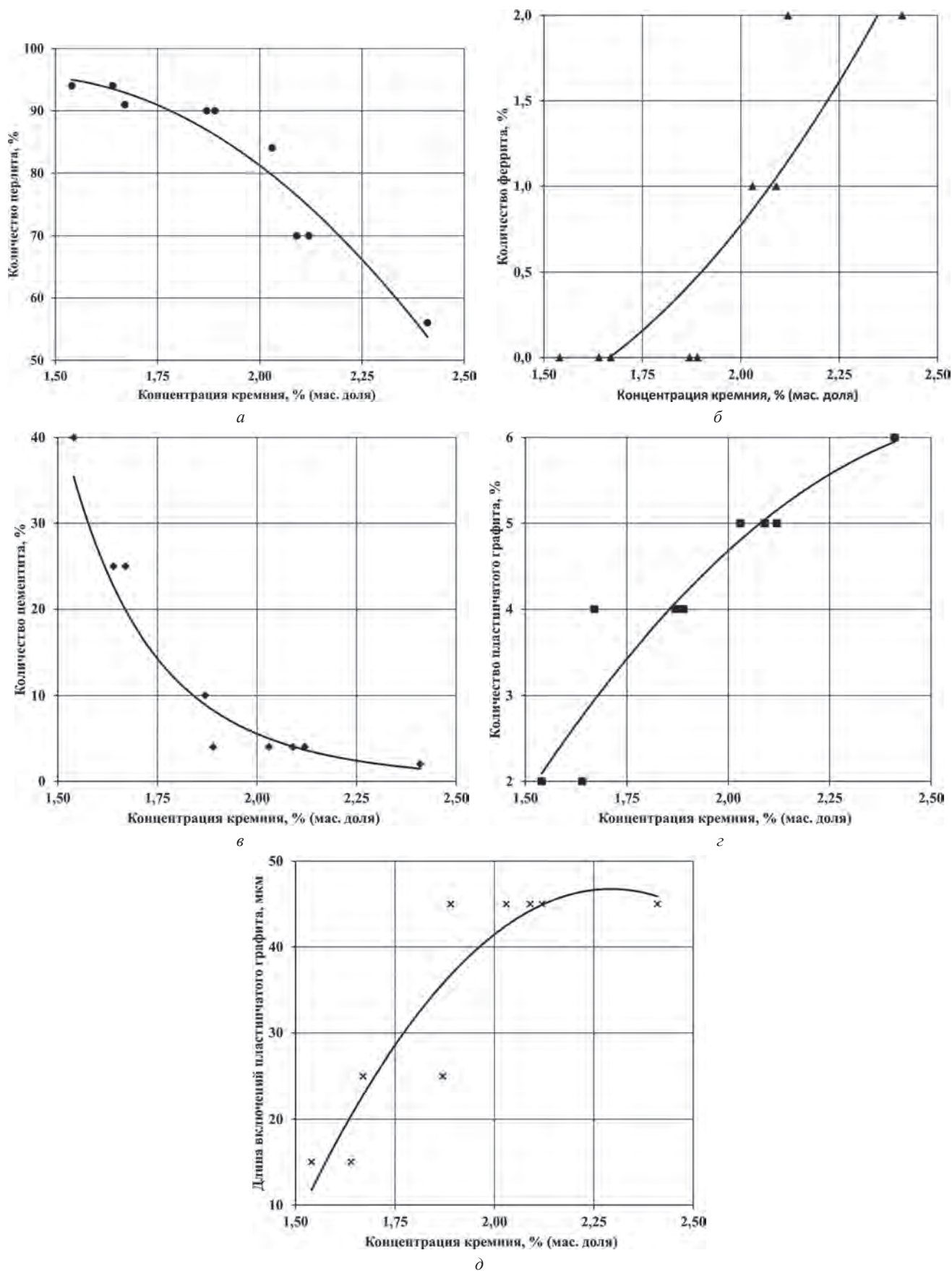


Рис. 1. Зависимость параметров микроструктуры серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 от показателей усвоения кремния: а – количества перлита $\{P = f_1([Si]_M)\}$; б – количества феррита $\{F = f_2([Si]_M)\}$; в – количества цемента $\{Fe_3C = f_3([Si]_M)\}$; г – количества пластинчатого графита $\{ПГ = f_4([Si]_M)\}$; д – длины включений пластинчатого графита $\{l_{ПГ} = f_5([Si]_M)\}$

Таблица 1. Показатели эффективности усвоения кремния, параметры микроструктуры и твердость серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 в «контрольной» плоскости литого образца

Индекс		Координаты, мм				Показатели эффективности усвоения кремния		Параметры микроструктуры					Твердость по Бринеллю НВ
отливки	темплета	питателя		«контрольной» точки				количество, % (по площади)				l _{ПГ} , мкм	
		H _О	a _О	H _О	a _О	[Si] _м % (мас. доля)	k _[Si]	П	Φ	Fe ₃ C	ПГ		
14	14-1	0	50	290	10	2,12	0,493	70	2	04	5	45	235
	14-2			290	50	2,03	0,373	84	1	04	5	45	255
	14-3			290	90	2,09	0,453	70	1	04	5	45	248
	14-4			150	10	1,87	0,160	90	0	10	4	25	262
	14-5			150	50	2,41	0,880	56	2	02	6	45	229
	14-6			150	90	1,89	0,187	90	0	04	4	45	241
	14-7			010	10	1,67	0,000	91	0	25	4	25	302
	14-8			010	50	1,54	0,000	94	0	40	2	15	321
	14-9			010	90	1,64	0,000	94	0	25	2	15	311

чество Φ достигает 2%. Содержание Fe_3C в диапазоне $[\text{Si}]_M = 1,54\text{--}2,41\%$ также изменяется. В рассматриваемом интервале концентраций количество этой важной структурной составляющей серого чугуна постепенно уменьшается с 40 до 2%. Увеличение $[\text{Si}]_M$ от 1,54 до 2,41% приводит к тому, что такие параметры микроструктуры материала литого образца, как ПГ и $l_{\text{ПГ}}$, также монотонно возрастают от 2% и 15 мкм до 6% и 45 мкм соответственно.

В результате математической обработки экспериментальных данных (табл. 1), т. е. аппроксимации соответствующих функциональных зависимостей, заданных в табличной форме, был получен целый ряд эмпирических уравнений в виде полиномов второго порядка (кроме $[\text{Fe}_3\text{C}] = f_3([\text{Si}]_M)$, где зависимость носит степенной характер), которые приближенно описывают влияние $[\text{Si}]_M$ на параметры микроструктуры серого чугуна (П, Φ , Fe_3C , ПГ, а также $l_{\text{ПГ}}$):

$$\text{П} = -42,421[\text{Si}]_M^2 + 120,19[\text{Si}]_M + 10,516, \quad (3)$$

$$\Phi = 1,7642[\text{Si}]_M^2 - 4,148[\text{Si}]_M + 2,0135, \quad (4)$$

$$[\text{Fe}_3\text{C}] = 761,33[\text{Si}]_M^{-7,104}, \quad (5)$$

$$\text{ПГ} = -2,9211[\text{Si}]_M^2 + 15,974[\text{Si}]_M - 15,583, \quad (6)$$

$$l_{\text{ПГ}} = -61,839[\text{Si}]_M^2 + 283,53[\text{Si}]_M - 278,24. \quad (7)$$

Полученные результаты экспериментов (рис. 2) позволили также установить зависимость параметров микроструктуры серого чугуна от $k_{[\text{Si}]}$. Так, например, изменение $k_{[\text{Si}]}$ от 0 до 0,88 приводит к уменьшению количества П от 94 до 56%. Количество Φ в этом интервале плавно увеличивается (без экстремума) от 0 до 2%. Содержание Fe_3C при $k_{[\text{Si}]} = 0\text{--}0,88$ монотонно уменьшается с 40 до 2%. Эта зависимость подчиняется закону экспоненты. Что же касается количества ПГ и $l_{\text{ПГ}}$, то в рассматриваемом интервале $k_{[\text{Si}]}$ эти параметры микроструктуры серого чугуна увеличиваются соответственно от 2% и 15 мкм до 6% и 45 мкм. Эти зависимости, как и первые две, также являются полиномами второго порядка.

Математическая обработка экспериментальных данных (табл. 1) позволила аналитически описать зависимость основных параметров микроструктуры серого чугуна, т. е. количеств П, Φ , Fe_3C , ПГ, а также $l_{\text{ПГ}}$ от $k_{[\text{Si}]}$. Эмпирические уравнения этих зависимостей, которые были получены в результате аппроксимации табличных функций, имеют вид:

$$\text{П} = -7,319k_{[\text{Si}]}^2 - 38,363k_{[\text{Si}]} + 94,12, \quad (8)$$

$$\Phi = -0,8279k_{[\text{Si}]}^2 + 3,3238k_{[\text{Si}]} - 0,1427, \quad (9)$$

$$[\text{Fe}_3\text{C}] = 19,424e^{-3,154k_{[\text{Si}]}} \quad (10)$$

$$\text{ПГ} = -3,8587k_{[\text{Si}]}^2 + 7,0293k_{[\text{Si}]} + 2,7324, \quad (11)$$

$$l_{\text{ПГ}} = -75,897k_{[\text{Si}]}^2 + 95,664k_{[\text{Si}]} + 18,821. \quad (12)$$

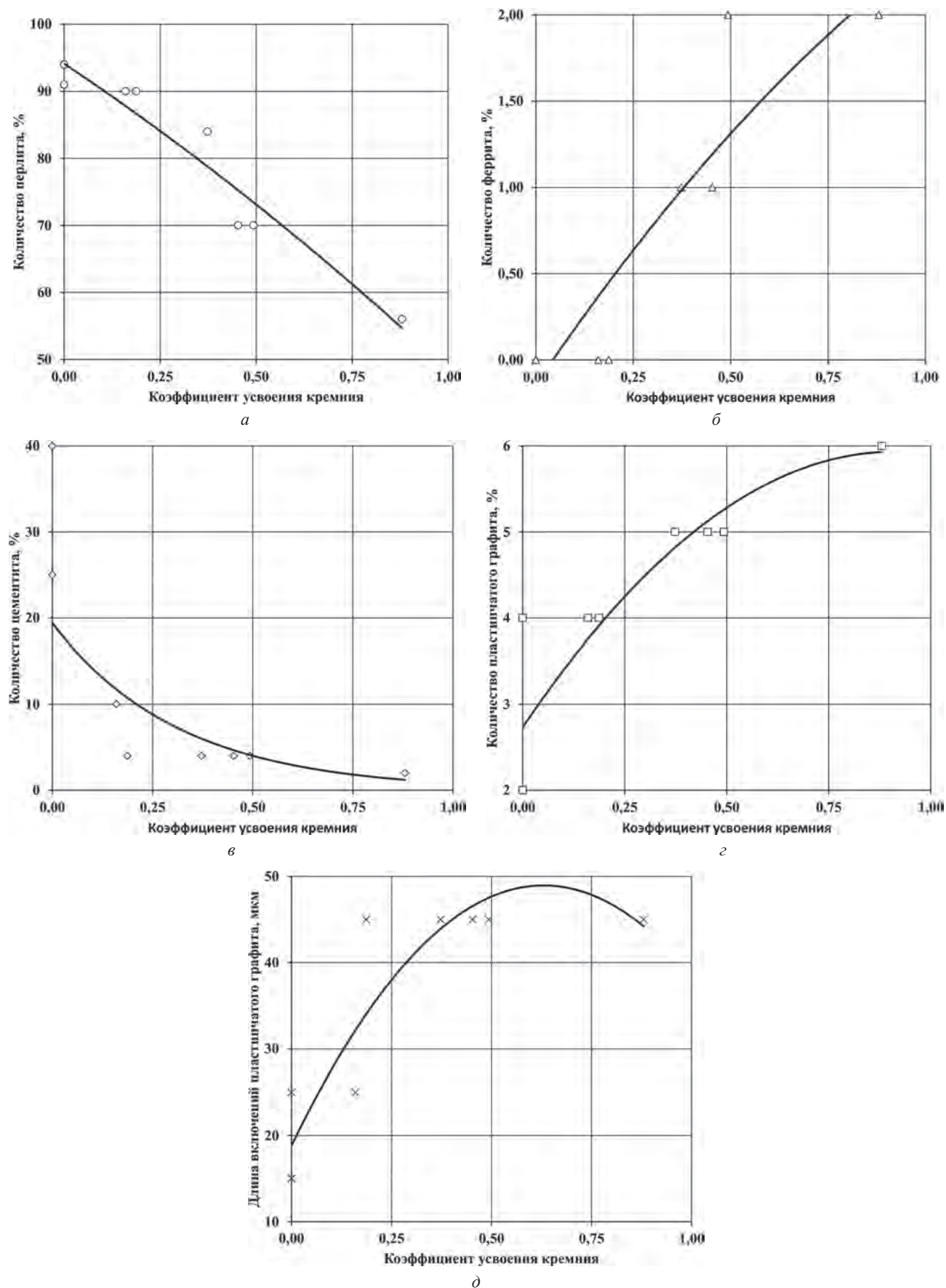


Рис. 2. Зависимость параметров микроструктуры серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 от показателей усвоения кремния: а – количества перлита $\{П = \varphi_1(k_{[Si]})\}$; б – количества феррита $\{Ф = \varphi_2(k_{[Si]})\}$; в – количества цементита $\{[Fe_3C] = \varphi_3(k_{[Si]})\}$; г – количества пластинчатого графита $\{ПГ = \varphi_4(k_{[Si]})\}$; д – длины включений пластинчатого графита $\{l_{ПГ} = \varphi_5(k_{[Si]})\}$

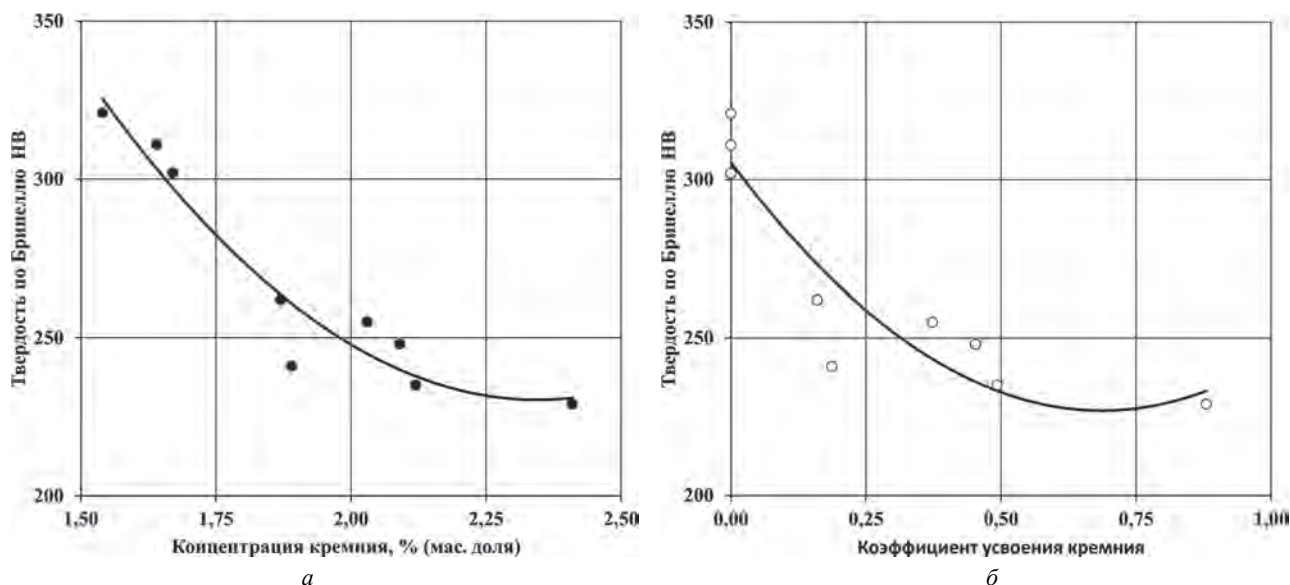


Рис. 3. Влияние показателей усвоения кремния на твердость серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85: а – концентрации кремния $\{HB = f([Si]_M)\}$; б – коэффициента усвоения кремния $\{HB = \varphi(k_{[Si]})\}$

Как видно из уравнений (3)–(12), такие показатели эффективности усвоения кремния, как $[Si]_M$ и $k_{[Si]}$, влияют на основные параметры микроструктуры СЧ20, ГОСТ 1412-85. Это объясняется тем, что кремний, будучи ГЭ, приводит к уменьшению количества структурно свободного Fe_3C в основе серого чугуна, а также вследствие распада Fe_3C способствует графитизации его металлической матрицы.

Установлено (табл. 1), что твердость литых образцов в первую очередь зависит от $[Si]_M$ и $k_{[Si]}$ расплавом серого чугуна. Полученные результаты (рис. 3) показали, что твердость СЧ20, ГОСТ 1412-85 при $[Si]_M = 1,54\text{--}2,41\%$ падает с 321 до 229 HB. Аналитическая зависимость существует также и между $k_{[Si]}$ и твердостью литых образцов. Так, например, увеличение $k_{[Si]}$ от 0 до 0,88 приводит к плавному снижению твердости чугуновой отливки с 321 до 229 HB. В обоих случаях линии аппроксимации соответствующих функциональных зависимостей представляют собой полиномы второго порядка.

Математическая обработка экспериментальных данных позволила аналитически описать влияние таких показателей усвоения кремния, как $[Si]_M$ и $k_{[Si]}$ на одну из наиболее важных механических характеристик серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 – его твердость. Уравнения рассмотренных зависимостей имеют вид:

$$HB = 146,62[Si]_M^2 - 687,8[Si]_M + 1037, \quad (13)$$

$$HB = 166,59k_{[Si]}^2 - 228,74k_{[Si]} + 305,49. \quad (14)$$

Характер этих функциональных зависимостей объясняется тем, что кремний, будучи ГЭ, в незначительных количествах существенно снижает содержание структурно свободного Fe_3C и, тем самым, уменьшает хрупкость и твердость литого образца. Увеличение $[Si]_M$ в составе серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 способствует также уменьшению количества П и образованию Ф в структуре материала, что в свою очередь приводит к повышению его ударной вязкости и пластичности.

Из табл. 1, видно, что твердость отливок изменяется в зависимости от микроструктуры серого чугуна. Экспериментальные данные, приведенные на рис. 4, подтверждают и наглядно иллюстрируют влияние параметров микроструктуры СЧ20, ГОСТ 1412-85 на твердость литых образцов. Так, например, увеличение количества П в структуре чугуновых отливок на всем исследуемом интервале, т. е. от 56 до 94%, приводит к повышению их твердости соответственно от 229 до 321 HB. Эта зависимость описывается полиномом второго порядка. Вследствие увеличения содержания Ф от 0 до 2% твердость серого чугуна уменьшилась соответственно с 321 до 229 HB. Влияние данного параметра микроструктуры литого образца на его твердость носит экспоненциальный характер. Увеличение количества структурно свободного Fe_3C от 2 до 40% привело к увеличению твердости отливок из СЧ20, ГОСТ 1412-85 от 229 HB в начале интервала до 321 HB в его конце. Содержание ПГ в основе чугуна также влияет на твердость литых образцов. Увеличение количества ПГ от 2 до 6% вызвало снижение твердости материала соответственно с 321 до 229 HB. Зависимость твердости исследуемого литого образца от $I_{ПГ}$, как и в двух предыдущих

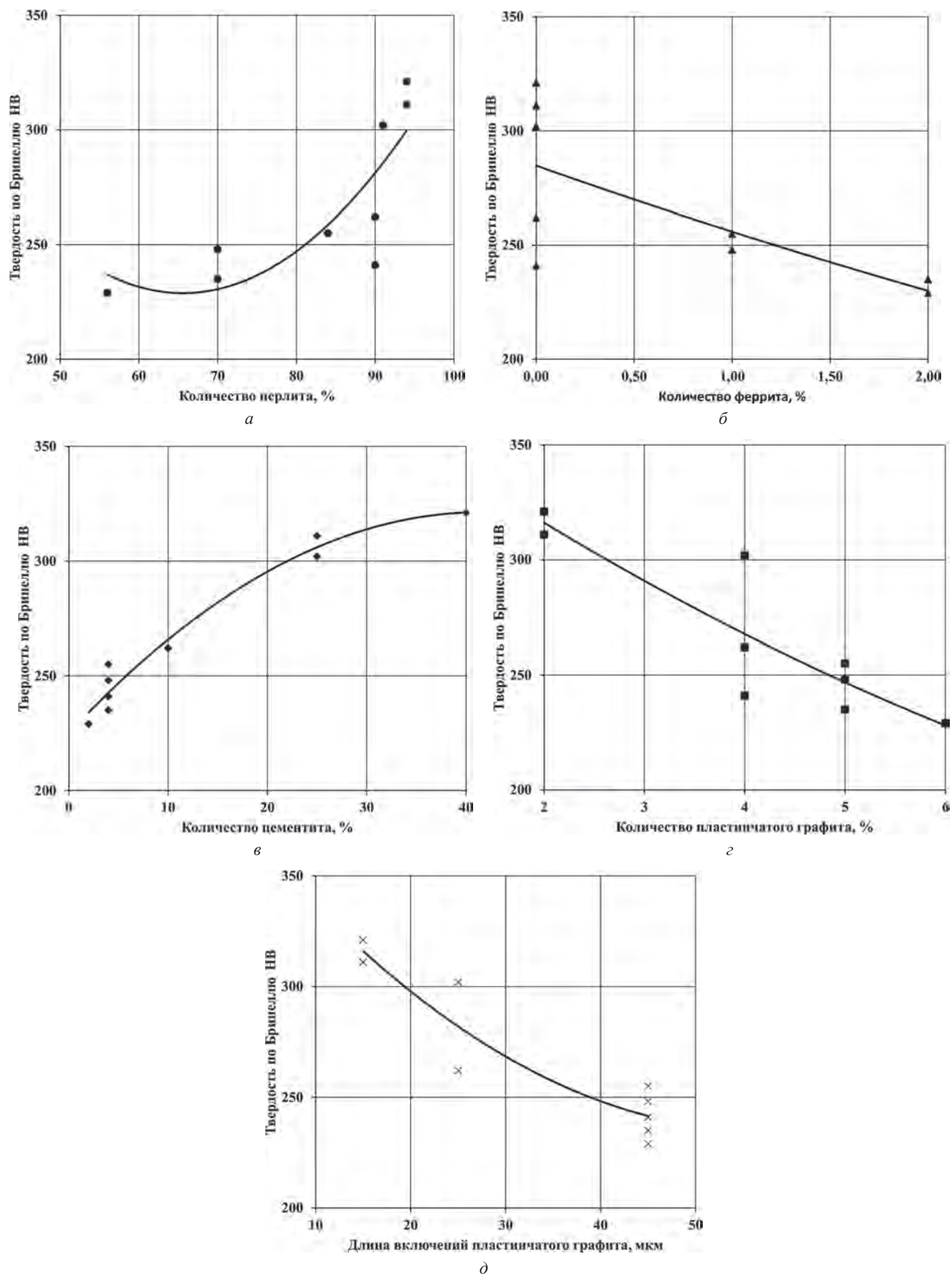


Рис. 4. Зависимость твердости отливок от параметров микроструктуры серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85: а – количества перлита $\{HB = \psi_1(\Pi)\}$; б – количества феррита $\{HB = \psi_2(\Phi)\}$; в – количества цементита $\{HB = \psi_3([Fe_3C])\}$; г – количества пластинчатого графита $\{HB = \psi_4(\PiГ)\}$; д – длины включений пластинчатого графита $\{HB = \psi_5(l_{\PiГ})\}$

случаях, является полиномом второго порядка, что показала математическая обработка экспериментальных данных. При $l_{\text{ПГ}} = 15$ мкм твердость серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 максимальная и составляет 321 НВ. По мере увеличения $l_{\text{ПГ}}$ твердость материала отливки уменьшается и уже при 45 мкм достигает минимального значения – 229 НВ.

Математическая обработка экспериментальных данных (табл. 1) позволила получить соответствующие эмпирические уравнения, которые аналитически описывают зависимость твердости исследуемых литых образцов от параметров микроструктуры серого чугуна:

$$\text{HB} = 0,0878\Pi^2 - 11,521\Pi + 606,68, \quad (15)$$

$$\text{HB} = 284,71e^{-0,107\Pi}, \quad (16)$$

$$\text{HB} = -0,0557[\text{Fe}_3\text{C}]^2 + 4,6298[\text{Fe}_3\text{C}] + 225,08, \quad (17)$$

$$\text{HB} = 1,0986(\Pi\Gamma)^2 - 30,804(\Pi\Gamma) + 373,37, \quad (18)$$

$$\text{HB} = 0,046l_{\text{ПГ}}^2 - 5,24l_{\text{ПГ}} + 384,25. \quad (19)$$

Выбранные на соответствующих графиках линии аппроксимации, за исключением уравнения (16), где влияние количества Π на НВ носит экспоненциальный характер, описываются с помощью полиномов второго порядка (15), (17)–(19).

Такая зависимость твердости исследуемой отливки от параметров микроструктуры материала литого образца объясняется, прежде всего, тем, что каждая структурная составляющая характеризуется определенной микротвердостью, которая в зависимости от ее количества, в конечном итоге, влияет на твердость серого чугуна в целом. Так, например, перлитизация матрицы чугуновых отливок приводит к увеличению их твердости. Повышение содержания структурно свободного Fe_3C , как самой твердой составляющей серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85, также способствует увеличению твердости литого образца. В то же время твердость Π значительно ниже твердости Fe_3C , поэтому для повышения общей твердости серого чугуна на одну и ту же величину достаточно количество последнего в его структуре довести до 40%, что в 2,35 раза меньше количества Π . Увеличение содержания $\Pi\Gamma$ существенно упрочняет металлическую матрицу, и, тем самым, приводит к падению твердости чугуновых отливок. Вместе с тем, дальнейшее увеличение количества этой структурной составляющей, которую фактически можно рассматривать как концентратор механических напряжений в основе материала, приводит к тому, что матрица СЧ20, ГОСТ 1412-85 ослабляется и, как следствие, уменьшается прочность литого образца. Зависимость твердости исследуемой отливки от $l_{\text{ПГ}}$ объясняется тем, что этот показатель влияет на прочность металлической матрицы серого чугуна. Последняя в свою очередь определяет твердость материала литого образца. Следует принять во внимание, что $l_{\text{ПГ}}$ может влиять на твердость серого чугуна так же как и количество $\Pi\Gamma$, поскольку эти показатели микроструктуры материала напрямую связаны между собой – общее содержание $\Pi\Gamma$ может увеличиваться за счет увеличения $l_{\text{ПГ}}$, и наоборот.

Кроме того, в процессе выполнения данной работы опытным путем (табл. 2) было установлено, что механические свойства чугуновой отливки зависят от геометрических размеров литого образца. Так, например, графическая интерпретация экспериментальных данных (рис. 5), представленных в табл. 2, доказала функциональную зависимость, которая существует между твердостью чугуна, длиной и высотой исследуемой отливки. В частности, для экспериментального литого образца характерно повышение твердости серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 в нижней части отливки. По мере повышения литого образца твердость его материала сначала падает, а потом, начиная с 220 мм, незаметно возрастает. Максимальная твердость чугуна – в точке подвода расплава в «полость» ЛФ и составляет 321 НВ. В центральной части отливки этот показатель понижается до 262 НВ, а с противоположной стороны от питателя твердость достигает 255 НВ. С левой стороны от питателя на высоте 0, 150 и 300 мм серый чугун соответственно имеет твердость 302, 241 и 235 НВ, в то время как твердость правой стороны отливки на той самой высоте приобретает значения 311, 229 и 248 НВ. Очевидно, что твердость чугуна зависит также и от длины литого образца, причем зависимость носит параболический характер.

Математическая обработка результатов эксперимента (табл. 2) позволила аналитически описать влияние габаритных размеров отливки на твердость серого чугуна. При этом установлено, что твердость СЧ20, ГОСТ 1412-85 в «контрольной» плоскости [7] литого образца изменяется по закону полинома второго порядка. Уравнение этой зависимости имеет вид:

Таблица 2. Твердость серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 в «контрольной» плоскости литого образца

Индекс		Координаты, мм				Твердость по Бринеллю НВ
отливки	темплета	питателя		«контрольной» точки		
		H_O	a_O	H_O	a_O	
14	14-1	0	50	290	10	235
	14-2			290	50	255
	14-3			290	90	248
	14-4			150	10	241
	14-5			150	50	262
	14-6			150	90	229
	14-7			010	10	302
	14-8			010	50	321
	14-9			010	90	311
К	К-1	0	50	290	10	415
	К-2			290	50	429
	К-3			290	90	444
	К-4			150	10	429
	К-5			150	50	415
	К-6			150	90	429
	К-7			010	10	415
	К-8			010	50	444
	К-9			010	90	461

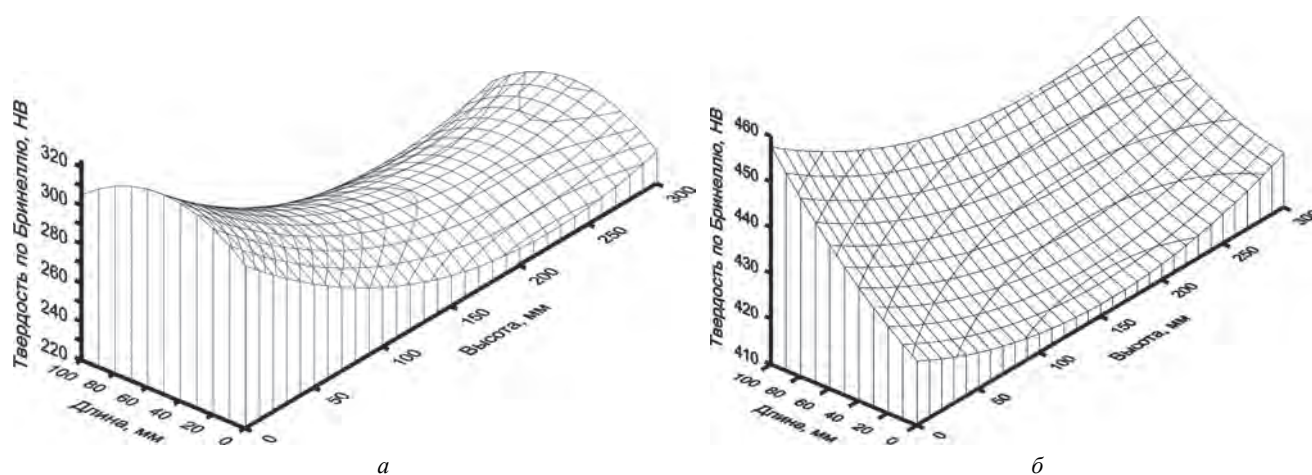


Рис. 5. Распределение твердости материала литых образцов в «контрольной» плоскости [7] отливок из: а – серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85; б – белого чугуна

$$\begin{aligned} \text{НВ} = & 304,556 - 6,86667 \cdot 10^{-1} \cdot H_0 + 1,54074 \cdot 10^{-3} \cdot H_0^2 + 1,33333 \cdot 10^{-4} \cdot H_0 a_0 + \\ & + 7,46667 \cdot 10^{-1} \cdot a_0 - 7,33333 \cdot 10^{-3} \cdot a_0^2, \end{aligned} \quad (20)$$

где H_0 – высота отливки, $\times 10^{-3}$ м; a_0 – длина литого образца, $\times 10^{-3}$ м.

Такое распределение твердости в «контрольной» плоскости отливки объясняется тем, что в процессе формозаполнения в «полости» ЛФ возникают гидродинамические и конвективные потоки, которые приводят к тому, что концентрационное поле кремния колеблется в «контрольной» плоскости литого образца, и в этом случае приходится говорить о неравномерности распределения этого ГЭ в объеме отливки, причем не хаотично. Совершенно очевидно (рис. 5), что кремний «вымывается» потоком поднимающегося в «полости» ЛФ матричного расплава как по фронту его движения, так и по обе стороны от питателя. Поскольку зависимость твердости от $[\text{Si}]_M$ и $k_{[\text{Si}]}$ рассмотрена и доказана выше (рис. 3, уравнения (13), (14)), то, исходя из этих соображений, понятно, почему твердость серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 зависит от длины и высоты литого образца.

Таким образом, в результате графитизирующего модифицирования чугуна расплава в «полости» ЛФ с помощью дисперсно-наполненной ГМ удалось получить образцы конструкционного материала,

которые можно использовать для производства опытно-экспериментальной партии реальных отливок, необходимой для производственных испытаний. В то же время необходимо учитывать, что формирование структуры и твердости литых образцов происходит, в первую очередь, под влиянием гидро-, газодинамики ЛГМ-процесса. Эти условия в значительной мере влияют на показатели усвоения ГЭ матричным расплавом, от которых, прежде всего, зависят микроструктура и механические свойства, в частности твердость, исследуемых отливок. Проведенные исследования показали, что благодаря методу планирования эксперимента, а также использованию полученных аналитических зависимостей можно предопределить влияние элементов-модификаторов на структурообразование чугунных отливок в целом, минуя проведение обширной серии испытаний.

Литература

1. Справочник по чугунному литью / Под ред. Н. Г. Гиршовича. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. 758 с.
2. Гуляев А. П. Металловедение: Учеб. пособ. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1977. 648 с.
3. Пат. 244 України: МКІ³ В22С7/02, В22С3/00. Спосіб виготовлення моделей із пінополістиролу / О. Й. Шинський, Л. П. Вишнякова, В. Н. Плотнікова, Є. Ф. Князев (Україна); Заявл. 15.01.93; Опубл. 30.04.93.
4. Литье по газифицируемым моделям // Сб. науч. тр. Киев: АН УССР. Ин-т проблем литья, 1973. 134 с.
5. Литье по газифицируемым моделям // Сб. науч. тр. Киев: АН УССР. Ин-т проблем литья, 1975. Вып. 2. 193 с.
6. Литье по газифицируемым моделям // Сб. науч. тр. Киев: АН УССР. Ин-т проблем литья, 1979. 168 с.
7. Анненко Л. П., Шуляк В. С., Лузан П. П. Изготовление пенополистироловых моделей с легирующими присадками // Новое в точном литье. 1972. С. 226–227.
8. Исследование концентрационных полей легирующих и модифицирующих элементов, полученных с использованием газифицируемых моделей с мелкодисперсными присадками / О. И. Шинский, В. В. Суменкова, И. В. Ткачук, О. Х. Бабаджанов // Процессы литья. 1999. № 2. С. 41–48.
9. Особливості структуроутворення СЧ20, модифікованого ФС75 у порожнині ливарної форми за ГАМОЛІВ-процесом / І. А. Небожак, В. В. Суменкова, І. В. Ткачук, О. Й. Шинський // МОМ. 2001. № 4. С. 43–49.
10. Використання дисперснонаповнених моделей, що газифікуються, для отримання чавунних виливків / І. А. Небожак, В. В. Суменкова, О. Й. Шинський, О. О. Онищук // МОМ. 2005. № 4. С. 19–22.
11. Небожак І. А., Суменкова В. В., Шинський О. І. Исследование эффективности внутриформенного модифицирования отливок из серого чугуна ферросилицием при литье по газифицируемым дисперсно-наполненным моделям // Процессы литья. 2008. № 5. С. 50–56.
12. Микроструктура модифицированных ферросилицием чугунных отливок, полученных с помощью газифицируемых дисперснонаполненных моделей / И. А. Небожак, Т. К. Пилипенко, В. В. Суменкова, О. И. Шинский // Процессы литья. 2009. № 3. С. 17–23.

References

1. *Iron casting handbook* / Edited by N. G. Girshovich. 3-rd ed., rev. and add. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningradskoe otdelenie, 1978. 758 p.
2. Gulyaev A. P. *Physical metallurgy*. 5-rd ed., rev. and add. Moscow: Metallurgiya Publ., 1977. 648 p.
3. Shynskiy O. Y., Vyshnyakova L. P., Plotnikova V. N., Knyazev Y. F. A method of manufacturing models from foam polystyrene. *Patent 244 Ukraine*, no. 1079340, 1993.
4. *Lost-foam casting*: Collection of scientific papers. Kiev, Academy of Sciences of USSR. Institute for Problems in Casting, 1973. 134 p.
5. *Lost-foam casting*: Collection of scientific papers. Kiev, Academy of Sciences of USSR. Institute for Problems in Casting, 1975. Issue 2. 193 p.
6. *Lost-foam casting*: Collection of scientific papers. Kiev, Academy of Sciences of USSR. Institute for Problems in Casting, 1979. 168 p.
7. Annenko L. P., Shulyak V. S., Luzan P. P. Production of foam polystyrene models with alloying addition. *A new in precision casting*. 1972, pp. 226–227.
8. Shynskiy O. I., Sumenkova V. V., Tkachuk I. V., Babadjanov O. K. Investigation of concentration fields of modifying alloying elements obtained using evaporative casting model with fine-dispersed additives. *Protsessy lit'ya*. 1999, no. 2, pp. 41–48.
9. Nebozhak I. A., Sumenkova V. V., Tkachuk I. V., Shynskiy O. I. Features of C420 structure formation which is modified with ФС75 in the casting mold cavity using lost-foam process. *МОМ*. 2001, no. 4, pp. 43–49.
10. Nebozhak I. A., Sumenkova V. V., Shynskiy O. I., Onyschuk O. O. The use of the dispersion-filled consumable patterns for production of cast iron ingots. *МОМ*. 2005, no. 4, pp. 19–22.
11. Nebozhak I. A., Sumenkova V. V., Shynskiy O. I. Research of efficiency of intra-mold ferrosilicon modification of gray cast iron ingots using dispersion-filled consumable patterns. *Protsessy lit'ya*. 2008, no. 5, pp. 50–56.
12. Nebozhak I. A., Pilipenko T. K., Sumenkova V. V., Synskiy O. I. The microstructure of ferrosilicon modified cast iron ingots and produced using dispersion-filled consumable patterns. *Protsessy lit'ya*. 2009, no. 3, pp. 17–23.

Сведения об авторе

Небожак Иван Анатольевич. Физико-технологический институт металлов и сплавов Национальной академии наук Украины, б-р Академика Вернадского, 34/1, г. Киев-142, Украина. E-mail: nebozhak@ukr.net.

Information about the author

Nebozhak Ivan. Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of National Academy of Sciences of Ukraine, 34/1, Vernadsky Ave., Kyiv-142, Ukraine. E-mail: nebozhak@ukr.net.



УДК 669.054; 671.24

Поступила 11.11.2015

ПЕРЕРАБОТКА ТЕХНОГЕННЫХ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ PROCESSING OF INDUSTRIAL IRON CONTAINING WASTES

С. Л. РОВИН, УП «Технолит», г. Минск, Беларусь, Л. Е. РОВИН, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, г. Гомель, Беларусь

S. L. ROVIN, Technolit Co, Minsk, Belarus, L. E. ROVIN, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj, Gomel, Belarus

В статье представлен технологический процесс прямого получения железоуглеродистых сплавов из дисперсных оксидных железосодержащих отходов в ротационной наклоняющейся печи, позволяющий исключить необходимость предварительной подготовки исходного сырья.

This article presents the technological process of direct production of iron-carbon alloys from dispersed iron containing wastes in rotary tilting furnace, which allows to exclude the preliminary preparation of initial raw material.

Ключевые слова. Дисперсные металлоотходы, окалина, ротационные наклоняющиеся печи.

Keywords. Dispersed metal wastes, dross, tilting rotary furnaces.

Введение. Ротационные наклоняющиеся печи (РНП) – новый тип топливных вращающихся печей, обеспечивающий наиболее эффективный нагрев и переработку (рециклинг) полидисперсных материалов.

Результаты исследований, отработка технологии рециклинга на опытно-экспериментальном образце РНП с применением различных видов металлоотходов, анализ накопленного мирового опыта послужили основанием для разработки рекомендаций по расчету и конструированию печей и были использованы при проектировании РНП для нагрева и плавки чугуновой стружки, восстановительной плавки стальной прокатной окалины, переплавки отходов алюминия, плавки свинца из отходов аккумуляторного лома. Ротационные наклоняющиеся печи имеют высокий термический КПД (~ 50%), технологическую гибкость, высокую удельную производительность и рентабельность.

Основная часть. Технологический процесс получения чугуна и стали из прокатной окалины и других оксидных железосодержащих отходов в РНП состоит из нескольких последовательных стадий.

Подготовительная стадия включает набор и взвешивание шихты: окалины, восстановителя (коксика, отходов графита, электродного боя, лигнина или др.) и флюсов (известняка, доломита, плавикового шпата), возможно также использование материалов, способствующих интенсификации и более полному протеканию процессов твердофазного восстановления железа (например, алюминия).

К этой же стадии относится предварительный разогрев печи до 800–900 °С, если плавка производится после длительного простоя печи. В случае непрерывной работы РНП разогрев не требуется, но осуществляются контроль и поддержание требуемой температуры в печном пространстве.

Первая стадия рабочего процесса начинается с загрузки и разогрева шихты. Горелки включаются на максимальную мощность. Вращение печи осуществляется со скоростью 2–3 об/мин. Длительность нагрева окалины в зависимости от исходной температуры футеровки составляет примерно 30–40 мин, при холодной футеровке – 1,0–1,5 ч (и более применительно к печам большой емкости ($\geq 5 \text{ м}^3$)). Нагрев шихты осуществляется до температуры 800–900 °С.

Вторая стадия – начало и основной этап процесса восстановительной плавки окалины – твердофазное восстановление. Для этого в печь догружаются расчетное количество восстановителя и флюсы, горелка переводится в работу с недостатком воздуха (кислорода) при соотношении «газ/воздух», равном

1/7–1/6. Такой режим работы создает в печи восстановительную атмосферу, содержащую не менее 20% CO, при соотношении CO/CO₂ не менее 60/40. Важную роль в процессе восстановления играют также пары воды и водород. Целесообразно, чтобы соотношение H₂/H₂O было 1/1, что возможно только при конверсии H₂O при расчетном расходе кокса (или другого восстановителя) на плавку.

Управление составом атмосферы и температурой в печи – относительно простые (при использовании РНП, оборудованных двухпроводными газовыми горелками) и наиболее эффективные методы регулирования и управления восстановительными процессами на твердофазной стадии восстановительной плавки.

Процесс твердофазного восстановления определяется, в первую очередь, двумя факторами: температурой, которая должна поддерживаться в диапазоне 1100–1300 °С, и составом атмосферы в печи. Прочие факторы, такие, как размер частиц окалины, восстановителя, наличие извести (известняка), присадок алюминия, плавикового шпата и т. п., оказывают значительно меньшее влияние на интенсивность процесса. При этом следует учитывать, что при ведении процесса при максимальных температурах (>1200 °С) увеличивается вероятность крицеобразования – образования спекшихся комков (глыб) больших размеров, затрудняющих последующие стадии плавки.

Длительность процесса твердофазного восстановления составляет от 2 до 2,5 ч. Контроль продолжительности процесса ведется путем периодического отбора проб и определения достигнутой степени восстановления (металлизации) окалины. Условия в печи в этот период соответствуют режиму получения губчатого железа. На рис. 1 показана усредненная гистограмма, построенная по результатам экспериментальных плавов в РНП и отражающая интенсивность восстановления оксидов железа на твердофазной стадии. Каждая граница показателей соответствует пробе, отобранной из печи в момент времени, указанный на оси абсцисс. Опытно-экспериментальные плавки показали, что наиболее рациональным моментом перехода к жидкофазной стадии процесса является достижение степени металлизации 75–85% (активное образование спекшихся гранул губчатого железа).

Завершающей стадией процесса рециклинга окалины является жидкофазное восстановление и рафинирование расплава. Перевод в эту стадию производится путем догрузки в РНП оставшейся части восстановителя и флюсов, увеличения расхода природного газа до максимума при соотношении газ/воздух 1/7–1/6 и обогащении дутья кислородом (до достижения количества требуемого для полного сжигания топлива (примерно 6% от стехиометрического количества воздуха). Температура в печи при этом повышается до 1700–1800 °С. Материал расплавляется, образуется вспененный шлак и в течение примерно 30–45 мин проводится процесс жидкофазного восстановления.

Термовременной режим всего хода восстановительной плавки представлен на рис. 2.

После окончания «кипения» ванны расплава (выдержка расплава после завершения жидкофазного восстановления) процесс плавки может быть остановлен (расплав слит в изложницу) или дополнен *стадией рафинирования и доводки*: выдержки под слоем шлака до прекращения кипения, скачивания шлака, науглероживания путем добавки графита, десульфурации путем добавления плавикового шпата и извести и т. п. На стадии выдержки, доводки и слива расплава вращение печи прекращается, температура в рабочем пространстве поддерживается на уровне 1600–1700 °С.

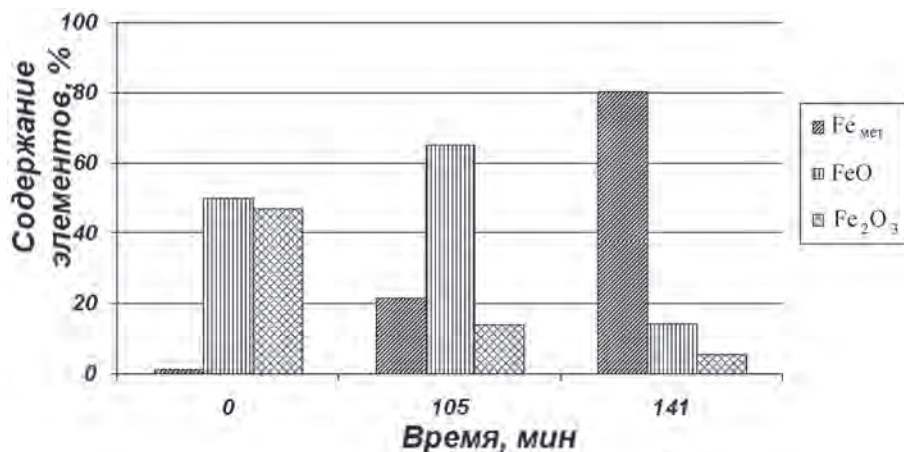


Рис. 1. Изменение состава окалины по ходу восстановительной плавки

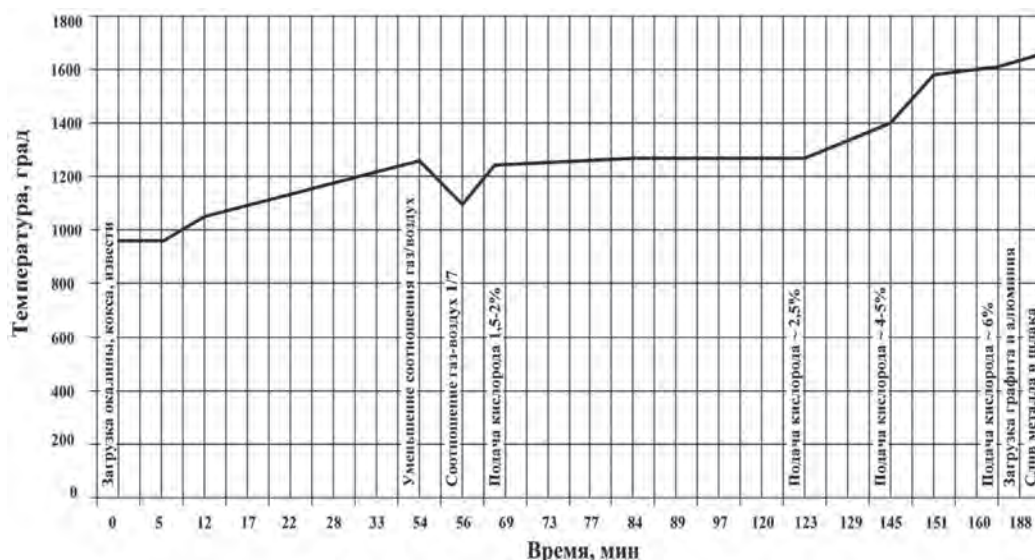


Рис. 2. Термовременной режим восстановительной плавки

В конце стадии твердофазного восстановления и перед сливом расплава из печи отбираются пробы для экспресс-анализа состава металла.

На рис. 3 показаны основные этапы процесса восстановительной плавки окалины на опытном образце ротационной наклоняющейся печи на Белорусском металлургическом заводе.

Материальный баланс восстановительной плавки окалины в РНП выполнен из расчета на 100 кг исходного железосодержащего сырья.

Исходные данные

Характеристики прокатной окалины:

химический состав: $Fe_{общ}$ – 68–75%; $Fe_{мет}$ – 2,6–4,3; FeO – 65–70; Fe_2O_3 – 25–32; элементы в пересчете изоксидов: Si – 0,13–0,17%; Mn – 0,40–0,45; S – 0,02–0,12; P – 0,01–0,015; Cu – 0,15–0,22; Cr – 0,1–0,2; Ni – 0,1–0,2%.

К расчету принят следующий состав железосодержащих компонентов: $Fe_{общ}$ – 72%; $Fe_{мет}$ – 3; FeO – 67; Fe_2O_3 – 30%.

Дисперсный состав, остаток на сите: < 0,05 – 3,83%; 0,063–2,9; 0,1 – 4,13; 0,16 – 5,3; 0,2 – 4,2; 0,315 – 7,76; 0,4 – 6,43; 0,63 – 10,36; 1,0 – 10,26; 1,6 – 15,8; 2,5 – 14,13; > 2,5 – 14,8%.

Плотность насыпная – 2200–2280 кг/м³.

Истинная плотность – 5000–5200 кг/м³.

Влажность – 3,15–3,35%.

Химический состав известняка: CaO – 53,7%; MgO – 0,48; SiO_2 – 1,59; Al_2O_3 – 0,74; п. п. п. – 43,2%.

Химический состав угля: C – 71%; H_2 – 5,0; N – 1,0; O – 22,1; S – 0,8; сверх 100%: W – 12,0; A (зола) – 9,5%.

Состав кокса: $C \geq 90\%$; S – 1,5; N – 1,0; A – 10; W – 1,0%.

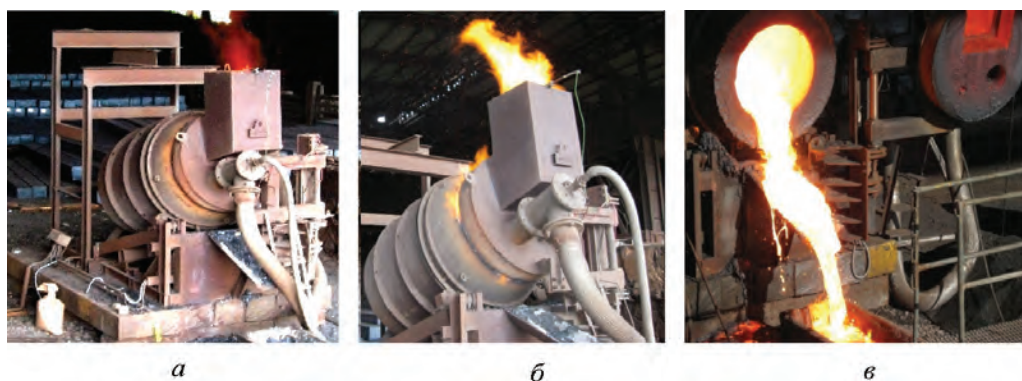


Рис. 3. Проведение экспериментальных восстановительных плавки окалины на РНП-500 (ОАО «БМЗ», 2010 г.): а – стадия твердофазного восстановления; б – стадия жидкофазного восстановления; в – слив металла и шлака в изложницу.

Температура исходных материалов равна температуре окружающей среды.

Температура расплава на выпуске из печи – 1450–1550 °С в зависимости от типа сплава. Температура газов на выходе из печи – 700–1300 °С (изменяется по ходу плавки).

Процессы десульфурации, корректировка (доводка) химического состава и рафинирование не проводятся по условию постановки задачи.

Состав полученного металла: $Fe_{\text{общ}}$ – 95–98%; $Fe_{\text{мет}}$ – 94–97; $FeO+Fe_2O_3$ – 2–5; Si – 0,1–0,5; Mn – 0,02–0,05; C – 0,2–2,1% при получении стали, или C – 3,1–3,8% при получении чугуна; S – 0,04–0,07; P – 0,02–0,01%.

Расчетный состав металла: $Fe_{\text{общ}}$ – 97%; $Fe_{\text{мет}}$ – 95; $FeO + Fe_2O_3$ – 3; Si – 0,3; Mn – 0,05; C – 1,5; S – 0,05; P – 0,015%.

Состав (усредненный) шлака: CaO – 17–21%; SiO_2 – 22–27; MgO – 2,6–3,8; FeO – 10–13; MnO – 2,4–2,7; Al_2O_3 – 16–25%.

Основность шлака – 1,1 – 2,2.

Выход металла из окалины в среднем (по практическим данным): 90% от железа общего $Fe_{\text{общ}}$.

Аналогично описанному выше технологическому процессу рециклинга прокатной окалины в ротационных наклоняющихся печах может быть реализована переработка и других оксидных железосодержащих отходов: проржавленной стружки, шлама, сырья, полученного при дроблении и магнитной сепарации металлургического шлака и др.

В качестве ограничения можно считать лишь нежелательность применения ультрадисперсного сырья (например, аспирационной пыли) и восстановителя – с размером частиц менее 10 мкм, так как это может привести к большим потерям на пылеунос. При рециклинге такого рода отходов в РНП наиболее рациональным решением является предварительная грануляция железосодержащего сырья и восстановителя. Оптимальным диапазоном размеров для сырья и восстановителя можно считать пределы от 0,5–1,0 до 20, для флюсов – от 10 до 50 мм.

В отличие от переработки оксидных многокомпонентных железосодержащих отходов рециклинг стружки, мелкого скрапа, обрезков проволоки, металлической пыли и других подобных металлических отходов, которые содержат относительно небольшое количество оксидов железа и других неметаллических примесей (не более 5–10%), может быть организован, минуя стадию твердофазного восстановления, что позволяет существенно сократить продолжительность переработки до 45–60 мин.

Процесс рециклинга дисперсных металлических отходов в ротационных плавильных печах в данном случае фактически сводится к переплавке отходов и включает в себя высокотемпературный безокислительный нагрев, расплавление, при необходимости – науглероживание, выдержку, скачивание шлака и выдачу расплава в разливочный ковш или изложницы.

Выводы

Разработанный и прошедший успешную апробацию технологический процесс рециклинга железосодержащих отходов в ротационных наклоняющихся печах в отличие от всех других известных методов получения железа позволяет получить металл из железосодержащего сырья, минуя стадию его предварительной подготовки (очистки, гомогенизации, окомковывания и т. д.), в одном технологическом агрегате периодического действия. Таким образом, становится реальностью решение задачи децентрализованного рециклинга дисперсных низкосортных железосодержащих отходов непосредственно в местах их образования на машиностроительных, металлообрабатывающих и металлургических предприятиях.

Сведения об авторах

Ровин Сергей Леонидович, УП «Технолит», ул. Я. Коласа, 24, 220013, г. Минск, Беларусь. Тел./факс + 375 17 292 85 20. E-mail: technolit@list.ru, technolit@tut.by.

Ровин Леонид Ефимович, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, пр. Октября, 48. 246746, г. Гомель, Беларусь. E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by.

Information about the authors

Rovin Sergey, Technolit company, 24 Kolasa str., Minsk, 220013, Belarus. Tel./fax+ 375 17 292 85 20. E-mail: technolit@list.ru, technolit@tut.by.

Rovin Leonid, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj, October Ave., 48, 246746, Gomel, Belarus. E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by.



УДК 621.74

Поступила 29.10.2015

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ОТВАЛЬНЫХ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ СМЕСЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНО-УДАРНЫМ СПОСОБОМ

EXPERIMENTAL RESEARCH OF PROCESSING OF DUMP SAND-CLAY MIXES BY THE CENTRIFUGAL AND SHOCK CRUSHING

В. В. ВОРОБЬЕВ, ОАО НПО «Центр», г. Минск, Беларусь, В. Ф. ОДИНОЧКО, Ю. Ю. ГУМИНСКИЙ, К. Д. ШИШПОР, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

V. V. VOROBEEV, JSC NPO CENTER, Minsk, Belarus, V. F. ODINCHKO, Y. Y. GUMINSKIY, K. D. SHISHPOR, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса центробежно-ударного дробления отвальной песчано-глинистой смеси. Использование продуктов переработки смеси в литейном производстве и производстве асфальтобетонных смесей позволяет полностью исключить вывоз смеси в отвал.

Results of experimental research of processing of centrifugal and shock crushing of dump sandy-clay mixes are given. Use of products of processing of received mixes in foundry production and in production of asphalt concrete mixes allows to exclude transportation of the mix to dumping.

Ключевые слова. *Отвальные песчано-глинистые смеси, центробежно-ударное дробление, добавки в песчано-глинистые смеси, порошок минеральный для асфальтобетонных смесей.*

Keywords. *Dump sandy-clay mixes, centrifugal and shock crushing, additives in sandy-clay mixes, mineral powder for asphalt concrete mixes.*

Большинство современных литейных производств используют в своем технологическом цикле оборотные формовочные смеси (ОФС), являющиеся огнеупорной основой единых формовочных смесей (ЕФС). Традиционно ОФС используются многократно с освежением.

В связи с широким применением технологии производства стержней по Колд-Бокс-Амин-процессу значительное количество оборотных формовочных песчано-глинистых смесей приходится отправлять в отвал. Это в первую очередь связано с тем, что стержневые смеси, обладая хорошей выбиваемостью, практически полностью после выбивной решетки перемешиваются с ОФС, что приводит к резкому увеличению их количества и необходимости вывоза избыточного количества ОФС в отвал.

На практике предприятия для сокращения количества отвальных смесей отказываются от освежения ОФС. Следствием этого является ухудшение их технологических свойств.

На кафедре «Машины и технология литейного производства» Белорусского национального технического университета совместно с ОАО НПО «Центр» была проведена серия экспериментальных исследований процесса переработки отвальных песчано-глинистых смесей ОАО «МТЗ». При этом было использовано лабораторное оборудование НПО «Центр»: центробежно-ударная дробилка ДЦ-0,4 (рис. 1) и пневматический классификатор (рис. 2).

В основе конструкции экспериментальной установки лежит центробежно-ударный способ дробления. Измельчаемый материал через воронку подается в ускоритель дробилки. Кинетическая энергия частиц исходного материала, разогнанного центробежными силами вращающегося вокруг вертикальной оси ускорителя и выброшенного в камеру дробления, обеспечивает его разрушение при ударе о футеровку дробилки в виде отбойной стальной кольцевой плиты (рис. 3).



Рис. 1. Установка для дробления материалов:
1 – загрузочная воронка; 2 – дробильная камера;
3 – накопительная камера; 4 – отверстие для вы-
грузки обработанного материала

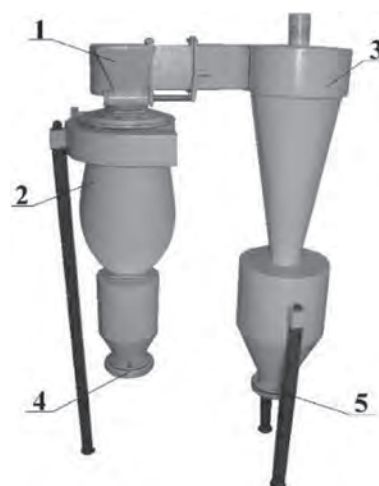


Рис. 2. Установка для воздушной сепарации: 1 –
загрузочная воронка; 2 – камера воздушной сепарации;
3 – циклон; 4 – отверстие для материала;
5 – отверстие для выгрузки пылевидной фракции



Рис. 3. Схема устройства для центробежно-ударного дробления минеральных материалов

Целью исследований было центробежно-ударное дробление отвальной песчано-глинистой смеси и предварительная экспериментальная проверка продуктов дробления на предмет их возможного использования в производстве.

С учетом ранее полученного НПО «Центр» опыта измельчения кварцевых материалов в дробилке ДЦ-0,4 и в связи необходимостью минимизации процесса разрушения зерен кварца в составе отвальной смеси был выбран щадящий режим обработки. В этом режиме проба смеси в количестве 30 кг подвергалась обработке в течение 30–35 с. Расчетная скорость частиц смеси в момент удара составляла 75–80 м/с. Одна и та же проба смеси обрабатывалась 5 раз подряд, при этом после каждого опыта проводили анализ гранулометрического состава продукта.

На рис. 4 приведены результаты анализов гранулометрического состава кварцевого формовочного песка, отвальной смеси и продуктов переработки. Из рисунка видно, что уже после первого опыта в продуктах переработки количество зерен основных фракций (0,1 – 0,315 мм) практически соответствует их содержанию свежего кварцевого песка. При этом после каждого опыта содержание пыли (частицы менее 0,1 мм) в продуктах переработки составляет до 7 % вследствие измельчения более крупных частиц.

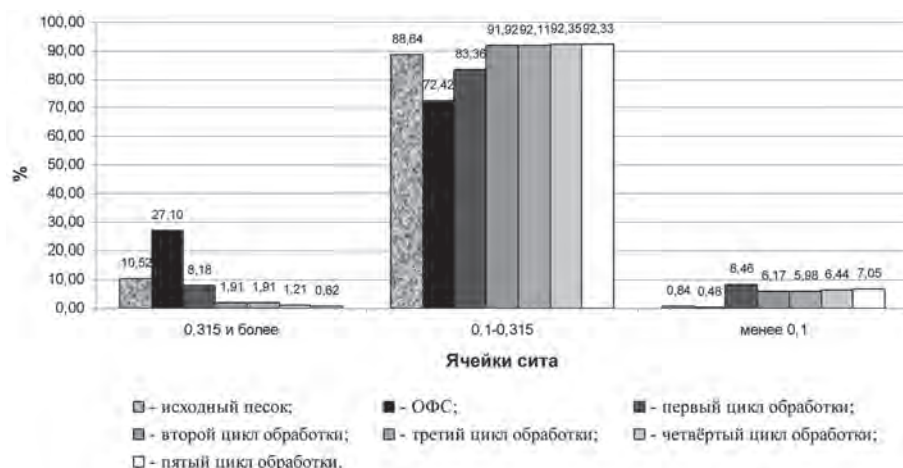


Рис. 4. Результаты гранулометрического анализа продуктов центробежно-ударной переработки отвальной смеси

Характерно, что мелкая фракция с размерами частиц до 0,1 мм после первого опыта в основном состоит из частиц бентонитовой глины, молотого угля и содержит незначительное количество кварцевой пыли. Учитывая химический состав этого отхода, исследовали возможность частичной замены (от 2 до 6%) в составах песчано-глинистых смесей бентонита и молотого угля.

Эксперименты показали, что добавление в смесь 2–4 % пылевидной фракции (отхода регенерации) при соответствующем сокращении бентонита в пределах 0,3–0,5 % и угольной добавки 0,2–0,3 % существенно на технологические свойства не повлияло, но позволило сэкономить бентонит и молотый уголь. При этом прочность на сжатие находилась в пределах 1,05–1,21 МПа, текучесть – 42–45 %, уплотняемость – 37–41 %, газопроницаемость – 85–104 ед.

Технологические испытания песчано-глинистых смесей, в состав которых в качестве освежающей добавки вводили свежий песок и продукт переработки (регенерат) до 10 % от количества ЕФС, осуществляли в лаборатории ОАО «МТЗ». Замесы проводили с использованием лабораторного каткового смесителя. Время перемешивания сухих компонентов – 1 мин и затем еще 1,5 мин при добавлении воды.

Как показали результаты экспериментов, технологические свойства образцов с освежающей добавкой (регенератом) практически не отличаются от свойств образцов с добавкой свежего песка при всех других равных условиях. Результаты технологических испытаний ЕФС с добавлением регенерированного песка в качестве освежающей добавки приведены в таблице.

Технологические испытания ЕФС с добавлением регенерата в качестве освежающей добавки

Состав смеси, мас. %	Свойства смеси	
	газопроницаемость, ед.	прочность на сжатие, МПа
ОФС-100	112–128	1,01–1,07
ОФС-98, регенерат 2	113–127	1,15–1,18
ОФС-95, регенерат 5	115–129	1,19–1,25
ОФС-90, регенерат 10	114–128	1,24–1,27

Из таблицы видно, что при одновременном незначительном изменении остальных параметров повышается прочность образцов смесей на сжатие за счет образования новых адгезионных связей между регенератом и связующим материалом. При этом газопроницаемость остается неизменной. Это означает, что данный регенерат может вполне успешно применяться в качестве освежающей добавки вместо свежего песка.

Кроме использования продуктов ударно-центробежной переработки отвалных смесей, в литейном производстве еще одной областью применения пылевидной фракции может быть использование ее в качестве минерального порошка в составе асфальтобетонных смесей. Об этом свидетельствуют результаты экспериментов, проведенные в лаборатории кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» БНТУ [1].

Таким образом, результаты предварительных экспериментов позволяют сделать выводы о том, что внедрение процесса центробежно-ударной обработки отвалных песчано-глинистых смесей в производство позволит сократить расход формовочных песков, исключить затраты на вывоз смеси в отвал. Пропорционально количеству регенерированного песка можно сократить расходы на приобретение свежего песка и его доставку.

Кроме того, использование измельченных отвалных смесей в качестве минерального порошка, соответствующего ГОСТ 16557–2005 «Порошок минеральный для асфальтобетонных и органо-минеральных смесей», позволяет полностью исключить вывоз смеси в отвал.

Литература

- Б у с е л А. В. Инженерная экология дорожно-строительных материалов. Мн.: Университетское, 1997. 190 с.

References

- B u s e l A. V. *Inzhenernaya ekologiya dorozhno-stroitel'nykh materialov* [Engineering ecology of road-building materials]. Minsk, Universitetskoe Publ., 1997, 190 p.

Сведения об авторах

Одиночко Виктор Федорович, Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск, Беларусь, Velcom + 375447343168.

Воробьев Владимир Васильевич, ОАО НПО «Центр», Беларусь, ул. Шаранговича, 19, 220018, г. Минск, Беларусь. E-mail: mail@npo-centr.com, тел. + 375172590439.

Information about the authors

Odinochko Viktor, Belarusian National Technical University, 65, Nezavisimosti ave., Minsk, 220013, Belarus.
Velcom +375 44 734 31 68.



УДК 621.74

Поступила 15.10.2015

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

RESEARCH OF THE MATHEMATICAL MODELS OF CONTINUOUS CAST INGOTS

Р. И. ЕСЬМАН, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,

Е. И. МАРУКОВИЧ, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь

R. I. ESMAN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,

E. I. MARUKOVICH, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus

Разработаны краевые задачи двумерного температурного поля с учетом сопряженных тепловых и гидродинамических процессов формирования непрерывнолитой заготовки. Получено численное решение задачи нестационарных температурных полей и температурных напряжений в заготовке и металлической форме в процессе их термодиффузионного взаимодействия.

Boundary problems of a two-dimensional temperature fields taking into account the interfaced thermal and hydrodynamic processes of formation of continuous cast ingots are developed. The numerical solution of a problem of non-steady temperature fields and temperature tension in ingots and a in the metal form in the course of their thermodiffusional interaction is received.

Ключевые слова. Математическая модель, термодиффузионное взаимодействие, численные методы.

Keywords. Mathematical model, thermodiffusional interaction, numerical methods.

Предложены математическая модель и численное решение задачи нестационарной теплопроводности с переменными источниками теплоты, действующими на протяжении процесса затвердевания. При этом учитывается перемещение фронта фазовых превращений во времени и пространстве.

Приведено численное решение задачи сложного теплообмена при получении литых заготовок в виде слитков прямоугольного сечения в металлической форме. Ввиду двойной осевой симметрии можно ограничиться изучением тепловых процессов в слитках и кристаллизаторах, расположенных в первой координатной четверти. При расчете учитывается зазор между формирующимся слитком и кристаллизатором, образованный слоем покрытия и газовой прослойки, обусловленной усадкой материала заготовки и термическими деформациями металлической формы.

Поле температур в плите и кристаллизаторе описывается дифференциальными уравнениями:

$$c_1(T_1)\rho_1(T_1)\frac{\partial T_1(x,y,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_1(T_1)\frac{\partial T_1(x,y,t)}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda_1(T_1)\frac{\partial T_1(x,y,t)}{\partial y}\right], \quad (1)$$

$$c_2(T_2)\rho_2(T_2)\frac{\partial T_2(x,y,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_2(T_2)\frac{\partial T_2(x,y,t)}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda_2(T_2)\frac{\partial T_2(x,y,t)}{\partial y}\right], \quad (2)$$

где c_1 , ρ_1 , λ_1 , T_1 и c_2 , ρ_2 , λ_2 , T_2 – соответственно теплофизические характеристики и температуры заготовки и кристаллизатора.

Уравнение (1) решается в прямоугольной области ($0 \leq x \leq a_0$, $0 \leq y \leq b_0$), а уравнение (2) – в сложной области в виде угла, получаемой при вычитании из области ($0 \leq x \leq a$, $0 \leq y \leq b$) области, занятой отливкой.

Сформулируем граничные и контактные условия. Контактные условия ставятся на общей границе заготовки и формы исходя из условий сопряжений.

Рассматривая теплоотдачу от заготовки к форме через двухслойную стенку (воздух + покрытие) по аналогии с одномерной задачей, граничные условия можно записать в виде

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \quad (3)$$

при $x = a_0$, $0 \leq y \leq b_0$;

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \quad (4)$$

при $y = b_0$, $0 \leq x \leq a_0$,

где $\lambda_{\text{пок}}$, $\lambda_{\text{в}}$ – теплопроводность покрытия и воздуха; $\delta(x, t)$ – зазор в контакте $y = b_0$ в момент времени t ; $\delta(y, t)$ – зазор в контакте $x = a_0$ в момент времени t .

При записи уравнений (3), (4) учитывали только процесс теплопроводности через покрытие и процесс теплопроводности и теплоизлучения через слой воздуха. Процессом конвекции в зазоре пренебрегаем.

На осях симметрии можно записать

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0 \text{ при } y = 0,$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial y} = \frac{\partial T_2}{\partial y} = 0 \text{ при } x = 0.$$

Предполагая, что теплообмен с наружной поверхности формы можно представить по закону Ньютона, будем иметь

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \alpha(T_2 - T_{\infty}) \text{ при } x = a,$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = \alpha(T_2 - T_{\infty}) \text{ при } y = b,$$

где T_{∞} – температура внешней среды; α – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности формы.

Коэффициент α определяется способом охлаждения наружной поверхности формы.

При свободном охлаждении формы в безграничном пространстве коэффициент α характеризует собой теплоотдачу свободной конвекцией и излучением: $\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}$:

$$\alpha_{\text{к}} = f(\text{Gr}, \text{Pr}),$$

$$\alpha_{\text{л}} = \varepsilon \sigma (T_2^2 + T_{\infty}^2)(T_2 + T_{\infty}).$$

При вынужденном охлаждении формы

$$\alpha = f(\text{Re}, \text{Pr}),$$

причем число Re вычисляется по толщине охлаждающей рубашки формы.

Начальные условия для уравнений (1), (2) запишем следующим образом:

$$T_1(x, y, 0) = T_{10},$$

$$T_2(x, y, 0) = T_{20},$$

где T_{10} – температура заливки; T_{20} – начальная температура равномерно прогретой формы.

Определим в качестве характерного размера длину формы a , а в качестве характерной температуры – температуру окружающей среды $T_0 = T_{\infty}$. Перепишем задачу в безразмерных переменных:

$$a^2 c_1 \rho_1 \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (7)$$

при $0 \leq x \leq \bar{a}_0$, $0 \leq y \leq \bar{b}_0$;

$$a^2 c_2 \rho_2 \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2 \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (8)$$

при $0 \leq x \leq 1$, $b_0 \leq y \leq \bar{b}$, $\bar{a}_0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq b_0$;

$$-\lambda_1 \frac{\partial u}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial v}{\partial x} \quad (9)$$

при $x = \bar{a}_0, 0 \leq y \leq \bar{b}_0$;

$$-\lambda_1 \frac{\partial u}{\partial y} = -\lambda_2 \frac{\partial v}{\partial y} \quad (10)$$

при $x = b_0, 0 \leq x \leq 1$;

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \text{ при } x = 0; \quad (11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \text{ при } y = 0; \quad (12)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial v}{\partial x} = \alpha a v \text{ при } x = 1; \quad (13)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial v}{\partial y} = \alpha a v \text{ при } y = \bar{b}; \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} u &= u_0 \text{ при } t = 0; \\ v &= v_0 \text{ при } t = 0, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где u и v – безразмерные температуры в области I и II соответственно.

В уравнениях (9), (10) $\delta_{\text{покр}} \neq 0, \delta \neq 0$.

При $\delta = 0, \delta_{\text{покр}} \neq 0$ их следует заменить соответственно на условия:

$$-\lambda_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = (u - v) \frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} a,$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} = -\lambda_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} = (u - v) \frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} a;$$

при $\delta_{\text{покр}} = 0, \delta \neq 0$ на условия

$$-\lambda_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial u_2}{\partial x}, \quad (16)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} = -\lambda_2 \frac{\partial u_2}{\partial y}, \quad (17)$$

наконец, при $\delta_{\text{покр}} = 0$ и $\delta = 0$ будем иметь

$$\lambda_1 \frac{\partial u}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial v}{\partial x}, \quad u = v,$$

$$\lambda_1 \frac{\partial u}{\partial y} = \lambda_2 \frac{\partial v}{\partial y}, \quad u = v.$$

Значения δ в равенствах (9), (10), (16), (17) определяются исходя из рассмотрения упругих деформаций формы.

В период фазового перехода уравнение (1) распадается на два уравнения, описывающие теплопроводность в жидкой и твердой фазах с добавлением условий на границе раздела фаз ξ :

$$\lambda_{1T} \text{grad}(T_1) \Big|_{\xi+0} - \lambda_{1ж} \text{grad}(T_1)_{\xi-0} = -\tilde{r} \tilde{\rho} \frac{d\xi}{dt}.$$

Вводя в рассмотрение δ -функцию Дирака и разрывные теплофизические коэффициенты, процесс фазового перехода можно описать с помощью одного уравнения

$$\rho_1 \left[c_1 + r \delta(T_1 - T_\Phi) \right] \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \right), \quad (18)$$

где $\rho_1, c_1, \lambda_1 = \begin{cases} \rho_{1T}, c_{1T}, \lambda_{1T} & \text{при } T_1 < T_\Phi; \\ \rho_{1ж}, c_{1ж}, \lambda_{1ж} & \text{при } T_1 > T_\Phi. \end{cases}$

Решение (18) производят путем сглаживания δ -функции и теплофизических коэффициентов, осуществляя замену фронта фазового перехода на некоторую его область $(T_\Phi - \Delta, T_\Phi + \Delta)$.

Введем в области I и II общую прямоугольную сетку, равномерную по каждой из осей, причем предположим, что контактные поверхности $x = \bar{a}_0$ и $y = -\bar{b}_0$ лежат на узлах сетки. Пусть N_1 и N_2 – число узлов по горизонтали и вертикали соответственно, тогда шаг по горизонтали $h_1 = 1/N_1$, а по вертикали $h_2 = 1/N_2$.

Предположим, что горизонтальная строка узлов на контактной поверхности имеет номер M_1 , а вертикальный столбец – M_2 . Будем решать задачу на фиктивной сетке с узлами:

$$x_i = \left(i + \frac{1}{2}\right)h_1, \quad y_i = \left(j + \frac{1}{2}\right)h_2$$

при $i = -1, 0, \dots, N_1; j = -1, 0, \dots, N_2$.

Неявные конечно-разностные уравнения, соответствующие выражениям (7)–(15), на узлах фиктивной сетки на шеститочечном шаблоне в момент времени $t = (l+1)\tau$ имеют вид

$$\begin{aligned} a^2 c_{i,j}^{(1)} \rho_{i,j}^{(1)} \frac{u_{i,j}^{l+1} - u_{i,j}^l}{\tau} = & \frac{1}{h_1} \left(\lambda_{i+\frac{1}{2},j}^{(1)} \frac{u_{i+1,j}^{l+1} - u_{i,j}^{l+1}}{h_1} - \lambda_{i-\frac{1}{2},j}^{(1)} \frac{u_{i,j}^{l+1} - u_{i-1,j}^{l+1}}{h_1} \right) + \\ & \frac{1}{h_2} \left(\lambda_{i,j+\frac{1}{2}}^{(1)} \frac{u_{i,j+1}^{l+1} - u_{i,j}^{l+1}}{h_2} - \lambda_{i,j-\frac{1}{2}}^{(1)} \frac{u_{i,j}^{l+1} - u_{i,j-1}^{l+1}}{h_2} \right), \end{aligned} \quad (19)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, M_1 - 1; j = 0, 1, 2, \dots, M_2 - 1; l = 0, 1, 2, \dots;$

$$\begin{aligned} a^2 c_{i,j}^{(2)} \rho_{i,j}^{(2)} \frac{v_{i,j}^{l+1} - v_{i,j}^l}{\tau} = & \frac{1}{h_1} \left(\lambda_{i+\frac{1}{2},j}^{(2)} \frac{v_{i+1,j}^{l+1} - v_{i,j}^{l+1}}{h_1} - \lambda_{i-\frac{1}{2},j}^{(2)} \frac{v_{i,j}^{l+1} - v_{i-1,j}^{l+1}}{h_1} \right) + \\ & \frac{1}{h_2} \left(\lambda_{i,j+\frac{1}{2}}^{(2)} \frac{v_{i,j+1}^{l+1} - v_{i,j}^{l+1}}{h_2} - \lambda_{i,j-\frac{1}{2}}^{(2)} \frac{v_{i,j}^{l+1} - v_{i,j-1}^{l+1}}{h_2} \right), \end{aligned}$$

где $\left. \begin{matrix} i = 0, 1, 2, \dots, N_1 - 1 \\ j = M_2, M_2 + 1, \dots, N_2 \end{matrix} \right\}, \left. \begin{matrix} i = M_1, M_1 + 1, \dots, N_1 - 1 \\ j = 0, 1, 2, \dots, M_2 - 1 \end{matrix} \right\} l = 0, 1, 2;$

$$-\lambda_{M_1-\frac{1}{2},j}^{(1)} \frac{u_{M_1,j}^{l+1} - u_{M_1,j-1}^{l+1}}{h_1} = -\lambda_{M_1-\frac{1}{2},j}^{(2)} \frac{v_{M_1,j}^{l+1} - v_{M_1-1,j}^{l+1}}{h_1} = \kappa_j \left(\frac{u_{M_1,j}^{l+1} + u_{M_1,j-1}^{l+1}}{2} - \frac{v_{M_1,j}^{l+1} + v_{M_1-1,j}^{l+1}}{2} \right), \quad (20)$$

где $j = -1, 0, 1, \dots, M_2 - 1;$

$$-\lambda_{i,M_2-\frac{1}{2}}^{(1)} \frac{u_{i,M_2}^{l+1} - u_{i,M_2-1}^{l+1}}{h_2} = -\lambda_{i,M_2-\frac{1}{2}}^{(2)} \frac{v_{i,M_2}^{l+1} - v_{i,M_2-1}^{l+1}}{h_2} = \kappa_i \left(\frac{u_{i,M_2}^{l+1} + u_{i,M_2-1}^{l+1}}{2} - \frac{v_{i,M_2}^{l+1} + v_{i,M_2-1}^{l+1}}{2} \right), \quad (21)$$

где $i = -1, 0, 1, \dots, M_1 - 1;$

$$\begin{aligned} \kappa_j = & \frac{\frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} a \left(\frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta_j} + \alpha_{\text{л}j} \right)}{\frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} + \frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta_{\text{в}}} + \alpha_{\text{л}j}} \quad \text{при } \delta_{\text{покр}} \neq 0 \text{ и } \delta_{\text{в}} \neq 0; \\ \kappa_j = & \frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} a \quad \text{при } \delta_{\text{покр}} \neq 0, \delta = 0; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\kappa_j = \frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta_j} + \alpha_{\text{л}j} \text{ при } \delta_{\text{покр}} = 0, \delta \neq 0;$$

$$\sigma_i = -\beta_i E \left[\left(\frac{v_{i,0} + v_{i,-1}}{2} + 1 \right) T_0 - T_{20} \right] + \frac{1}{N_1 - M_1} \sum_{i=M_1}^{N_1} \varepsilon_i \beta_i E \left[\left(\frac{v_{i,0} + v_{i,-1}}{2} + 1 \right) T_0 - T_{20} \right],$$

$$\sigma_j = -\beta_j E \left[\left(\frac{v_{0,j} + v_{-1,j}}{2} + 1 \right) T_0 - T_{20} \right] + \frac{1}{N_2 - M_2} \sum_{j=M_2}^{N_2} \varepsilon_j \beta_j E \left[\left(\frac{v_{0,j} + v_{-1,j}}{2} + 1 \right) T_0 - T_{20} \right],$$

где β_i и β_j – коэффициенты температурного расширения материала вычисляются по температуре $(v_{i,0} + v_{i,-1})/2$ и $(v_{0,j} + v_{-1,j})/2$ соответственно. При вычислении интегралов использовали формулу трапеций.

В специальных технологиях литья в процессе движения расплава в полости формы происходит охлаждение жидкого металла и затвердевание за счет теплоотвода в стенку металлической формы (матрицы) или в неметаллическую форму. Вследствие этого вязкость металла непрерывно изменяется по времени, что определяет нестационарный характер течения. Другой особенностью рассматриваемой задачи является наличие фазового перехода в жидком металле (затвердевания). Благодаря теплоотдаче в форму температура расплава непрерывно уменьшается, а вязкость возрастает. При дальнейшем охлаждении на поверхностях формы образуется твердая корочка затвердевшего металла и происходит перемещение фронта кристаллизации в глубь заготовки.

Система дифференциальных уравнений движения расплава должна включать уравнение энергии, уравнение неразрывности, уравнение закона сохранения количества движения. Уравнение энергии (теплопроводности), описывающее распределение температуры в движущемся металле, а также по сечению кристаллизатора, имеет вид

$$c_i \rho_i \frac{dT_i}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right), \quad (23)$$

где $i = 1$ – отливка, $i = 2, 3$ – форма.

Для отливки ($i = 1$) полная производная

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z}$$

характеризует локальное и конвективное изменение температуры.

Для формы уравнение (23) переходит в уравнение теплопроводности при $v_x = v_y = v_z = 0$. В процессе затвердевания заготовки в уравнении вместо теплоемкости c_1 используется величина эффективности теплоты кристаллизации.

Уравнение неразрывности (сплошности) выводится из закона сохранения массы. Вследствие несжимаемости жидкого металла ($\rho = \text{const}$) уравнение неразрывности учитывает только потери расхода на заполнение пустот усадочного происхождения:

$$\text{div} \vec{v} = \beta \frac{dm}{dt}, \quad (24)$$

где $\vec{v}$ – вектор скорости потока; m – относительное содержание жидкой фазы в момент t ; β – относительная величина объемной усадки.

Как было отмечено, при течении расплава в форме по мере отвода теплоты вязкость металла возрастает. Следовательно, вязкость не является постоянной величиной, а зависит от температуры и координат $\mu = f(T, x, y, z)$. В связи с этим запишем уравнение движения потока охлаждающегося расплава в виде

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho g - \nabla p + \frac{\partial \vec{\tau}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{\tau}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{\tau}_z}{\partial z}. \quad (25)$$

В качестве объекта исследования рассмотрим наиболее характерное сечение сложной осесимметричной заготовки. Расчетная область представляет собой полость кольцевого канала переменного сечения с внутренним выступом, в которой происходит движение и затвердевание расплава при несимметричных условиях охлаждения: на внутренней поверхности металл затвердевает за счет теплоотвода в песчаный стержень, на наружной поверхности – за счет теплоотвода в кристаллизатор (матрицу).

При расчете затвердевания металла теплоту кристаллизации введем в теплоемкость в точках, занятых областью фазового превращения. При этом предполагаем, что заполнение формы осуществляется сплошным ламинарным потоком: в начальный момент времени вязкость, плотность, температура расплава имеют постоянные значения по всему объему, а между потоком и поверхностью формы имеется плотный контакт. По мере охлаждения металла вязкость будем рассматривать как переменную величину во всей области течения $\mu = \mu(T)$. С этой целью воспользуемся зависимостью эффективной вязкости от температуры для высокопрочного алюминиевого сплава.

При конечно-разностной аппроксимации уравнений переноса (движения) воспользуемся методом контрольного объема, широко применяемым при решении задач течения и конвективного переноса. Разбивка расчетной области на контрольные объемы производится следующим образом. Вначале наносится нерегулярная сетка с узлами на пересечении координатных линий. Затем каждый узел связывают с контрольным объемом, грани которого проходят посередине между двумя смежными узлами. Исходная система дифференциальных уравнений интегрируется по каждому объему при замене подынтегральных выражений соответствующими интерполяционными многочленами, которые описывают изменение параметров между узловыми точками. В результате для данной системы находят дискретный аналог, который связывает значение параметра в данной узловой точке с его значениями в соседних узлах. Точность конечно-разностной схемы в значительной степени зависит от вида интерполяционного полинома.

На примере охлаждения и затвердевания заготовки сложной конфигурации исследованы процессы гидродинамики и теплообмена для нестационарного режима, начиная со стадии заполнения полости формы расплавом и заканчивая затвердеванием заготовки. Результаты расчетов по разработанному алгоритму представлены в виде распечаток температурных полей, полей скоростей и давлений в различных сечениях струи жидкого металла при его движении в полости формы.

Литература

1. Есьман Р. И., Жмакин Н. П., Шуб Л. И. Расчеты процессов литья. Мн.: Вышэйш. шк., 1977.
2. Полянин А. Д., Зайцев В. Ф., Журов А. И. Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики. М.: Физматлит, 2005.
3. Есьман Р. И., Марукович Е. И. Численное решение краевой задачи нестационарной теплопроводности // Весці НАН Беларусі. Сер.-фіз. тэхн. навук. 2012. № 3. С. 5–9.

References

1. Es'man R. I., Zhmakin N. P., Shub L. I. *Raschety processov lit'ya* [Calculation of casting processes]. Minsk, Vyshejschaya shkola Publ., 1977.
2. Polyandin A. D., Zaycev V. F., Zhurov A. I. *Metody resheniya nelinejnyh uravneniy matematicheskoy fiziki i mehaniki* [Methods for solving nonlinear equations of mathematical physics and mechanics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005.
3. Es'man R. I., Marukovich E. I. Chislennoe reshenie kraevoy zadachi nestacionarnoy teploprovodnosti [Numerical solution of boundary problem of non-stationary heat conduction]. *Vesci Natsionalnay akademii nauk Belarusi, serija fiziko-tehnicheskikh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2012, no. 3, pp. 5–9.

Сведения об авторах

Есьман Руслан Иосифович, Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь. Тел. +375 (29) 378-25-07.

Марукович Евгений Игнатьевич, Институт технологии металлов НАН Беларуси, ул. Бялыницкого-Бирули, 11, 212030, г. Могилев, Беларусь. Тел. +375 (222) 28-06-20.

Information about the authors

Es'man Ruslan, Belarusian National Technical University, 65, Nezavisimosti ave., Minsk, 220013, Belarus. Tel. +375 (29) 378-25-07.

Marukovich Evgeny, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Bialynitskogo-Biruli str., Mogilev, 212030, Belarus. Tel. +375 (222) 28-06-20.



Поступила 17.09.2015

ИНВЕСТИЦИОННАЯ ПРОГРАММА – КЛЮЧ К УСТОЙЧИВОМУ РАЗВИТИЮ ПРЕДПРИЯТИЯ THE INVESTMENT PROGRAM – KEY TO A SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE ENTERPRISE

В. Э. МАРУШКЕВИЧ, С. А. МОЗГОВ, ОАО «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», г. Жлобин, Беларусь

V. E. MARUSHKEVICH, S. A. MOZGOV, JSC «Belarusian Steel Works – Management Company of Holding «Belarusian Metallurgical Company», Zhlobin city, Belarus

Настоящая статья раскрывает предпосылки устойчивого развития ОАО «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания» и механизм формирования инвестиционной программы предприятия на период 2016–2020 гг.

The present article describes prerequisites for the sustainable development of the Open Joint Stock company «The Belarusian Steel Works – management company of the Holding «Belarusian Metallurgical Company» and mechanism for preparation of the investment program of the enterprise for 2016–2020.

Ключевые слова. *Инвестиционная программа, инвестиционный проект, программа развития, развитие, инвестиции, предпроектная документация.*

Keywords. *Investment program, investment project, program of development, development, investments, prefeasibility documentation.*

В условиях, когда общество и бизнес ищут оптимальные пути выхода из глобального финансово-экономического кризиса, ОАО «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «БМК» продолжает движение вперед, следуя принятой среднесрочной стратегии развития.

Разработанная программа развития БМЗ на период до 2020 г. сформирована как долгосрочная концепция бизнеса, определяющая ключевые цели, направления и действия, обеспечивающие устойчивое развитие компании.

Бизнес – это деятельность, устремленная вперед, в будущее. Но говорить о будущем бессмысленно, если не менять настоящее. С этой целью в 2011–2015 гг. на предприятии была проведена, пожалуй, самая масштабная модернизация завода за всю его историю.

О развитии БМЗ в 2011–2015 годах

С момента реализации наиболее крупного проекта прошлой пятилетки (ввод в эксплуатацию в 2007 г. производства бесшовных горячекатаных труб) БМЗ активно продолжал двигаться по направлениям углубления технологического передела, повышения качества готовой продукции и эффективности производственной деятельности в целом.

В 2009 г. проведена комплексная реконструкция машины непрерывного литья заготовок № 3. В результате реконструкции скорости разлива были увеличены в среднем на 1/4, значительно улучшено качество разливаемой стали для последующего производства металлокорда. Кроме того, была получена возможность производства круглой литой заготовки диаметром 200 мм, которая минуя прокатный передел, напрямую передается для производства бесшовных труб.

В 2012 г. проведена реконструкция агрегата для производства бортовой бронзированной проволоки в сталепроволочном цехе № 1. Достигнуто снижение расходного коэффициента на катанку (исходное сырье), снижены удельные расходы электроэнергии при производстве.

Для обеспечения требований международных стандартов при производстве нефтегазопроводных труб в 2012 г. построен участок линии отделки труб № 3, где было установлено оборудование для шаблонирования, ультразвукового контроля концов и тела трубы, маркировки и упаковки труб. Вся проектная документация, включая технологическую и строительную части, была разработана силами специалистов БМЗ и проектировщиков Республики Беларусь. Кроме того, оборудование для транспортных систем, металлоконструкции и вспомогательное оборудование изготовлены на белорусских предприятиях.

В начале 2014 г. завод завершил целую серию важнейших проектов, которые работают на нашу стратегическую цель: наращивание за пятилетку объема выпуска стали до уровня 3,0 млн т в год. По сравнению с началом пятилетки прирост составит почти 400 тыс. т или 15%. Таким образом, для достижения этой цели было сделано следующее:

1. Проведена комплексная реконструкция дуговой сталеплавильной печи № 1. Кроме модернизации систем автоматизации и гидравлики, для интенсификации выплавки стали внедрена система вдувания кислорода, что ускоряет процесс плавки и позволяет значительно экономить электроэнергию. Для этой же печи реконструирована система пылегазоудаления. Решена проблема импортозамещения: построена новая известково-обжигательная установка № 3, запуск состоялся в феврале 2014 г.

2. Самый значимый проект 2014 года для БМЗ – модернизация машины непрерывного литья заготовок № 2. В результате модернизации скорости разлива увеличены в среднем на 45%, значительно улучшено качество стали. Эта качественная сталь пойдет в виде заготовки на обеспечение нового сортопрокатного цеха, в том числе для производства автокомпонентов для машиностроителей Беларуси и ведущих автопроизводителей Европы.

В настоящее время осуществляется поэтапный ввод в эксплуатацию технологических линий главного проекта пятилетки – сортопрокатного цеха № 2.

Среди основных успехов, которые мы достигли, необходимо отметить увеличение производительности электросталеплавильных печей в среднем на 10% и сокращение удельного потребления электроэнергии на 1 т выплавленной стали на 7,3%.

Но самым главным показателем, которого удалось достичь в результате проведения комплексной модернизации, экономия за счет постоянного внедрения новых технологий, сокращение затрат на производство, внедрение новых энергосберегающих технологий.

О развитии предприятий холдинга «Белорусская металлургическая компания»

Несмотря на то что управляющая компания была занята реализацией собственной инвестиционной программы, немаловажное значение было уделено предприятиям, входящим в состав холдинга «Белорусская металлургическая компания».

Так, вошедшее в 2006 г. в состав ПО «БМЗ» убыточное ОАО «Легмаш», имеющее на складах огромные запасы невостребованных швейных машин, сейчас – динамично развивающееся предприятие с новой специализацией. Это изготовление сменного оборудования и изделий для обеспечения технологического процесса БМЗ (прошивные оправки, рукавные фильтры, стропы, катушки тарные, спецодежда), а также поставка сварных металлоконструкций и вспомогательного оборудования для проектов холдинга по реконструкции и новому строительству.

На ОАО «Кобринский инструментальный завод «СИТОМО» освоено производство стальных ножей для пресс-ножниц копрового цеха БМЗ с качеством, не уступающим импортным аналогам. Необходимо отметить, что, учитывая высокую конкуренцию на рынке слесарно-монтажного инструмента, мы активно занимаемся поиском дальнейших путей развития предприятия. Совместно с представителями товаропроводящей сети БМЗ проводится работа по оценке возможности производства автокомпонентов из высоколегированных марок сталей на СИТОМО и организации их поставок на конвейеры российских и европейских автопроизводителей.

С использованием сырья БМЗ – стальной катанки, идет постоянное развитие ОАО «Речицкий метизный завод». Кроме постоянной модернизации метизного производства, в 2011 г. введена в эксплуатацию новая линия горячего цинкования, позволяющая наносить цинковое покрытие на трубы и металлоконструкции. Высокое качество покрытия соответствует Европейскому стандарту и обеспечивает гарантию эксплуатации изделий до 50 лет. В ближайшей перспективе завода – реализация инновационных проектов по производству оцинкованной проволоки и высокопрочного крепежа.

С целью привлечения прямых иностранных инвестиций часть проектов реализовывается в виде создания совместных предприятий.

10 декабря 2014 г. в Орше состоялся торжественный пуск первого в Республике Беларусь производства рукавов высокого давления (РВД) метражом. Оно будет осуществляться на совместном белорусско-итальянском предприятии СООО «Манули Гидравликс Мануфактуринг Бел», созданном в результате подписания инвестиционного договора между Министерством промышленности РБ, с одной стороны, и компанией «Манули РабберИндастрис» С.П.А. (Италия), ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», ОАО «Завод «Легмаш», с другой. «Манули Гидравликс Мануфактуринг Бел» будет выпускать рукава высокого давления одно- и двухоплеточной конструкций, которые найдут свое дальнейшее применение в гидравлических системах сельхозмашиностроения.

28 мая 2015 г. состоялся ввод в эксплуатацию новой воздухоразделительной установки, расположенной в непосредственной близости от БМЗ как наиболее экономически эффективный вариант обеспечения потребности БМЗ продуктами разделения воздуха для технологического процесса производства стали.

Был выбран самый оптимальный вариант реализации проекта по строительству новой воздухоразделительной установки – создание совместного предприятия, в состав учредителей которого вошли крупнейшие торговые партнеры ОАО «БМЗ – управляющей компании холдинга «БМК», с которыми завод имеет многолетний опыт взаимовыгодного сотрудничества.

Формирование инвестиционной программы на период 2016–2020 гг.

На Белорусском металлургическом заводе инвестиционная программа состоит из двух подпрограмм:

1. Программа поддержания производственных мощностей, направленная на замену (на аналогичное) устаревшего/неэффективного оборудования, отработавшего свой нормативный срок, экономический эффект от реализации которых явно не выражен.

2. Стратегический план развития, направленный на реконструкцию/модернизацию, создание новых производств с целью получения заданного на предстоящий период экономического эффекта.

Сегодня на Белорусском металлургическом заводе идет подготовительная работа по формированию новой инвестиционной программы предприятия, в основе которой лежит утвержденная Министерством промышленности Республики Беларусь Программа развития «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» до 2020 г. Программа содержит концептуальные направления развития управляющей компании в период с 2016 по 2030 гг. Приоритетным направлением для развития управляющей компании станет строительство комплекса для производства специальных и нержавеющей сталей. Данное направление уже рассмотрено и одобрено на заседании секции «Станкостроение и металлургия» Технико-экономического совета Министерства промышленности Республики Беларусь.

Главной целью развития холдинга «Белорусская металлургическая компания» в период 2016–2020 гг. будет создание условий для развития экономики республики на основе инновационного обновления, обеспечивающего повышение ее экономической эффективности, экологической безопасности, ресурсосбережение и повышение конкурентоспособности продукции в требуемых экономике номенклатуре, качеству и объемах поставок, в том числе поставок на рынок стран СНГ и мировой рынок при максимально возможном балансе государственных интересов Республики Беларусь.

Развитие холдинга будет ориентировано на максимальную концентрацию ресурсов для повышения конкурентоспособности на основании технического переоснащения, организацию новых производств по выпуску востребованной на рынке продукции с высокой добавленной стоимостью и качественными характеристиками, соответствующими мировым стандартам.

О мерах по совершенствованию строительной деятельности

Более подробно остановимся на некоторых понятиях, которые относятся к инвестиционной деятельности. Общепринято, что инвестиционная программа – это комплекс утвержденных инвестиционных проектов, направленных на достижение целевых установок (получение экономического или иного эффекта). Непосредственно сами инвестиции – вложения капитала с целью получения прибыли.

Инвестиции являются неотъемлемой частью современной экономики. От кредитов инвестиции отличаются степенью риска для инвестора (предприятия – инициатора): кредит и проценты необходимо возвращать в оговоренные сроки независимо от прибыльности проекта, инвестиции (инвестированный капитал) возвращаются и приносят доход только в прибыльных проектах. Если проект убыточен – инвестиции могут быть утрачены полностью или частично.

С целью более тщательной проработки проектов на предынвестиционной стадии недопущения неэффективного использования финансовых средств и ресурсов в 2014 г. на государственном уровне процесс инвестиционной деятельности был значительно оптимизирован.

Требованиями Указа Президента Республики Беларусь от 14.01.2014 года № 26 «О мерах по совершенствованию строительной деятельности» установлено, что:

- до разработки проектной документации на возведение, реконструкцию и реставрацию объектов строительства, относимых в соответствии с классификацией, установленной Государственным комитетом по стандартизации, к 1–4-му классам сложности (за исключением возведения объектов строительства по типовым или рекомендованным для повторного применения проектам) заказчиками, застройщиками разрабатывается и утверждается предпроектная (предынвестиционная) документация, включая обоснование инвестиций и задание на проектирование, в которой определяются необходимость, техническая возможность, оценка воздействия на окружающую среду (в случаях, предусмотренных законодательством о государственной экологической экспертизе), экономическая целесообразность осуществления инвестиций в возведение, реконструкцию и реставрацию объектов строительства, требования к земельному участку (при возведении, реконструкции объектов), варианты объемно-планировочных и технологических решений, сведения об инженерных нагрузках, а также источники и объемы финансирования, расчеты по определению эффективности осуществления инвестиций, социальных, экологических и других последствий возведения, реконструкции, реставрации и эксплуатации объектов строительства;

- затраты на разработку предпроектной (предынвестиционной) документации включаются в сводный сметный расчет стоимости объекта строительства как затраты, связанные с получением исходных данных. В случае принятия заказчиком, застройщиком по результатам разработки предпроектной (предынвестиционной) документации решения о нецелесообразности и (или) необоснованности осуществления инвестиций в возведение, реконструкцию и реставрацию объектов строительства указанные затраты подлежат списанию за счет основного источника, предусмотренного на выполнение проектных и изыскательских работ;

- в случае принятия заказчиком, застройщиком по результатам разработки предпроектной (предынвестиционной) документации решения о целесообразности и (или) обоснованности осуществления инвестиций в возведение, реконструкцию и реставрацию объектов строительства, предпроектная (предынвестиционная) документация может являться основанием для проведения заказчиком, застройщиком в установленном порядке закупки технологического оборудования для объекта строительства, необходимого для учета при разработке проектной документации на такой объект (в том числе с фактической поставкой такого оборудования на объект строительства в соответствии с заключенным договором и графиком поставки);

Таким образом, с одной стороны, для Заказчика предынвестиционная стадия увеличивается по продолжительности на период выбора аттестованной проектной организации и срок разработки обоснования инвестиций. С другой стороны, и это намного важнее, для инвестора риск реализации неэффективного проекта значительно снижается. В процессе разработки обоснования инвестиций более точно определяются затраты, связанные со строительно-монтажными работами, принимаются все принципиальные решения по подводу инженерной инфраструктуры, оценивается воздействие проекта на окружающую среду.

Лишь после разработки обоснования инвестиций, после определения результатов расчетов показателей эффективности проекта (результаты предпроектной деятельности) будет приниматься решение о реализации инвестиционного проекта.

Следует отметить, что в будущем результаты предпроектной подготовки несут положительный эффект и исключают возможность реализации неэффективных проектов.

Кроме того, Указом № 26 внесены изменения, связанные с параллельным проектированием и строительством объектов.

Понятие «параллельное проектирование и строительство объекта» было введено Указом Президента Республики Беларусь от 28 мая 2009 г. № 266, которым внесены изменения в Указ Президента Республики Беларусь от 16 ноября 2006 г. № 676 «О некоторых вопросах управления строительной отраслью и ее функционирования».

Такое нововведение было связано с практической стороны проектирования в Республике Беларусь, а именно с чрезвычайно длительными сроками подготовки проектной документации. Поэтому в целях

ускорения данного процесса и повышения инвестиционной привлекательности Республики Беларусь было принято решение разрешить параллельное проектирование и строительство объектов.

На практике данное явление зарекомендовало себя с отрицательной стороны: серьезно страдало качество проектной документации и, как следствие, качество выполняемых на ее основе строительных работ, возникали дополнительные расходы. В результате Указом № 26 запрещено параллельное проектирование и строительство, за исключением случаев, установленных Президентом Республики Беларусь.

Механизм экономического обоснования инвестиционных проектов

В целом основное значение разработки предпроектной документации – экономическая оценка целесообразности инвестиционных проектов.

С позиций оценки эффективности инвестиционного проекта определяется экономическая целесообразность и привлекательность проекта для решения конкретных общественных, производственных или социально-экономических задач, а также его коммерческая или финансовая эффективность.

Эффективность участия в проекте определяется с целью установления для инвесторов, финансирующих проект, конкретной экономической выгоды этого мероприятия. При оценке эффективности инвестиционных проектов соблюдаются следующие принципы:

- комплексность экономической оценки, которая предусматривает учет не только эффекта, получаемого конкретной отраслью или социальной сферой реализации проекта, но и экономического результата в сопутствующих или сопряженных областях влияния проекта, а также учет неопределенности и рисков, связанных с осуществлением инвестиционного проекта;
- системность при выборе оптимального инвестиционного решения реализуется в установлении единства целей и методов экономической оценки и всестороннего анализа и учета последствий принимаемых решений;
- согласованность факторов реализации проекта – источники финансирования и ритмичность использования финансовых потоков; учет возможной ограниченности ресурсов; сравнение альтернатив проектного решения по полноте оценки затрат и результатов и их сопоставимости; согласованность критериев оценки вариантов проектного решения и других специфических факторов;
- динамичность, которая реализуется в учете фактора времени при оценке использования производственных ресурсов как на стадии реализации проекта, так и при его эксплуатации.

Общие принципы методик оценки технико-экономической эффективности инвестиционных проектов включают в себя понятие и группировку инвестиций, необходимых для его реализации, систематизацию показателей, используемых в экономическом обосновании проектных решений, методы оценки экономической эффективности и сферы их использования в различных расчетах.

Все это формирует единый механизм экономического обоснования инвестиционных проектов. А обоснованные технически и экономически проекты и составляют инвестиционную программу, которая является ключом к устойчивому развитию каждого предприятия.

Сведения об авторе

Марушкевич Владимир Эдуардович, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК». 247210, Беларусь, г. Жлобин, Гомельская обл., Промышленная, 37. Тел. +375-2334-5-55-70.

Information about the autor

Marushkevich Vladimir, JSC «Belarusian Steel Works – Management Company of Holding «BMC», 37, Promyshlennaya str., Zhlobin city, 247210, Belarus. Tel. +375-2334-5-55-70.



УДК 628.74

Поступила 11.11.2015

20 ЛЕТ ОПЫТА С ТЕХНОЛОГИЕЙ ПОДОГРЕВА ЛОМА 20 YEARS OF EXPERIENCE WITH SCRAP PREHEATING TECHNOLOGY

ЙЕНС АПФЕЛЬ, МИШЕЛЬ ХАЙН, ХАНС-ЙОРГ ХУБЕР, ДЕНИЗ ЧАТАН, Primetals Technologies Germany GmbH, Райталленштрассе 1, 77731 Вильштетт, Германия

APFEL JENS, HEIN MICHEL, HUBER HANS-JÖRG, CATAN DENIZ, Primetals Technologies Germany GmbH, Reithallenstraße 1, 77731 Willstätt, Germany

Все больше стран внедряют новые правила и нормативы для повышения энергоэффективности, снижения выбросов CO₂ и других вредных веществ. Таким образом, производителям электростали нужна технология, отличающаяся низкими затратами и повышенной производительностью, которая поможет им соблюдать экологические требования. Десятилетия знаний в области технологий подогрева шихты и различные инновационные решения, ставшие эффективными в целом ряде уникальных случаев, были консолидированы и анонсированы в 2010 г. Дуговая сталеплавильная печь (ДСП) Quantum (Квантум) была спроектирована как прагматичное решение, отвечающее требованиям к энергоэффективности и рентабельности, повышению производительности и минимизации вредных выбросов. Вне зависимости от шихтового материала, будь то лом, жидкий чугун или железо прямого восстановления (DRI), ДСП Quantum обеспечивает высокую производительность электросталеплавильного производства при исключительно низких затратах на передел.

More and more countries worldwide implement new rules and regulations to improve energy efficiency and cut CO₂ and hazardous off-gas emissions. Thus electric steelmakers need technology that keeps costs low, increases productivity and helps them adhere to environmental regulations. Decades of knowledge in preheating technology, and several different innovative applications which had been solution for many unique cases have been brought together and announced in 2010. EAF Quantum was designed as a pragmatic solution that meets requirements for high energy and cost efficiency, increased productivity and lowest emissions. Whether scrap, partly hot metal or direct-reduced iron (DRI) is charged, EAF Quantum is the solution for highly productive electric steelmaking at extra low conversion costs.

Ключевые слова. Подогрев, шахта, электросталеплавильное производство, экологические нормативы, возмущения сети, автоматизация, история, Siemens, Primetals.

Keywords. Preheating Shaft, EAF, Electric Steelmaking, Environmental Compliance, Network Disturbances, Automation, History, Siemens, Primetals.

История шахтной технологии

ДСП Quantum (рис. 1) является результатом более 20 лет опыта инжиниринга и реализации технологий подогрева лома (рис. 2) и более 40 лет работы в области электросталеплавильного производства. В ходе разработки ДСП Quantum был учтен опыт более 20 печей Primetals Technologies, находящихся в эксплуатации в данное время и использующих решения для подогрева лома.

Отличительной чертой новой концепции ДСП Quantum можно назвать минимальные конверсионные затраты, максимальную производительность и соответствие требованиям экологической безопасности. Отходящие газы, образующиеся во время плавки, используются для подогрева 100% лома, который впоследствии опускается в рабочее пространство печи. Это способствует значительной экономии электроэнергии и затрат, а также существенному сокращению времени плавки (< 33 мин). Помимо болота с соответствующими характеристиками, данная печь отличается сокращенной фазой плавления, осуществляемой в полностью спокойной ванне, минимальными скачками напряжения и возмущениями сети.

ДСП Quantum имеет ряд преимуществ перед предыдущими поколениями шахтных печей и шахтных печей с пальцевым подогревом лома:

- Повышенная герметичность, обеспечивающая минимальное всасывание воздуха благодаря стационарной шахте и подвижному корпусу печи.

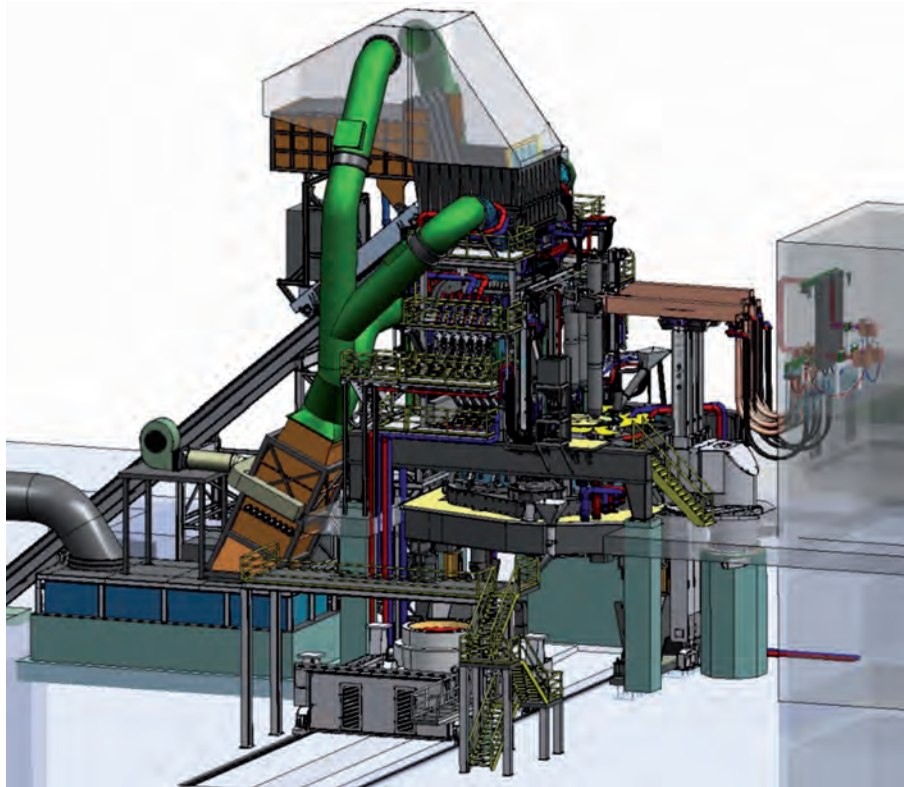


Рис. 1. Общий вид ДСП Quantum со стороны выпуска

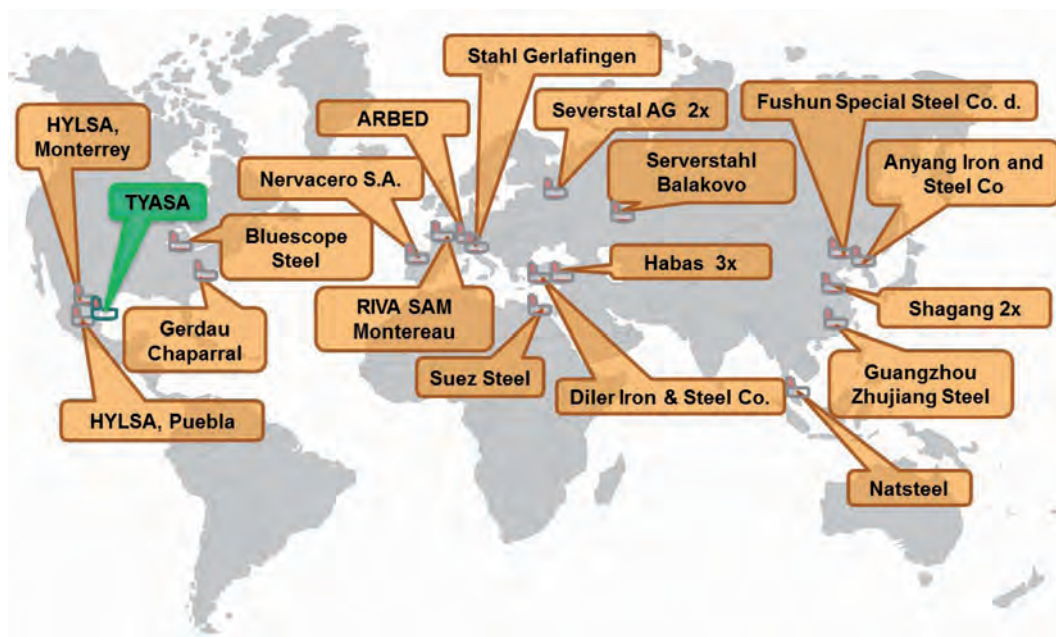


Рис. 2. Референции шахтных печей и шахтных печей с пальцевым удержанием лома

- Улучшенная трапецевидная шахта обеспечивает оптимальное распределение лома и эффективность подогрева, особенно при низкой плотности лома.
- Новая конструкция системы удержания лома для лучшей его подачи в зону плавления.
- Увеличение болота для улучшения теплообмена и ускорения процесса плавления.
- Плавление без скачков напряжения благодаря новой конструкции, предусматривающей особое расположение электродов относительно шахты.

Также ДСП Quantum представляет собой плавильный агрегат будущего благодаря оптимизированной и запатентованной системе выпуска стали FAST (furnace advanced slag-free tapping system – система

бешшлакового выпуска стали), обновленной технологии завалки и удержания лома, новейшим технологиям анализа и революционной конструкции системы очистки отходящих газов. Уровень энергопотребления 280 кВт·ч/т в сочетании со сниженным потреблением кислорода и топлива говорят об эффективности этого нового типа печей.

Практически все компоненты ДСП Quantum доказали свою эффективность в ходе промышленной эксплуатации на предприятиях по всему миру, например, концепция наклона подины на заводе Sherness (нынешнем Thamesteel) в Великобритании и система FAST на заводе Buderus Edelsahl.

Общая компоновка

Загрузка лома

От ломозаготовительного отделения лом может загружаться либо автотранспортом в специальную бадью (скип) на подъемнике, либо, как показано на рис. 1, магнитами и грейферным захватом на перегрузочной станции. При таком решении лом загружается краном непосредственно в один из двух промежуточных контейнеров, выгружающих впоследствии лом в скип.

Новая концепция завалки лома – скиповый подъемник для доставки лома от зоны выгрузки лома, находящейся под нулевым уровнем, и дальнейшей его завалки в печь обеспечивает точность и гибкость логистики завалки. Отсутствует необходимость применения корзины или крана для завалки. Более того, благодаря четкой цикличности и одинаковой продолжительности времени загрузки возможна комплексная автоматизация технологического процесса. ДСП Quantum может обрабатывать лом с плотностью от 0,5 до 0,8 т/м³.

Система подогрева лома (рис. 3, 4)

Эффективная рекуперация энергии с подогревом 100% лома обеспечивает расход энергии ниже 280 кВт·ч/т. Подогрев лома осуществляется в трапецевидной шахте с использованием новой конструкции системы удержания лома, это обеспечивает лучшее распределение лома и более эффективное направление потоков отходящих газов для оптимизации теплопередачи. Новая конструкция также предотвращает застревание лома в шахте. После подогрева лома пальцы раздвигаются через боковые стенки шахты, и шихта опускается в рабочее пространство печи.

Благодаря новому механизму открывания пальцев и большому объему корпуса печи, выполненного в форме подковы, нагретый лом погружается в большое болото, при этом пальцы могут закрываться сразу после этого, готовые принять новую партию шихты. Все перечисленные операции могут выполняться под током. Пальцевая система устанавливается на прочные свод или шахту печи, что позволяет избежать нагрузок, создаваемых массой лома на водоохлаждаемые части и, таким образом, исключить риск утечки воды.

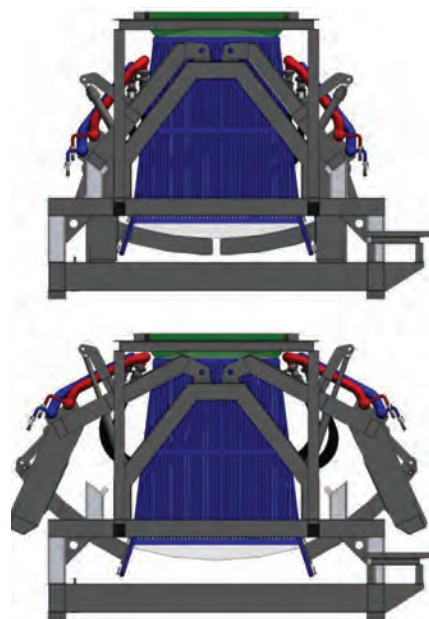


Рис. 3. Система удержания лома с модульными водоохлаждаемыми панелями

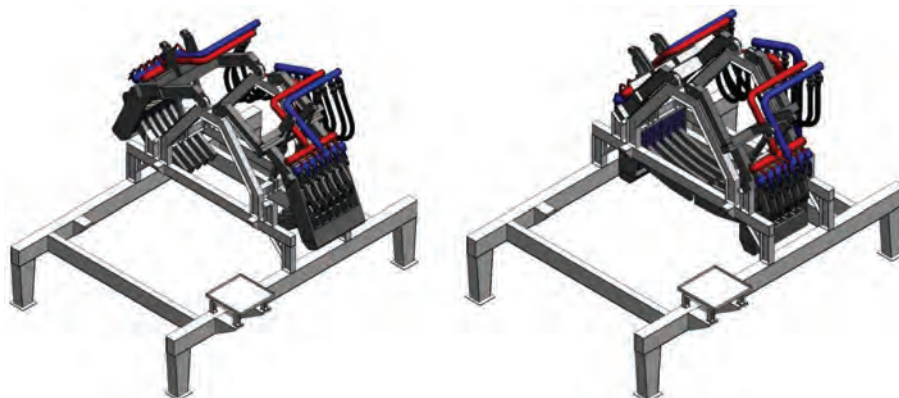


Рис. 4. Система удержания лома на основной раме

Работа с полностью спокойной ванной



Рис. 5. Профиль плавки с тремя партиями

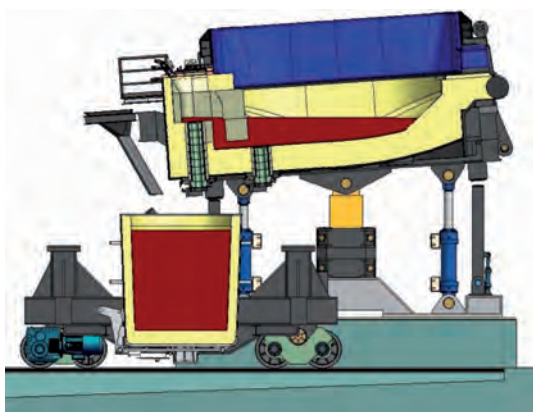


Рис. 6. Концепция выпуска стали – FAST (система бесшлакового выпуска стали)

Увеличение объема жидкого болота позволяет расплавлять лом в полностью спокойной ванне при минимальных скачках напряжения, а также повышает эффективность подогрева лома в шахте. В сочетании с системой сифонного выпуска стали FAST новая конструкция ДСП позволяет выполнять загрузку шихты, выпуск стали и подготовку выпускного отверстия под током, что ведет к повышению производительности при сокращении цикла плавки и практически постоянной работе печи под током. Более эффективная передача тепла от жидкого болота к подогреваемому лому, а также улучшенная однородность ванны достигаются за счет применения системы донного перемешивания аргоном.

Непрерывность подачи электроэнергии не только повышает производительность, но также играет значительную роль в снижении скачков напряжения в коммунальных электросетях. Профиль плавки с тремя партиями показан на рис. 5.

Дополнительным преимуществом такой конструкции корпуса печи является система бесшлакового выпуска стали, повышающая эффективность использования легирующих и десульфурации. Жидкая сталь постоянно находится выше канала выпускного отверстия, что предотвращает попадание шлака в сталь-ковш (рис. 6).

Минимум движений печи

Так, вся конструкция шахты находится в зафиксированном положении, выпуск стали и слив шлака осуществляются кантованием кожуха печи, установленного на опорной раме, с применением специальных цилиндров и направляющих. Корпус печи располагается на опорной раме с цилиндрами и направляющими, что позволяет наклонять печь в обоих направлениях для выпуска стали и слива шлака.

Портал с системой подъема электродов и держатели аргонной или кислородной фурм не кантуются, но откидываются для перепуска электродов и оперативной смены малого свода. При кантовании печи исключается большая нагрузка на опорные конструкции и подшипники, высоковольтные кабели и т. п., как это происходит в случае с обычными ДСП.

В целях техобслуживания простая концепция перемещения корпуса ДСП позволяет сократить движения и оптимизировать техобслуживание за счет быстрой смены корпуса печи. Сталевоз используется

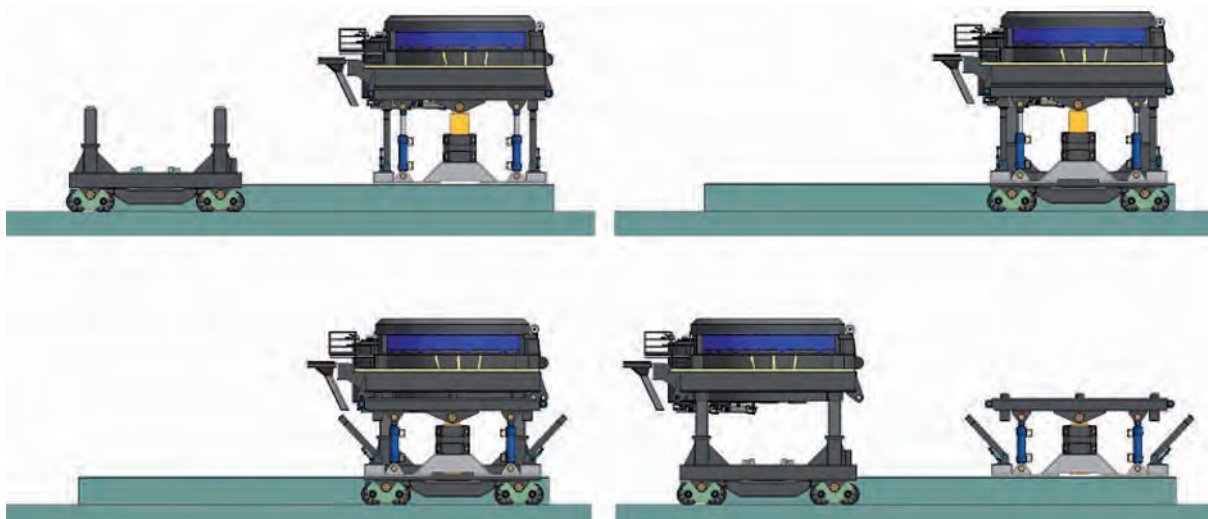


Рис. 7. Сталевоз и цикл смены корпуса

для выпуска стали и в качестве тележки для перемещения корпуса ДСП. Последовательность смены корпуса показана на рис. 7. Для того чтобы снять корпус с рамы, сталевоз помещается в позицию смены, непосредственной под печью. Далее корпус опускается с помощью системы цилиндров и направляющих. Помещенный на сталевоз корпус может свободно выкатываться из печного пролета для ремонта футеровки или замены на новый корпус.

Концепция очистки отходящих газов

Новый подход реализуется в комплексе с системой очистки отходящих газов с автоматизированной модификацией газовых потоков, максимальной герметичностью и специальным зонтом для улавливания пыли и газов в ходе завалки шихты (рис. 8, 9). Такая концепция обеспечивает соответствие природоохранным требованиям в будущем и позволяет уменьшить конструкцию системы улавливания неорганизованных выбросов под крышей цеха. Таким образом, появляется возможность значительно сократить объем системы газоочистки.

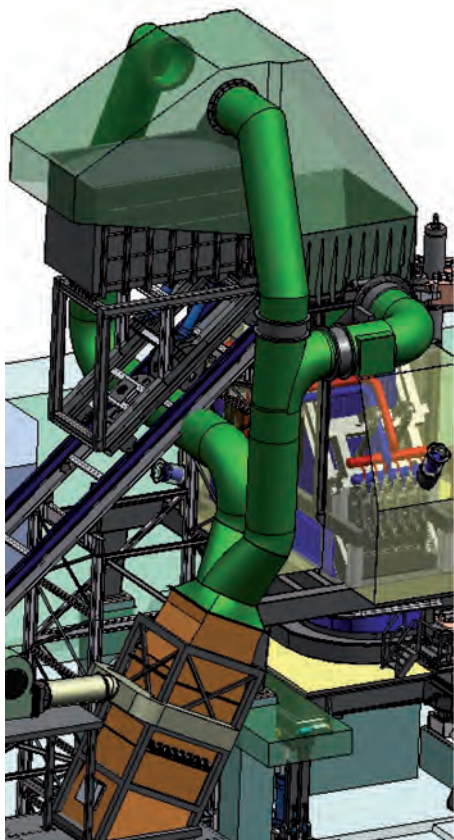


Рис. 8. Отвод отходящих газов из шахты



Рис. 9. Газоход отходящих газов с дожиганием и осадительной камерой

Расходные показатели

Основные технические данные и соответствующие показатели расхода приведены в таблице. ДСП Quantum является гибким решением, позволяющим плавить лом различной плотности при высокой производительности и низких затратах на передел.

Сравнение основных параметров и расходных показателей ДСП
(включая дожигание отходящих газов)

Преимущество		Традиционная ДСП (42 мВт)	ДСП Quantum (42 MW)
Суммарный расход	кВтч/т	380	315
Суммарный расход	Нм³/т	6*	0,5 *
Подпиточная вода	м³/т	2,5	3,5
Углерод	кг/т	14	17
Графитовые электроды	кг/т	1,5	0,9
Кислород	Нм³/т	35	27
Выход годного обций	%	89	91
Производственная пыль	кг/т	20	12
Цикл плавки	Мин.	66	52

* Без дожигания

Экологичность

Большая часть энергопотерь в электросталеплавильном производстве обусловлена неэффективным использованием отходящих газов. Соответственно наиболее действенным способом сокращения таких потерь является рекуперация энергии из отходящих газов. Для этого в шахтных печах давно применяется идеальная методика, претерпевшая к настоящему времени значительные усовершенствования. Снижение потребления электроэнергии и расхода электродов ведут к сокращению выбросов CO₂ почти на 30%, что примерно равняется 65 тыс. т CO₂ при годовой производительности 1,3 млн т. Кроме того, высокий уровень автоматизации позволяет повысить безопасность на предприятии.

Выводы

ДСП Quantum имеет целый ряд преимуществ, среди которых: 1) увеличение производительности; 2) расход электроэнергии менее 280 кВт·ч/т; 3) цикл плавки 33 мин; 4) увеличение годового объема производства до 1,35 млн т при массе плавки 100 т; 5) завалка, выпуск стали и заполнение выпускного отверстия под током; 6) прямая рекуперация энергии благодаря подогреву 100% лома; 7) снижение мощности трансформатора в сравнении с традиционной ДСП; 8) оптимальное соответствие природоохранным требованиям благодаря инновационной конструкции системы улавливания и очистки отходящих газов; 9) максимальная производительность даже при слабых коммунальных электросетях благодаря снижению скачков напряжения за счет работы с полностью спокойной ванной; 10) снижение расхода электродов почти на 30%; 11) снижение затрат на передел на 20%; 12) сокращение выбросов парниковых газов на 30%.

Кроме того, возможно повышение безопасности с полной автоматизацией и исключением движений кранов, перемещающих грузы в печном пролете. Благодаря комплексной концепции и сокращению затрат на систему газоочистки, а также упразднению скрапных корзин и скрапных кранов инвестиционная привлекательность ДСП Quantum для производителей стали очевидна.

Предлагая ДСП Quantum, компания Primetals Technologies предлагает прагматичное решение, отвечающее требованиям энергоэффективности и рентабельности, повышению производительности и минимизации вредных выбросов. Вне зависимости от шихтового материала, будь то лом, жидкий чугун или железо прямого восстановления (DRI), ДСП Quantum обеспечивает высокую производительность электросталеплавильного производства при исключительно низких затратах на передел.

Сведения об авторах

Йенс Апфель (jens.apfel@primetals.com, +49 (7852) 41-421),
Мишель Хайн (michel.hein@primetals.com, +49 (7852) 41-244),
Ханс-Йорг Хубер (hansjoerg.huber@primetals.com, +49 (7852) 41-114),
Дениз Чатан (deniz.catan@primetals.com, +49 (7852) 41-431).

Information about the authors

Apfel, Jens (jens.apfel@primetals.com, +49 (7852) 41-421),
Hein, Michel (michel.hein@primetals.com, +49 (7852) 41-244),
Huber, Hans-Jörg (hansjoerg.huber@primetals.com, +49 (7852) 41-114),
Catan, Deniz (deniz.catan@primetals.com, +49 (7852) 41-431).



УДК 669.71

Поступила 17.06.2015

ПОИСК СПОСОБОВ УТИЛИЗАЦИИ ПЫЛИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ НА БЕЛОРУССКОМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ЗАВОДЕ. ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ. ОПЫТЫ ПО БРИКЕТИРОВАНИЮ ПЫЛИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

FINDING WAYS OF RECYCLING DUST OF ARC STEEL FURNACES AT THE BELARUSIAN METALLURGIC PLANT. PART 3. EXPERIMENTS ON BRIQUETTING OF DUST OF ARC STEEL FURNACES

А. И. РОЖКОВ, Е. В. ЕРМАКОВА, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Беларусь

A. I. ROZHKOVA, E. V. ERMAKOVA, JSC «BSW - Management Company of Holding «BMC», Zhlobin, Belarus

В статье даётся обзор мирового опыта утилизации пыли путём её брикетирования. Рассказывается о преимуществах и недостатках утилизации пыли с её предварительным брикетированием. Дается информация об опытах по брикетированию пыли, образующейся на Белорусском металлургическом заводе в различных организациях с различными связующими. На основании технических данных, полученных в ходе изготовления опытных образцов брикетов, был произведён экономический расчёт, который показал нецелесообразность утилизации пыли методом брикетирования из-за низкого содержания железа в пыли, высокой цены связующего, относительно небольшой ставки экологического налога.

The article gives an overview of the global experience of recycling dust by briquetting. The advantages and disadvantages of recycling dust with its preliminary briquetting are described. Information about experiments on briquetting of dust generated in different organizations of the Belarusian metallurgy plant with various binders is given. Economic calculations were performed on the basis of technical data obtained during the manufacture of prototypes of briquettes. The results of the calculations showed inexpediency of recycling dust briquetting method because of the low iron content in the dust, high cost of binder and a relatively small rate of ecological tax.

Ключевые слова. Пыль дуговых сталеплавильных печей, связующий материал, цинк, брикетирование. Отсев извести, жидкое стекло, шлак, портландцемент, науглероживатель, клей ПВА. Экономическая целесообразность.

Keywords. Dust of electric arc steel furnaces, binding material, zinc, briquetting. Clarification of lime, sodium silicate, slag, Portland cement, PVA glue. Economical expediency.

Брикетирование – процесс получения кусков (брикетов) с добавкой и без добавки связующих веществ с последующим прессованием смеси в брикеты нужного размера и формы. Утилизация пыли дуговых сталеплавильных печей с предварительным ее брикетированием широко используется [1–9], несмотря на очевидные недостатки:

1. Нужно использовать связующее вещество, которое обеспечивало бы необходимую прочность, что удорожает утилизацию.
2. Связующее вещество является «балластом», что приводит к снижению выхода годного, увеличению расхода электроэнергии, снижению производительности печей.
3. Брикеты получаются маломанитными, поэтому их сложно загружать магнитными кранами в печь.
4. Необходима линия по брикетированию пыли, включающая в себя следующие технологические операции: перемешивание пыли со связующим, прессование смеси, сушка полученных брикетов.

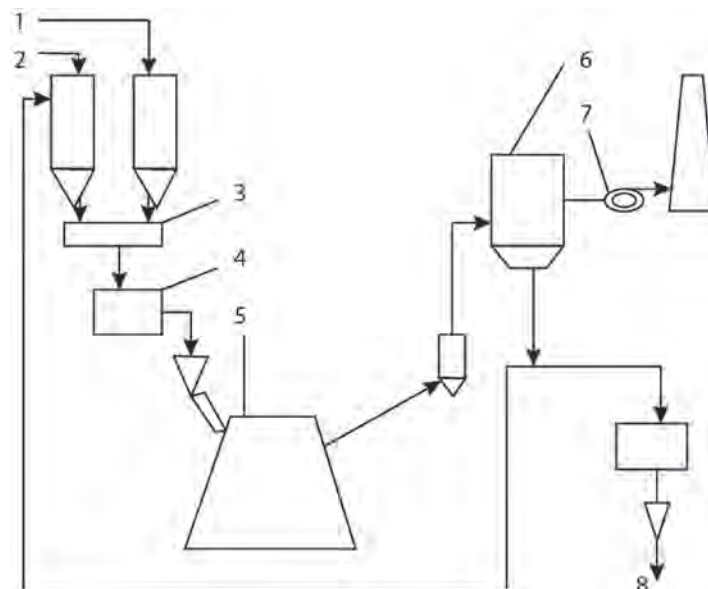


Рис. 1. Схема переработки электросталеплавильной пыли: 1 – кокс; 2 – электросталеплавильная пыль; 3 – смеситель; 4 – окомкователь; 5 – дуговая печь; 6 – рукавный фильтр; 7 – дымосос; 8 – обогащенная цинком пыль

Наиболее подходящей для условий Белорусского металлургического завода является технология, разработанная компанией NKK (Япония). Пыль, содержащую около 20 % цинка и 40 % оксидов железа (пыль на Белорусском металлургическом заводе имеет похожий химический состав), смешивают с порошкообразным коксом, окатывают и полученные окатыши загружают в ДСП. При высокой температуре атмосферы печи оксид цинка пыли восстанавливается коксом и образуются пары цинка, которые снова окисляются кислородом воздуха. Эти оксиды цинка отсасывают и улавливают в рукавных фильтрах, в которые они поступают из дымососа. Оксиды железа пыли также восстанавливаются и более 70 % образующегося железа переходит в жидкую ванну. Осажденная в фильтрах пыль содержит около 75 % ZnO и 15 % Fe_2O_3 . Объем пыли снижается до 37 % объема исходной пыли. Из каждой тонны пыли переходит в жидкую ванну 0,28 т железа и образуется 0,2 т жидкого шлака. Обогащенная цинком пыль (более 60 % цинка) легче и с меньшими затратами перерабатывается на цинк, более 99 % диоксинов, содержащихся в исходной пыли, разрушаются при высокотемпературной ее переработке. Образующийся в ДСП нетоксичный шлак можно использовать в качестве строительного материала [9]. Схема переработки показана на рис. 1. На тот момент на Белорусском металлургическом заводе уже имелся положительный опыт брикетирования и утилизации окалины в ДСП. Брикетывали на линии по изготовлению тротуарной плитки [10].

В качестве связующего в металлургии используются следующие вещества: отсев извести; жидкое стекло; шлак мелкой фракции; портландцемент; науглероживатель.

Первые опыты по брикетированию пыли проводили в химической лаборатории металлургического производства ЦЗЛ Белорусского металлургического завода с различными связующими и в разной про-



Рис. 2. Брикет с отсеком извести в качестве связующего



Рис. 3. Брикет с жидким стеклом в качестве связующего



Рис. 4. Обломки брикетов с науглероживателем в качестве связующего

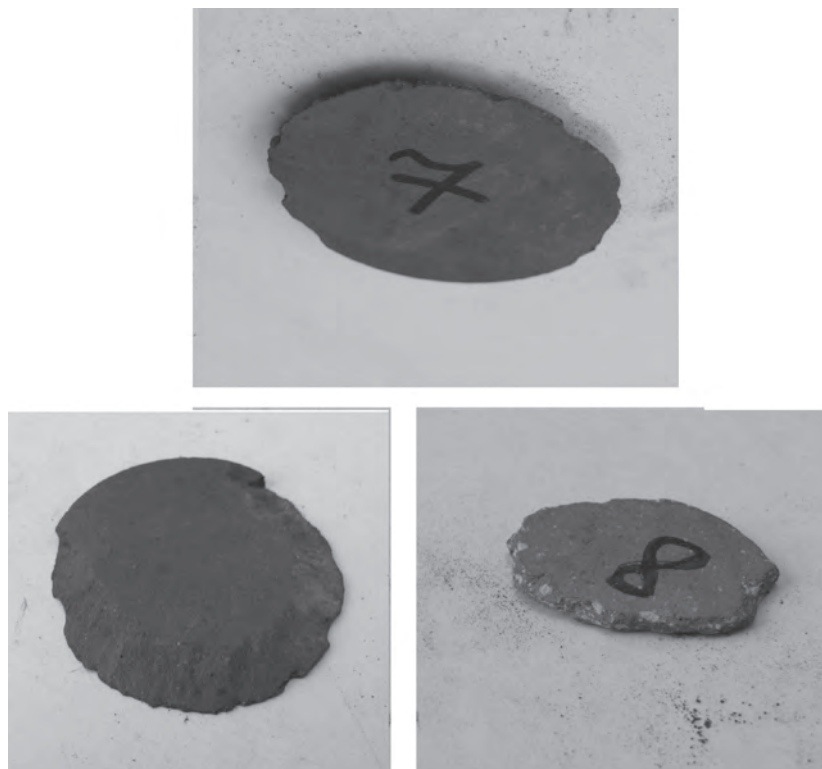


Рис. 5. Брикет, со шлаком в качестве связующего

порции с пылью без науглероживателя. Прессование пыли газоочистки проводили на лабораторном таблетоформовочном прессе Тип НТР 60 фирмы» HERZOG». Диаметр таблеток – 40 мм. Доли связующих:

1. Отсев извести в пропорциях 1:1, 2:1, 3:1. Сила пресса – 500 кН. Все образцы крошатся и расслаиваются. В последнем случае с пропорцией 3:1 часть образца твердая (проба № 5) (рис. 2).

2. Жидкое стекло. Очень плохо перемешивается с пылью. Брикет получается неоднородным, легко разрушается (проба № 6) (рис. 3).

3. С науглероживателем пробы не прессуются при разных усилиях пресса 300; 400; 600 кН (рис. 4).

4. Шлак (пробы № 7, 8) (рис. 5).

5. Клей ПВА. Было изготовлено четыре брикета с различными процентными содержаниями клея и силой пресса. Параметры брикетов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры брикетов при использовании в качестве связующего клея ПВА

Номер пробы	Масса клея, г	Сила пресса, кН	Давление пресса, МПа	Масса брикета, г	Объем брикета, $\text{м}^3 \cdot 10^{-3}$	Плотность брикета, $\text{кг}/\text{м}^3$
1	0,3	30	23,89	12,4	6,28	1 974
2	0,5	30	23,89	10	4,396	2 275
3	0,5	100	79,6	10,8	4,396	2 456
4	1	300	238,9	13,4	5,024	2 667



Рис. 6. Брикет с клеем ПВА в качестве связующего, проба № 1



Рис. 7. Брикет с клеем ПВА в качестве связующего, проба № 2



Рис. 8. Брикет с клеем ПВА в качестве связующего, проба № 3



Рис. 9. Брикет с клеем ПВА в качестве связующего, проба № 4

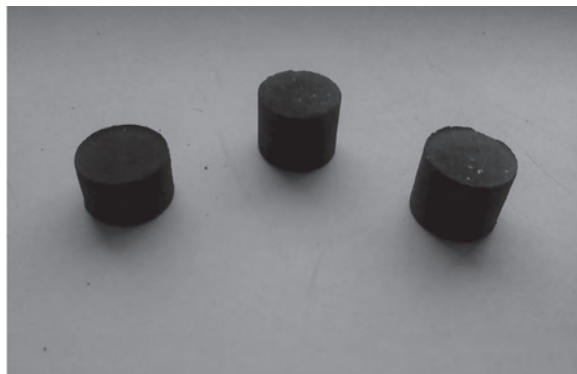


Рис. 10. Брикеты, изготовленные в Белорусском национальном техническом университете

Брикеты получились немагнитными, что исключает их загрузку магнитным краном в копровом цеху. Единственным способом ввода в ДСП остается подача через систему высотных бункеров. Плотность брикетов – 1974–2667 кг/м³. При такой плотности брикеты будут плавать на границе металл-шлак. Внешний вид брикетов показан на рис. 6–9.

Следующий этап исследований – брикетирование пыли со связующим и науглероживателем. Использовали два связующих: клей ПВА и цемент. Все брикеты получились правильной цилиндрической формы.

Параметры брикетирования: усилие прессования – 30 кН; время прессования – 30 с; диаметр образцов – 40 мм.

Точно такие же образцы, подготовленные аналогично образцам 3,4,5,6,8 и просушенные в лабораторном сушильном шкафу при температуре 100 °С в течение 30 мин, раскрошились и расслоились.

Параллельно пробы пыли были переданы в Белорусский национальный технический университет, где изготавливали брикеты с науглероживателем и жидким стеклом в качестве связующего. Прочность и плотность брикетов получились удовлетворительными (рис. 10).

Таблица 2. Параметры брикетов пыли с науглероживателем

Номер образца	Связующее	Масса связующего, г	Масса пыли, г	Примечание
1	Цемент	1	9	
2	Цемент	3	27	
3	Цемент	3	27	Цемент предварительно смочен водой
4	Клей ПВА	0,5	16 г пыли + 4 г науглероживателя	
5	Клей ПВА	0,5	24 г пыли + 6 г науглероживателя	
6	Клей ПВА	1	24 г пыли + 6 г науглероживателя	
7	Цемент	3	27 г (20% смесь пыли с науглероживателем)	
8	Цемент	3	27 г (20% смесь пыли с науглероживателем)	Цемент предварительно смочен водой



Рис. 11. Брикет, изготовленный на ЧУП «Силикатный завод», г. Бобруйск

После получения положительных лабораторных результатов начали проработки изготовления опытной партии брикетов из пыли. Несколько опытных брикетов были изготовлены на ЧУП «Силикатный завод» (г. Бобруйск) (рис. 11).

На основании технических данных, полученных в ходе изготовления опытных образцов брикетов, был проведен экономический расчет, который показал нецелесообразность утилизации пыли методом брикетирования из-за низкого содержания железа в пыли, высокой цены связующего, относительно небольшой ставки экологического налога. Поэтому начались исследования утилизации пыли дуговых сталеплавильных печей на специальных установках в условиях Белорусского металлургического завода.

Литература

1. Макаrchук В. В., Кошелев Е. С., Воынкнна Е. П. Новокузнецк: НП «Экологический региональный центр». <http://waste.ua/cooperation/2004/thesis/makarchuk1.html>, http://www.zdc.ru/zdc/articles/articles_10.html.
2. NTN Develops «EAF Dust Briquetter» http://www.ntn.co.jp/english/news/news_files/new_products/news20060113.html.
3. <http://www.masters.donntu.edu.ua/2006/fizmet/biduk/diss/index.htm>.
4. <http://ecoenergy.uaprom.net/a14552-briketirovanie-othodov-staleplavilnyh.html>.
5. <http://www.steelmaker.ru/ru/node/1790>.
6. <http://waste.ua/cooperation/2009/theses/bychkov.html>.
7. <http://www.masters.donntu.edu.ua/2006/fizmet/biduk/library/001.htm>.
8. <http://www.masters.donntu.edu.ua/2009/fizmet/silchenko/library/article1.htm>.
9. <http://briket.ru/bmz.shtml>.

References

1. <http://waste.ua/cooperation/2004/thesis/makarchuk1.html>, http://www.zdc.ru/zdc/articles/articles_10.html.
2. NTN Develops «EAF Dust Briquetter» http://www.ntn.co.jp/english/news/news_files/new_products/news20060113.html.
3. <http://www.masters.donntu.edu.ua/2006/fizmet/biduk/diss/index.htm>.
4. <http://ecoenergy.uaprom.net/a14552-briketirovanie-othodov-staleplavilnyh.html>.
5. <http://www.steelmaker.ru/ru/node/1790>.
6. <http://waste.ua/cooperation/2009/theses/bychkov.html>.
7. <http://www.masters.donntu.edu.ua/2006/fizmet/biduk/library/001.htm>.
8. <http://www.masters.donntu.edu.ua/2009/fizmet/silchenko/library/article1.htm>.
9. <http://briket.ru/bmz.shtml>.

Сведения об авторах

Рожков Андрей Игоревич, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», ул. Промышленная, 37, 247210, г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь. Тел. раб.: (+375-2334) 5-67-12, моб.: (+37529) 610-83-28. E-mail: ibm.tu@bmz.gomel.by, andreyrogkov73@yandex.ru

Ермакова Елена Витальевна, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», ул. Промышленная, 37, 247210, г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь. Тел. раб.: (+ 375-2334) 5-43-97.

Information about the authors

Rozhkov Andrey, JSC “BSW – Management Company of Holding «BMC», 37, Promyshennaya str., Zhlobin city, 247210, Belarus. Tel.: (+375-2334) 5-67-12. E-mail: ibm.tu@bmz.gomel.by, andreyrogkov73@yandex.ru



УДК 669

Поступила 17.09.2015

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ БЕСШОВНЫХ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ТРУБ, ПРОШЕДШИХ ИСПЫТАНИЯ В СКВАЖИНАХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РУП «ПО «БЕЛОРУСНЕФТЬ» НА ПРЕДМЕТ ИХ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ

RESEARCH OF WITNESS SAMPLES OF SEAMLESS HOT-ROLLED PIPES AFTER TESTS IN WELLS OF OIL FIELDS OF RUP «ON «BELORUSNEFT» REGARDING THEIR CORROSION RESISTANCE

И. А. КОВАЛЕВА, Н. А. ХОДОСОВСКАЯ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Беларусь

I. A. KOVALEVA, N. A. HODOSOVSKAYA, JSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», Zhlobin city, Belarus

Проведены промышленные испытания образцов-свидетелей коррозии, изготовленных из бесшовных горячекатаных труб различных марок стали производства ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» в действующих трубопроводах трех нефтяных месторождений. По результатам проведенных исследований совместно со специалистами РУП «ПО «Белоруснефть» для каждого из месторождений определены наиболее устойчивые к коррозии марки стали: для скважины 146 Ново-Давыдовского месторождения – сталь марки ТТ309; для скважины 270 Речицкого месторождения – стали марки 20 и ТТ359; для скважины 59 Осташковичского месторождения – сталь марки ТТ309.

Field tests of the witness samples of corrosion made of seamless hot-rolled pipes of various steel brands produced by JSC «BMZ – Management Company of Holding «BMC» were carried out in the operating pipelines at three oil fields. The results of the conducted researches made by the experts of RUP «ON «Belorusneft» permitted to define the most stable steel brands against corrosion for each of the oil fields: for a well 146 New and Davydovsky fields – brand steel TT309; for a well 270 Rechitsky fields – steel brands 20 and TT359; for a well 59 Ostashkovichsky fields – TT309 brand steel.

Ключевые слова. Промышленные испытания образцов-свидетелей; виды коррозионных разрушений; глубина коррозии; коррозионная стойкость; эксплуатационная надежность нефтелиний.

Keywords. Field tests of witness samples; types of corrosion destructions; corrosion depth; corrosion resistance; operational reliability of the oil pipelines.

Один из видов деятельности РУП «ПО «Белоруснефть» – добыча нефти и попутного нефтяного газа. Транспортируемая продукция содержит агрессивные компоненты (сероводород и углекислый газ), а также постоянно обводняется (рост процента воды в продукции скважин обусловлен длительностью эксплуатации месторождений – более 40 лет). В результате коррозионная агрессивность добываемой продукции увеличивается и, как следствие, увеличивается риск отказов трубопроводов. Основным материалом, используемым РУП «ПО «Белоруснефть» для строительства трубопроводов, является сталь марки 20. Однако данная сталь не обеспечивает нормативный срок эксплуатации труб. В связи с этим со стороны РУП «ПО «Белоруснефть» была выражена заинтересованность в поиске новых марок сталей отечественного производства, способных обеспечить высокую коррозионную стойкость, для строительства новых и замены существующих трубопроводов.

Совместно со специалистами РУП «ПО «Белоруснефть» были проведены промышленные испытания образцов-свидетелей коррозии, изготовленных из бесшовных горячекатаных труб различных марок стали производства ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» в действующих трубопроводах трех месторождений. После промышленных испытаний образцы были исследованы специалистами центральной лаборатории аналитических исследований БелНИПИнефть и исследовательской лаборатории

Исследовательского центра ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Маркировка образцов-свидетелей приведена в табл. 1.

Таблица 1. Маркировка образцов-свидетелей

Название месторождения и номер скважины	Маркировка	Марка стали
Ново-Давыдовское, скв. 146	146–1	ТТ359
	146–2	ТТ309
	146–3	ТТ301
	146–4	20
Речицкое, скв. 270	270–1	ТТ359
	270–2	ТТ309
	270–3	ТТ301
	270–4	20
Осташковичское, скв. 59	59–1	20
	59–2	ТТ301
	59–3	ТТ309
	59–4	ТТ359

Коррозионную стойкость оценивали по потере массы образцов за время испытаний, а также по глубине очагов локальной коррозии, образовавшейся на поверхности за время испытаний.

Химический состав образцов-свидетелей определяли в лаборатории аналитического обеспечения ЦЗЛ на эмиссионном спектрометре ARL 3560. Результаты приведены в табл. 2.

Из таблицы видно, что идентификация образцов-свидетелей по маркам стали соблюдена и соответствует: образцы № 146-4; 270-4; 59-1 – сталь марки 20 по ГОСТ 1050; образцы № 146-3; 270-3; 59-2 – сталь марки ТТ301 по ЗТУ 840-18-2011; образцы № 146-2; 270-2; 59-3 – сталь марки ТТ309 по ЗТУ 840-18-2011; образцы № 146-1; 270-1; 59-4 – сталь марки ТТ359 по ЗТУ 840-18-2011.

Таблица 2. Результаты определения химического состава

Название месторождения и номер скважины	Номер образца/ марка стали	Массовая доля элементов, %									
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo
Ново-Давыдовское, скв. 146	146-1/ТТ359	0,30	0,35	1,18	0,012	0,006	0,82	0,13	0,16	0,030	0,23
	146-2/ТТ309	0,28	0,22	1,17	0,012	0,006	0,37	0,11	0,17	0,027	0,11
	146-3/ТТ301	0,27	0,19	1,22	0,013	0,005	0,30	0,11	0,19	0,032	0,11
	146-4/20	0,17	0,23	0,50	0,015	0,014	0,04	0,02	0,04	0,038	0,002
Речицкое, скв. 270	270-1/ТТ359	0,30	0,34	1,16	0,011	0,006	0,81	0,14	0,16	0,029	0,24
	270-2/ТТ309	0,27	0,21	1,16	0,012	0,004	0,36	0,10	0,15	0,028	0,11
	270-3/ТТ301	0,27	0,20	1,24	0,014	0,005	0,30	0,11	0,18	0,034	0,12
	270-4/20	0,19	0,23	0,52	0,016	0,018	0,04	0,02	0,04	0,037	0,003
Осташковичское, скв. 59	59-1/20	0,18	0,23	0,51	0,015	0,015	0,04	0,02	0,04	0,036	0,003
	59-2/ТТ301	0,30	0,24	1,19	0,011	0,005	0,08	0,10	0,14	0,034	0,012
	59-3/ТТ309	0,28	0,24	1,22	0,011	0,008	0,35	0,09	0,17	0,026	0,13
	59-4/ТТ359	0,28	0,31	1,13	0,015	0,007	0,82	0,09	0,31	0,025	0,23
20 ГОСТ 1050-88 ¹		0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	≤0,025	≤0,04	≤0,35	≤0,25	≤0,25	–	–
ТТ301 Стандартная спецификация № 1374-0/СС-2014 ²		0,24–0,30	0,13–0,27	1,06–1,43	≤0,015	≤0,010	≤0,30	≤0,25	≤0,25	≤0,020	≤0,08
ТТ309 Стандартная спецификация № 1374-0/СС-2014		0,24–0,30	0,13–0,27	1,06–1,43	≤0,015	≤0,010	0,27–0,63	≤0,25	≤0,25	≤0,020	0,09–0,16
ТТ359 Стандартная спецификация № 1374-0/СС-2014		0,24–0,30	0,20–0,35	1,06–1,34	≤0,015	≤0,010	0,75–0,95	≤0,25	≤0,35	≤0,020	0,22–0,32

Известно, что по характеру изменения поверхности металла или сплава различают несколько видов коррозионных разрушений (рис. 1).

¹ Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали.

² Трубы бесшовные горячедеформированные для нефте- и газопроводов.

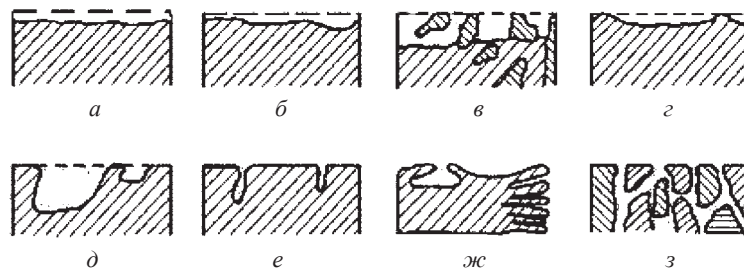
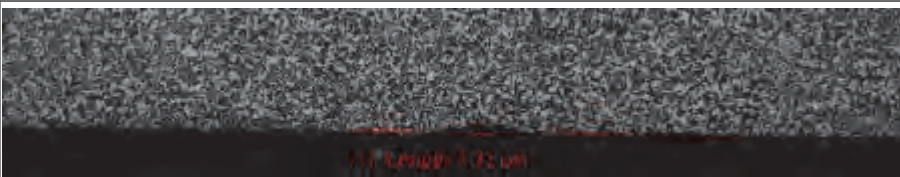
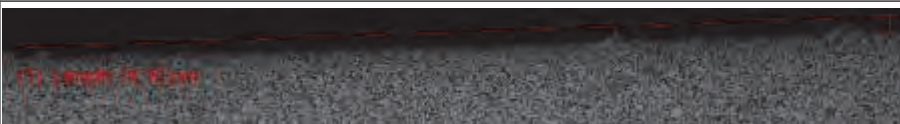
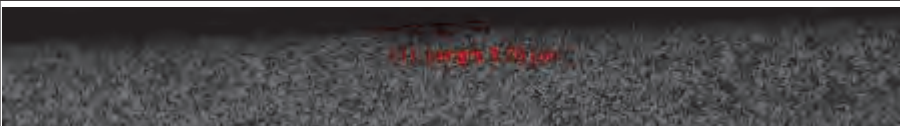
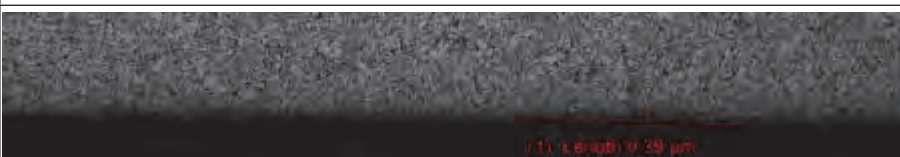
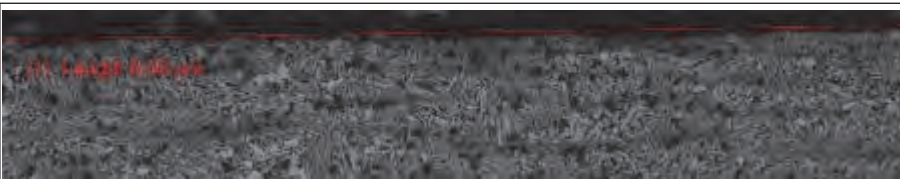
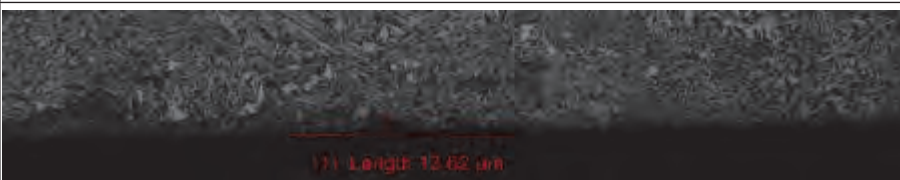
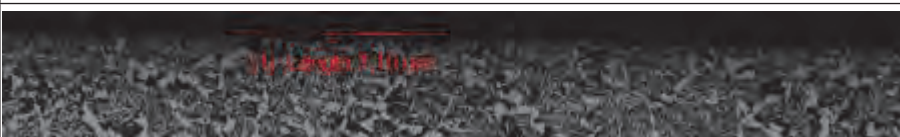
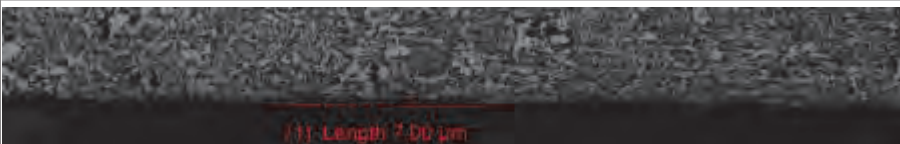
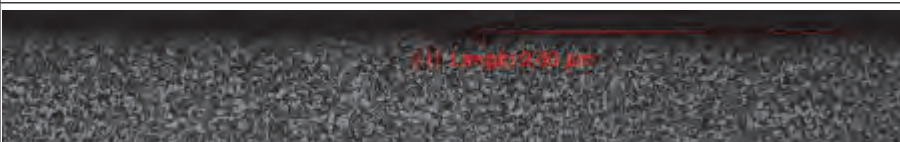


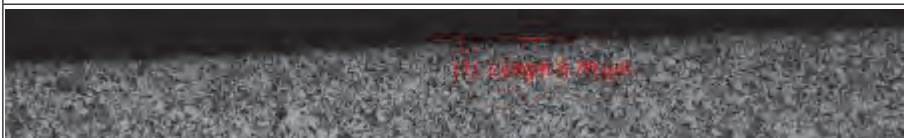
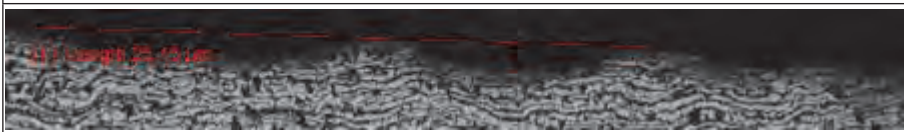
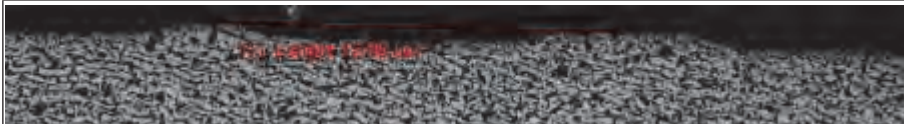
Рис. 1. Виды коррозии: а – сплошная равномерная; б – сплошная неравномерная; в – структурно-избирательная; г – пятнами; д – язвами; е – точками (питтинговая); ж – подповерхностная; з – межкристаллитная

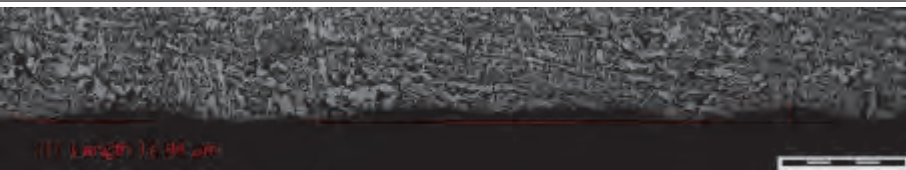
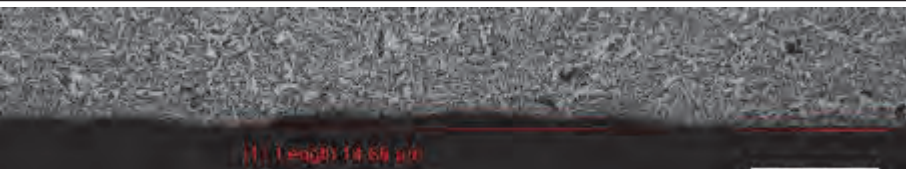
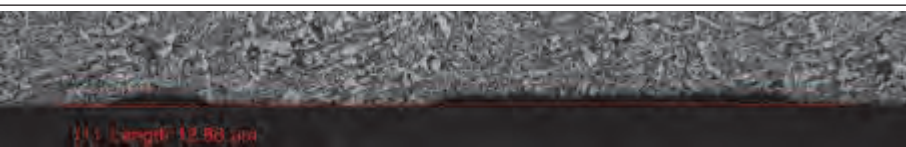
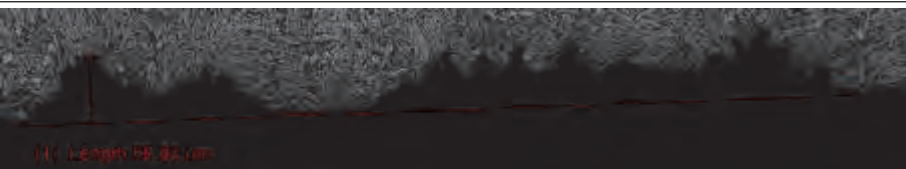
Для проведения металлографического анализа из каждого образца-свидетеля было приготовлено по три микрошлифа с целью оценки микроструктуры и максимальной глубины коррозии. Результаты замеров представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Металлографический анализ

Номер образца	Марка стали, микроструктура	Результаты замеров глубины коррозии. $\times 100$
<i>СКВАЖИНА 146 НОВО-ДАВЫДОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ</i>		
146-1	ТТ359 Бейнит	
146-11		
146-111		
146-2	ТТ309 Феррит+перлит	
146-22		
146-222		
146-3	ТТ301 Феррит+перлит	
146-33		

Номер образца	Марка стали, микроструктура	Результаты замеров глубины коррозии. ×100
146–333	ТТ301 Феррит+перлит	
146–4	20 Феррит+перлит	
146–44		
146–444		
СКВАЖИНА 270 РЕЧИЦКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ		
270–1	ТТ359 Бейнит	
270–11		
270–111		
270–2	ТТ309 Феррит+перлит	
270–22		
270–222		
270–3	ТТ301 Феррит+перлит	

Номер образца	Марка стали, микроструктура	Результаты замеров глубины коррозии. ×100
270–33	ТТ301 Феррит+перлит	
270–333		
270–4	20 Феррит+перлит	
270–44		
270–444		
СКВАЖИНА 59 ОСТАШКОВИЧСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ		
59–1	20 Феррит+перлит	
59–11		
59–111		
59–2	ТТ301 Феррит+перлит	
59–22		
59–222		

Номер образца	Марка стали, микроструктура	Результаты замеров глубины коррозии. ×100
59-3	ТТ309 Феррит+перлит	
59-33		
59-333		
59-4	ТТ359 Бейнит	
59-44		
59-444		

В соответствии с рисунком был определен вид коррозии на каждом из исследуемых микрошлифов (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Результаты оценки видов коррозии

Точка замера	Номер образца	Марка стали	Вид коррозии
Ново-Давыдовское месторождение, скв. 146	146-1	ТТ359	Сплошная равномерная
	146-11		То же
	146-111		Сплошная неравномерная
	146-2	ТТ309	Сплошная равномерная
	146-22		То же
	146-222		»
	146-3	ТТ301	Сплошная неравномерная
	146-33		То же
	146-333		»
	146-4	20	Сплошная равномерная
	146-44		То же
	146-444		»
Речицкое месторождение, скв. 270	270-1	ТТ359	Сплошная неравномерная
	270-11		Сплошная равномерная
	270-111		Сплошная неравномерная
	270-2	ТТ309	Сплошная равномерная
	270-22		То же
	270-222		Сплошная неравномерная
	270-3	ТТ301	Сплошная равномерная
	270-33		То же
	270-333		»

Продолжение табл. 4

Точка замера	Номер образца	Марка стали	Вид коррозии
Речицкое месторождение, скв. 270	270–4	20	»
	270–44		»
	270–444		»
Осташковичское месторождение, скв. 59	59–1	20	Пятнами
	59–11		То же
	59–111		»
	59–2	ТТ301	»
	59–22		»
	59–222		»
	59–3	ТТ309	»
	59–33		»
	59–333		»
	59–4	ТТ359	Межкристаллитная
	59–44		То же
	59–444		пятнами

В табл. 5 приведены результаты по определению показателей коррозии.

Т а б л и ц а 5. Результаты определения показателей коррозии

Период проведения испытаний	Точка замера	Номер образца	Скорость коррозии, г/(м ² ·ч)	Глубинная скорость коррозии, мм/год	Время испытаний, ч	Глубина коррозии, мм	Средняя глубина коррозии по трем образцам, мм
11.09.2014–17.09.2014	Ново-Давыдовское м-е н/л скв. 146 + 135 ОПИ (ТТ359)	1				0,0003	0,10
		2				0,08	
		3				0,22	
			0,0073	0,0082	888		
11.09.2014–17.09.2014	Ново-Давыдовское м-е н/л скв. 146 + 135 ОПИ (ТТ309)	1				0,07	0,05
		2				0,02	
		3				0,07	
			0,0061	0,0069	888		
11.09.2014–17.09.2014	Ново-Давыдовское м-е н/л скв. 146 + 135 ОПИ (ТТ301)	1				0,15	0,11
		2				0,11	
		3				0,07	
			0,0071	0,0081	888		
11.09.2014–17.09.2014	Ново-Давыдовское м-е н/л скв. 146 + 135 ОПИ (20)	1				0,14	0,10
		2				0,07	
		3				0,09	
			0,0061	0,0069	888		
06.09.2014–18.09.2014	Речицкое м-е н/л скв. 270 ОПИ (ТТ359)	1				0,08	0,10
		2				0,09	
		3				0,14	
			0,0203	0,0230	1032		
06.09.2014–18.09.2014	Речицкое м-е н/л скв. 270 ОПИ (ТТ309)	1				0,07	0,11
		2				0,07	
		3				0,20	
			0,0274	0,0310	1032		
06.09.2014–18.09.2014	Речицкое м-е н/л скв. 270 ОПИ (ТТ301)	1				0,10	0,10
		2				0,10	
		3				0,11	
			0,0341	0,0385	1032		
06.09.2014–18.09.2014	Речицкое м-е н/л скв. 270 ОПИ (20)	1				0,10	0,12
		2				0,16	
		3				0,09	
			0,0183	0,0207	1032		

Продолжение табл. 5

Период проведения испытаний	Точка замера	Номер образца	Скорость коррозии, г/(м ² ·ч)	Глубинная скорость коррозии, мм/год	Время испытаний, ч	Глубина коррозии, мм	Средняя глубина коррозии по трем образцам, мм
14.08.2014–25.09.2014	Осташковичское м-е н/л скв. 59 ОПИ (Ст20)	1				0,14	0,21
		2				0,31	
		3				0,18	
			0,1081	0,1222	1008		
14.08.2014–25.09.2014	Осташковичское м-е н/л скв. 59 ОПИ (ТТ301)	1				0,37	0,25
		2				0,25	
		3				0,13	
			0,0587	0,0663	1008		
14.08.2014–25.09.2014	Осташковичское м-е н/л скв. 59 ОПИ (ТТ309)	1				0,13	0,14
		2				0,15	
		3				0,13	
			0,0298	0,0337	1008		
14.08.2014–25.09.2014	Осташковичское м-е н/л скв. 59 ОПИ (ТТ359)	1				0,59	0,50
		2				0,46	
		3				0,45	
			0,0893	0,1010	1008		

По ГОСТ 13819-68¹ оценку коррозионной стойкости черных и цветных металлов, а также их сплавов при условии их равномерной коррозии проводят по десятибалльной шкале (табл. 6).

Таблица 6. Шкала оценки коррозионной стойкости металлов по ГОСТ 13819

Группа стойкости	Глубинный показатель коррозии, мм/год	Балл
Совершенно стойкие	Менее 0,001	1
Весьма стойкие	0,001–0,005	2
	0,005–0,010	3
Стойкие	0,01–0,05	4
	0,05–0,10	5
Понижено стойкие	0,10–0,50	6
	0,50–1,0	7
Малостойкие	1,0–5,0	8
	5,0–10,0	9
Нестойкие	Свыше 10,0	10

Используя данные таблицы (показатель глубинной скорости коррозии), была произведена оценка коррозионной стойкости исследуемых образцов-свидетелей в соответствии с ГОСТ 13819. Результаты приведены в табл. 7.

Таблица 7. Результаты оценки коррозионной стойкости

Точка замера	Марка стали	Глубинная скорость коррозии, мм/год	Балл	Группа стойкости
Ново-Давыдовское месторождение н/л скв. 146 ОПИ	ТТ359	0,0082	3	Весьма стойкие
	ТТ309	0,0069	3	То же
	ТТ301	0,0081	3	»
	20	0,0069	3	»
Речицкое месторождение н/л скв. 270 ОПИ	ТТ359	0,0230	4	Стойкие
	ТТ309	0,0310	4	То же
	ТТ301	0,0385	4	»
	20	0,0207	4	»
Осташковичское месторождение н/л скв. 59 ОПИ	20	0,1222	6	Понижено стойкие
	ТТ301	0,0663	5	Стойкие
	ТТ309	0,0337	4	То же
	ТТ359	0,1010	6	Понижено стойкие

¹ Коррозия металлов. Десятибалльная шкала коррозионной стойкости.

Следует отметить, что в том случае, если коррозия носит местный характер, то скорость ее не может быть точно охарактеризована весовым или глубинным показателем. При питтинговой коррозии необходимо определять максимальный глубинный показатель. При межкристаллитной коррозии (как, например, в микрошлифе № 59 Осташковичского месторождения, сталь марки ТТ359) и коррозионном растрескивании скорость коррозии количественно характеризуется механическим показателем коррозии.

В результате анализа полученных данных по каждой из стадий проведенных исследований была составлена таблица (табл. 8), в которой указаны исследуемые марки стали в порядке уменьшения их стойкости к коррозии, а также были построены графики (рис. 2, 3).

Таблица 8. Стойкость к коррозии (в порядке уменьшения) исследуемых марок стали

Точка замера	Номер образца	Показатель коррозии			
		Скорость коррозии, г/(м ² ·ч)		Средняя глубина коррозии, мм	Коррозионная стойкость, балл/(мм/год)
Ново-Давыдовское месторождение, скв. 146	1	ТТ309 (0,0061)	20 (0,0061)	ТТ309 (0,05)	ТТ309 (3/0,0069) 20 (3/0,0069)
	2	ТТ301 (0,0071)		20 (0,10) ТТ359 (0,10)	ТТ301 (3/0,0081)
	3	ТТ359 (0,0073)		ТТ301 (0,11)	ТТ359 (3/0,0082)
Речицкое месторождение, скв. 270	1	20 (0,0183)		ТТ359 (0,10) ТТ301 (0,10)	20 (4/0,0207)
	2	ТТ359 (0,0203)		ТТ309 (0,11)	ТТ359 (4/0,0230)
	3	ТТ309 (0,0274)		20 (0,12)	ТТ309 (4/0,0310)
	4	ТТ301 (0,0341)			ТТ301 (4/0,0385)
Осташковичское месторождение, скв. 59	1	ТТ309 (0,0298)		ТТ309 (0,14)	ТТ309 (4/0,0337)
	2	ТТ301 (0,0587)		20 (0,21)	ТТ301 (5/0,0663)
	3	ТТ359 (0,0893)		ТТ301 (0,25)	ТТ359 (6/0,1010)
	4	20 (0,1081)		ТТ359 (0,50)	20 (6/0,1222)

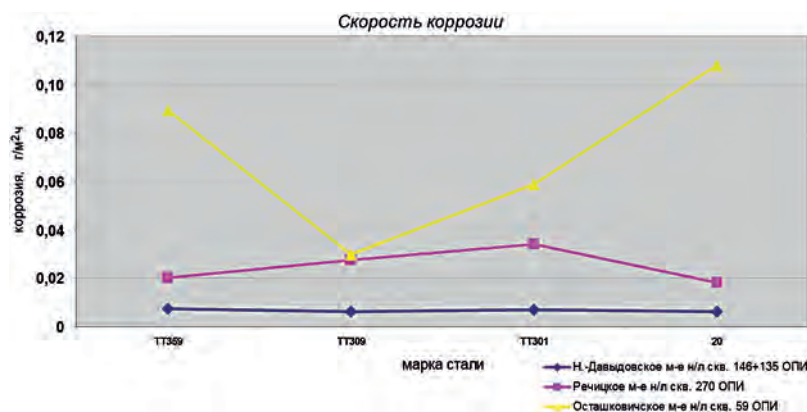


Рис. 2. Зависимость изменения скорости коррозии от марки стали

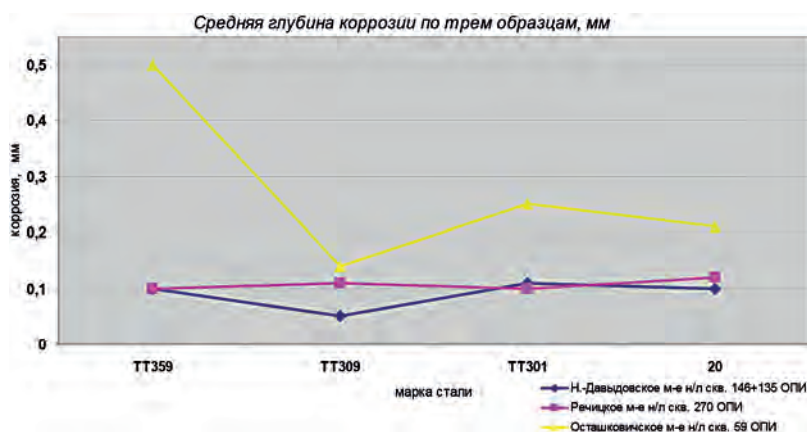


Рис. 3. Зависимость изменения средней глубины коррозии от марки стали

В результате проведенной исследовательской работы совместно со специалистами РУП «ПО «Белоруснефть» можно выделить для каждого из месторождений марки стали, наиболее устойчивые к коррозии:

- для скважины 146 Ново-Давыдовского месторождения – сталь марки ТТ309;
- для скважины 270 Речицкого месторождения – стали марки 20 и ТТ359;
- для скважины 59 Осташковичского месторождения – сталь марки ТТ309.

Сведения об авторах

Ковалева Ирина Анатольевна (E-mail: nl.icm@bmz.gomel.by), *Ходосовская Наталья Алексеевна* (E-mail: veng.icm@bmz.gomel.by), ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», ул. Промышленная, 37, 247210, Жлобин, Гомельская обл., Беларусь. Тел.: +375 2334 54 903.

Information about the authors

Kovaleva Irina (E-mail: nl.icm@bmz.gomel.by), *Hodosovskaya Natal'ya* (E-mail: veng.icm@bmz.gomel.by), JSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», 37, Promyshlennaya str., Zhlobin city, 247210, Gomel region, Belarus. Tel.: +375 2334 54 903.



УДК 669

Поступила 02.10.2015

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ФУТЕРОВКИ НА ВЕЛИЧИНУ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ПРИ РАБОТЕ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ ASSESSMENT OF THERMAL LOSSES OF ENWALL DESIGN DURING OPERATION OF CHAMBER FURNACE

С. М. КАБИШОВ, П. Э. РАТНИКОВ, И. А. ТРУСОВА, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, Д. В. МЕНДЕЛЕВ, Управление науки и инновационного развития аппарата Совета министров Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь

S. M. KABISHOV, P. E. RATNIKOV, I. A. TRUSOVA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, D. V. MENDELEV, Department of science and innovation development of the office of council of Ministers, Minsk, Belarus

В статье представлена методика, позволяющая оценить энергоэффективность модернизации печи при замене футеровки, а также определить целесообразность использования многослойной конструкции в зависимости от рабочей температуры печи и условий теплообмена на поверхности. Разработана методика, позволяющая рассчитывать температуру поверхности футеровки при охлаждении в период выгрузки-загрузки деталей.

The paper presents a methodology that allows to estimate the energy efficiency of the furnace modernization by replacing the enwall, as well as to determine the feasibility of using a multi-layer structure depending on the operating temperature of the furnace and the heat transfer conditions at the surface. The methodology, which allows to calculate the temperature of the surface of the lining on cooling during the upload-download details.

Ключевые слова. Камерная печь, модернизация, футеровка, тепловые потери, конвективный теплообмен, радиационный теплообмен, аккумуляция теплоты, методика.

Keywords. Chamber furnace, modernization, inwall, thermal losses, convective heat transfer, radiation heat transfer, accumulation of heat, methodology.

Введение

Камерные электропечи широко применяются на предприятиях машиностроительной отрасли благодаря ряду достоинств [1, 2]. Вместе с тем, периодический режим работы, связанный с тем, что печь охлаждается в период выгрузки нагретой садки и загрузки новой, приводит к повышенным затратам энергии на последующий разогрев. В связи с этим значительную роль в вопросе повышения энергоэффективности термообработки в камерных печах играет конструкция футеровки.

Тепловые потери камерной электропечи при работе в установившемся режиме. Значительная часть камерных печей применяется для нагрева заготовок перед пластической деформацией, а также для окончательной термообработки деталей, что предполагает продолжительную работу печи с постоянной температурой (выдержка). Как следствие, тепловое состояние футеровки (ограждающих конструкций) в течение таких периодов можно считать квазистационарным.

Учитывая сказанное, для оценки влияния конструкции футеровки на величину тепловых потерь воспользуемся формулой, согласно которой температура на поверхности печи равна:

$$t_{\text{нар}} = \frac{t_{\text{печ}} + t_{\text{о.с.}} \alpha \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}}{\alpha \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + 1}.$$

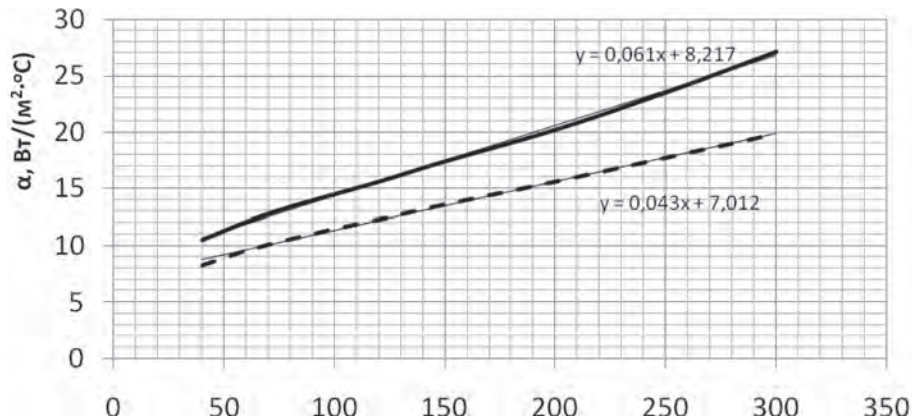


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от вертикальной плоской стенки при различной температуре поверхности и с учетом типа краски, которой покрыт кожух печи: — — обычная краска; ---- — алюминиевая краска; — — линейная (обычная краска); — — линейная (алюминиевая краска)

В работе [1] приведены значения коэффициента теплоотдачи от вертикальной плоской стенки при различной температуре поверхности и с учетом типа краски, которой покрыт кожух печи. Зависимости, построенные на основании этих данных, показаны на рис. 1. Представим уравнения линий тренда данных зависимостей в виде

$$\alpha = \alpha_0 + at.$$

Подставив данное выражение в формулу (1), получим квадратное уравнение

$$at_{\text{пов}}^2 + t_{\text{пов}} \left(\alpha_0 + 1 / \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} - at_{\text{o.c}} \right) - \left(t_{\text{печ}} / \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \alpha_0 t_{\text{o.c}} \right) = 0.$$

Решив его, получим зависимость температуры поверхности $t_{\text{пов}}$ от конструкции (толщины и количества слоев футеровки) и теплофизических свойств каждого из слоев (коэффициента теплопроводности). В качестве примера на рис. 2 приведены зависимости температуры поверхности однослойной (толщиной $\delta = 400$ мм) и двухслойной футеровки (теплоизоляция $\delta_1 = 100$ мм, $\lambda_1 = 0,07$ Вт/(м²·°С), огнеупорный слой $\delta_2 = 300$ мм).

Как видно из рисунка, допустимая с точки зрения требований СанПИН температура поверхности 45 °С обеспечивается лишь при использовании огнеупорного материала с коэффициентом теплопроводности около 0,1 Вт/(м·°С). Таким требованиям удовлетворяют волокнистые огнеупоры, такие, как, на-

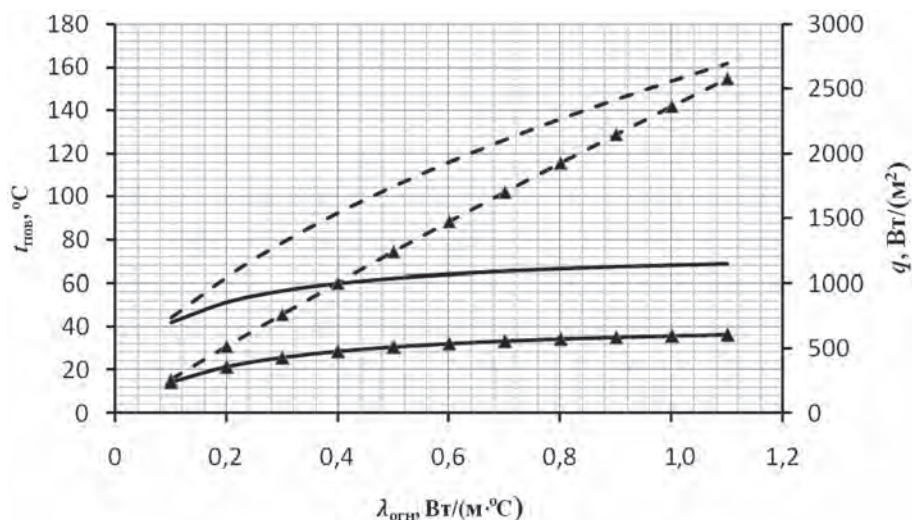


Рис. 2. Зависимость температуры наружной поверхности печи ($t_{\text{печ}} = 1100$ °С) с однослойной (толщиной $\delta = 350$ мм) и двухслойной футеровкой (теплоизоляция $\delta_1 = 50$ мм, $\lambda_1 = 0,07$ Вт/(м²·°С) огнеупорный слой $\delta_2 = 300$ мм) и соответствующей плотности теплового потока от коэффициента теплопроводности огнеупорного слоя: --- — $t_{\text{пов}}$ (однослойная футеровка); — — $t_{\text{пов}}$ (двухслойная футеровка); --▲— — q (однослойная футеровка); —▲— — q (двухслойная футеровка)

пример, Kerablock Supermag (Keratech, Чехия) и др. При средней температуре слоя 550–600 °С толщиной 400 мм данный материал имеет коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,07\text{--}0,075 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$. Применение двухслойной конструкции футеровки с теплоизоляцией толщиной 100 мм и $\lambda_1 = 0,07 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°С)}$ позволяет получить аналогичный результат с более дешевым огнеупором, например, Kerablock HPS1260 либо его аналогом.

Следует отметить, что в местах, недоступных или труднодоступных для обслуживающего персонала, при двухслойной конструкции футеровки возможно применение более дешевых огнеупоров, так как это не приведет к значительному увеличению температуры поверхности. Так, применение, например, классических формованных шамотных огнеупоров ША-5 с $\lambda = 1,03 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$ при средней температуре около 700 °С с теплоизоляцией (свойства см. выше) приведет к увеличению температуры на поверхности печи с 42 °С (при использовании волокнистых огнеупоров) до 68 °С. Но при этом тепловые потери возрастут в 2,5 раза. Поэтому с точки зрения энергоэффективности при квазистационарном режиме работы печи целесообразно всю футеровку изготавливать из материалов с малым коэффициентом теплопроводности (не более 0,15 Вт/(м·°С)).

Оценка тепловых потерь с наружной поверхности камерной печи в период выгрузки-загрузки садки. Режим работы камерной печи, как правило, периодический, т. е. циклы термообработки прерываются периодами загрузки-выгрузки садки. В течение данного периода футеровка печи охлаждается. В данной ситуации тепловой режим футеровки уже нельзя считать стационарным. Причем происходит охлаждение как внешней, так и внутренней поверхности. Оценка тепловых потерь за период загрузки-выгрузки требует решения нелинейной задачи теплопроводности при изменяющихся граничных условиях, а это, в свою очередь, привлечение численных методов расчета. В процессе балансовых исследований того или иного проектного решения выполнение данной работы не всегда возможно. В связи с этим более рациональным будет использование аналитической методики, позволяющей с приемлемой точностью рассчитывать тепловые потери ограждающих конструкций печи за время остановки.

В том случае, когда такие остановки кратковременны, при оценке тепловых потерь для упрощения задачи можно считать, что интенсивность теплообмена на поверхности ограждающих конструкций печи существенно не изменяется.

Далее произведем расчет температуры поверхности в процессе охлаждения при коэффициенте теплоотдачи $\alpha = \text{const}$. Для упрощения задачи будем считать, что футеровка состоит из теплоизоляционного и огнеупорного слоев. Толщина теплоизоляционного слоя δ_1 , а огнеупорного δ_2 .

Математическая формулировка задачи включает:

а) уравнение нестационарной теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right); \quad (3)$$

б) граничное условие на охлаждаемой поверхности (при $x = \delta_i$, где δ_i – толщина слоя теплоизоляции либо огнеупорной футеровки при охлаждении внутренней поверхности печи):

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} = \alpha (T_{\text{пов}} - T_{\text{о.с.}}); \quad (4)$$

в) так как футеровка применяемых в промышленности печей обладает значительной тепловой инерционностью, будем считать, что на внутренней поверхности слоя (граница между огнеупором и теплоизоляцией) плотность теплового потока не изменяется, т. е. остается такой же, как и в стационарном состоянии:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = -\lambda \frac{\Delta T_0}{\delta}; \quad (5)$$

г) начальное условие (при $\tau = \tau_0$):

$$T(x, \tau_0) = T_{\text{гр.}} \Delta T_0 x / \delta, \quad (6)$$

где $\Delta T_0 = T_{\text{пов}} - T_{\text{гр.0}}$ в момент времени $\tau = \tau_0$, являющийся начальным для рассматриваемого процесса охлаждения ограждающих конструкций камерной печи.

В качестве допущения будем считать, что зависимость температуры в охлаждаемом слое от координаты и времени при $\tau > \tau_0$ будет иметь вид

$$T(x, \tau) = T(x, \tau_0) - (\Delta T_0 - \Delta T_\tau) x^k / \delta^k. \quad (7)$$

Исследуем режим остывания слоя футеровки, используя интегральное балансовое соотношение:

$$\frac{dQ(\tau)}{d\tau} = \frac{\lambda}{\delta} \left(\frac{\partial T_0}{\partial x} \right)_{x=0} + \frac{\lambda}{\delta} \left(\frac{\partial T_i}{\partial x} \right)_{x=\delta} = \frac{\lambda}{\delta^2} \Delta T_0 + \frac{\lambda}{\delta} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=\delta}, \quad (8)$$

где $Q(\tau) = \rho c (\bar{T} - T_{o.c.})$ – избыточное среднее теплосодержание 1 м³ слоя футеровки толщиной δ .

Соотношение (8) получается путем интегрирования обеих частей уравнения теплопроводности (3) при учете граничных условий (4), (5) и обозначении средней по сечению заготовки температуры:

$$\bar{T}(\tau) = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta x T(x, \tau) dx. \quad (9)$$

Используя граничное условие (4), приведем интегральное соотношение (9) к виду

$$\delta \left(\frac{d(Q(\tau))}{d\tau} \right) = -\lambda \frac{\Delta T_0}{\delta} - \alpha (T_{пов} - T_{o.c.}). \quad (10)$$

Далее найдем выражение средней по сечению слоя температуры с учетом соотношения (9) и распределения (7). Получим

$$\bar{T}(\tau) = T_{гр} + \frac{1}{2} \Delta T_0 - \frac{1}{k+1} \Delta T_0 + \frac{1}{k+1} \Delta T_\tau = \frac{k}{k+1} T_{гр} + \frac{1}{k+1} T_{пов} + \frac{k-1}{k+1} \Delta T_0 \quad (11)$$

При заданном распределении температуры по сечению слоя футеровки определим $\partial T / \partial x$ при $x = \delta$:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} = -\frac{1}{\delta} (-\Delta T_0 + k \Delta T_0 - k \Delta T_\tau) = \frac{k}{\delta} \left(\Delta T_\tau - \frac{k-1}{k} \Delta T_0 \right). \quad (12)$$

Перепишем граничное условие (4) с учетом соотношения (12):

$$-\frac{k\lambda}{\delta} \left(\Delta T_\tau - \frac{k-1}{k} \Delta T_0 \right) = \alpha (T_{пов} - T_{o.c.}).$$

Заменив перепад температур по сечению слоя на выражение $\Delta T_\tau = T_{пов} - T_{гр}$ и выразив значение температуры на границе слоев $T_{гр}$, получим

$$T_{гр} = \frac{Bi}{k} (T_{пов} - T_{o.c.}) + T_{пов} - \frac{k-1}{k} \Delta T_0 \quad (13)$$

где принято $Bi = \alpha \delta / \lambda$.

Найдем приращение средней температуры $\bar{T}(\tau)$, используя выражение (12):

$$d\bar{T}(\tau) = \left(\frac{Bi}{k+1} + 1 \right) dT_{пов, i}.$$

Соответственно приращение теплосодержания dQ равно:

$$d\bar{Q}(\tau) = \rho c d\bar{T} = \rho c \left(\frac{Bi}{k+1} + 1 \right) dT_{пов, i}.$$

Подставив это соотношение в балансовое уравнение (10), получим

$$\left[\left(\frac{Bi}{k+1} + 1 \right) / Bi \right] \frac{dT_{пов}}{T_{пов} - T_{o.c.} + \frac{\Delta T_0}{Bi}} = -dFo, \quad (14)$$

где $Fo = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\tau}{\delta^2}$.

Интегрируя уравнение (14) в пределах от $T_{\text{пов},0}$ до $T_{\text{пов},\tau}$ (в левой части) и от τ_0 до τ (в правой части), получаем решение задачи в виде:

$$Fo - Fo_0 = \left[\left(\frac{Bi}{k+1} + 1 \right) / Bi \right] \ln \frac{T_{\text{пов},0} - T_{\text{о.с}} + \frac{\Delta T_0}{Bi}}{T_{\text{пов},\tau} - T_{\text{о.с}} + \frac{\Delta T_0}{Bi}}. \quad (15)$$

Так как целью расчетов на данном этапе является оценка влияния теплофизических характеристик материала на процесс остывания футеровки в процессе разгрузки-загрузки садки, выразим из (15) $T_{\text{пов},\tau}$:

$$T_{\text{пов},\tau} = \frac{T_{\text{пов},0} - T_{\text{о.с}} + \frac{\Delta T_0}{Bi}}{\exp \left[\frac{(Fo - Fo_0)Bi}{\left(\frac{Bi}{k+1} + 1 \right)} \right]} + T_{\text{о.с}} - \frac{\Delta T_0}{Bi} \quad (16)$$

Показатель k может быть определен путем проведения экспериментальных исследований при охлаждении плоской стенки, изготовленной из различных материалов.

При постоянной интенсивности охлаждения и толщине слоя футеровки скорость охлаждения будут определять теплофизические характеристики материала. Из выражения (16) следует, что температура поверхности в процессе охлаждения обратно пропорциональна экспоненте в знаменателе первой дроби. Следовательно, при $Fo_0 = 0$ соотношение $a = \lambda / \rho c$, т. е. коэффициент температуропроводности будет определять скорость охлаждения поверхности стенки печи. При прочих равных условиях (толщина слоя, коэффициент теплоотдачи) медленнее будет охлаждаться материал с меньшим коэффициентом температуропроводности. Например, для шамота ША-5 $a = 6,455 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, а для волокнистой футеровки (Kerablok HPS 1260) $a = 5,31 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Таким образом, несмотря на меньшую массивность, футеровка из волокнистых материалов при кратковременных остановках будет охлаждаться медленнее, чем классическая кладка из шамота ША-5.

Таким образом, выше изложена методика, позволяющая оценить изменение температуры наружных поверхностей футеровки печи и рассчитать величину тепловых потерь за период загрузки-выгрузки. Если печь во время остановки остается закрытой, то полученный результат есть не что иное, как теплота, которая аккумулируется кладкой в процессе последующего разогрева до рабочей температуры.

В том случае, когда температура поверхности футеровки изменяется в значительных пределах, т. е. при длительных остановках, коэффициент теплоотдачи уже нельзя считать константой. Рассмотрим вариант линейной зависимости α от температуры (рис. 1). Математическая формулировка задачи включает в себя:

- уравнение нестационарной теплопроводности (3);
- граничное условие на охлаждаемой поверхности (при $x = \delta$, где δ – толщина слоя теплоизоляции):

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} = \alpha (T_{\text{пов}} - T_{\text{о.с.}}) = (a T_{\text{пов}} + \alpha_0) (T_{\text{пов}} - T_{\text{о.с.}}). \quad (17)$$

Здесь зависимость $\alpha = f(T_{\text{пов}})$ задается на основании данных, приведенных в работе [1]. Так, для стенки, покрытой обыкновенной краской, зависимость в диапазоне температур от 40 до 300 °С будет иметь вид

$$\alpha = 0,0618 T_{\text{пов}} + 8,22.$$

При использовании алюминиевой краски

$$\alpha = 0,043 T_{\text{пов}} + 7,01.$$

Вновь воспользуемся допущениями (5) и (7) и начальным условием (6).

Как и в предыдущем случае, исследуем режим остывания слоя футеровки, используя интегральное балансовое соотношение (8).

Перепишем граничное условие (17) с учетом соотношения (12) и зависимости коэффициента теплообмена на поверхности печи от температуры поверхности:

$$-\frac{k\lambda}{\delta} \left(\Delta T_{\tau} - \frac{k-1}{k} \Delta T_0 \right) = a \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right).$$

Заменяя перепад температур по сечению слоя на выражение $\Delta T_{\tau} = T_{\text{пов}} - T_{\text{гр}}$ и выразив значение температуры на границе слоев $T_{\text{гр}}$, получим:

$$T_{\text{гр}} = \frac{a\delta}{k\lambda} \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) + T_{\text{пов}} - \frac{k-1}{k} \Delta T_0.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \bar{T}(\tau) &= \frac{k}{k+1} \left[\frac{a\delta}{k\lambda} \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) + T_{\text{пов}} - \frac{k-1}{k} \Delta T_0 \right] + \frac{1}{k+1} T_{\text{пов}} + \frac{k-1}{k+1} \Delta T_0 = \\ &= \frac{1}{k+1} \frac{a\delta}{\lambda} \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) + T_{\text{пов}}. \end{aligned} \quad (18)$$

Следовательно, приращение средней по сечению слоя температуры будет равно:

$$d\bar{T}(\tau) = \frac{1}{k+1} \frac{a\delta}{\lambda} d \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) + dT_{\text{пов}}.$$

Подставив данное выражение в балансовое уравнение, получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{k+1} \frac{a\rho c\delta^2}{\lambda} \left(d \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) + \frac{(k+1)\lambda}{a\delta} dT_{\text{пов}} \right) = \\ = -\lambda \frac{\Delta T_0}{\delta} - a \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) d\tau. \end{aligned} \quad (19)$$

Учитывая, что $Fo = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\tau}{\delta^2}$, получаем

$$\begin{aligned} \frac{a}{k+1} \left[d \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) + \frac{(k+1)\lambda}{a\delta} dT_{\text{пов}} \right] = \\ = \left[-\lambda \frac{\Delta T_0}{\delta} - a \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) \right] dFo. \end{aligned} \quad (20)$$

Перенесем множитель перед dFo и отдельно проинтегрируем полученное выражение в пределах от $T_{\text{пов},0}$ до $T_{\text{пов},\tau}$ (в левой части) и от τ_0 до τ (в правой части). При интегрировании по $dT_{\text{пов}}$ представим знаменатель в виде:

$$\begin{aligned} 1 / \left[-\lambda \frac{\Delta T_0}{\delta} - a \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) \right] = \\ = \left[\frac{1}{T_{\text{пов}} + \frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} + \sqrt{\frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} - \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0}} - \frac{1}{T_{\text{пов}} - \sqrt{\frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} - \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0}} \right] \cdot \frac{1}{T_{\text{o.c}} - \frac{\alpha_0}{a}}. \end{aligned}$$

После интегрирования получим

$$\begin{aligned} Fo - Fo_0 &= \frac{1}{k+1} \ln \frac{T_{\text{пов},0}^2 + T_{\text{пов},0} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} + \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0}{T_{\text{пов},\tau}^2 + T_{\text{пов},\tau} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} + \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0} + \\ &+ \frac{1}{T_{\text{o.c}} - \frac{\alpha_0}{a}} \frac{\lambda}{a\delta} \left[\ln \frac{T_{\text{пов},0} + \frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} + \sqrt{\frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} - \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0}}{T_{\text{пов},\tau} + \frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} + \sqrt{\frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} - \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0}} - \ln \frac{T_{\text{пов},0} - \sqrt{\frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} - \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0}}{T_{\text{пов},\tau} - \sqrt{\frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} - \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0}} \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

Решение справедливо при условии:

$$T_{\text{пов}} \neq -\frac{\alpha_0}{a} + T_{\text{о.с}} - \sqrt{\frac{\alpha_0}{a} T_{\text{о.с}} - \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0},$$

$$T_{\text{пов}} \neq \sqrt{\frac{\alpha_0}{a} T_{\text{о.с}} - \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0}.$$

Оценка тепловых потерь с внутренней поверхности камерной печи в период выгрузки-загрузки садки. При высокой температуре охлаждаемой поверхности определяющую роль играет лучистый теплообмен. В связи с этим математическую формулировку задачи охлаждения плоской стенки представим в следующем виде:

а) уравнение нестационарной теплопроводности (3);

б) граничное условие на охлаждаемой поверхности (при $x = \delta$, где δ – толщина слоя теплоизоляции либо огнеупорной футеровки при охлаждении внутренней поверхности печи):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \sigma_0 \varepsilon \cdot 10^{-8} (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{о.с.}}^4) = \sigma \cdot 10^{-8} (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{о.с.}}^4). \quad (22)$$

Вновь рассмотрим интегральное балансовое соотношение (8) с допущениями (5) и (7) и начальным условием (6).

С учетом граничных условий (22) и (5) приведем интегральное соотношение (8) к виду:

$$\delta \left(\frac{d(Q(\tau))}{d\tau} \right) = -\lambda \frac{\Delta T_0}{\delta} - \sigma \cdot 10^{-8} (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{о.с.}}^4). \quad (23)$$

Далее найдем выражение средней по сечению слоя температуры с учетом соотношения (23) и распределения (7). Получим

$$\bar{T}(\tau) = T_{\text{гр}} + \frac{1}{2} \Delta T_0 - \frac{1}{k+1} \Delta T_0 + \frac{1}{k+1} \Delta T_\tau = \frac{k}{k+1} T_{\text{гр}} + \frac{1}{k+1} T_{\text{пов}} + \frac{k-1}{k+1} \Delta T_0. \quad (24)$$

При заданном распределении температуры по сечению слоя футеровки определим $\partial T / \partial x$ при $x = \delta$:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = -\frac{1}{\delta} (-\Delta T_0 + k \Delta T_0 - k \Delta T_\tau) = \frac{k}{\delta} \left(\Delta T_\tau - \frac{k-1}{k} \Delta T_0 \right). \quad (25)$$

Перепишем граничное условие (22) с учетом соотношения (25):

$$-\frac{k\lambda}{\delta} \left(\Delta T_\tau - \frac{k-1}{k} \Delta T_0 \right) = \sigma \cdot 10^{-8} (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{о.с.}}^4).$$

Заменив перепад температур по сечению слоя на выражение $\Delta T_\tau = T_{\text{пов}} - T_{\text{гр}}$ и выразив значение температуры на границе слоев $T_{\text{гр}}$, получим:

$$T_{\text{гр}} = T_{\text{пов}} - \frac{k-1}{k} \Delta T_0 + \frac{\delta \sigma \cdot 10^{-8}}{k\lambda} (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{о.с.}}^4). \quad (26)$$

Запишем приращение средней температуры $\bar{T}(\tau)$, используя выражение (25):

$$d\bar{T}(\tau) = dT_{\text{пов}} + \frac{\delta \sigma \cdot 10^{-8}}{(k+1) \cdot \lambda} d(T_{\text{пов}}^4).$$

Соответственно приращение теплосодержания dQ равно:

$$d\bar{Q}(\tau) = \rho c d\bar{T} = \rho c \left(dT_{\text{пов}} + \frac{\delta \sigma \cdot 10^{-8}}{(k+1) \cdot \lambda} d(T_{\text{пов}}^4) \right).$$

Разделив переменные, получим

$$\frac{\lambda}{\delta \sigma \cdot 10^{-8}} dT_{\text{пов}} + \frac{1}{k+1} dT_{\text{пов}}^4 = -dFo.$$

$$T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{о.с.}}^4 + \frac{\lambda}{\sigma \cdot 10^{-8}} \Delta T_0$$
(27)

Обозначим $B^4 = \frac{\lambda}{\delta \sigma \cdot 10^{-8}} \Delta T_0 - T_{0,c}^4$.

Интегрируя уравнение (27) в пределах от $T_{пов,0}$ до $T_{пов,\tau}$ (в левой части) и от Fo_0 до Fo (в правой части), получаем решение задачи в виде

$$Fo - Fo_0 = \frac{\lambda}{\sigma \cdot 10^{-8} \delta} \left[\ln \frac{(T_{пов,0}^2 + BT_{пов,0} \sqrt{2 + B^2})(T_{пов,\tau}^2 - BT_{пов,\tau} \sqrt{2 + B^2})}{(T_{пов,0}^2 - BT_{пов,0} \sqrt{2 + B^2})(T_{пов,\tau}^2 + BT_{пов,\tau} \sqrt{2 + B^2})} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2\sqrt{2}B^3} \left(\operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2}BT_{пов,0}}{B^2 - T_{пов,0}^2} - \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2}BT_{пов,\tau}}{B^2 - T_{пов,\tau}^2} \right) \right] + \\ + \frac{1}{k+1} \ln \frac{T_{пов,0}^4 - B^4}{T_{пов,\tau}^4 - B^4}. \quad (28)$$

Решая графическим способом данное уравнение, можно определить, какова будет температура поверхности печи в конце периода охлаждения. В случае, когда рассматривается процесс охлаждения внутренней поверхности печи, коэффициент σ следует умножить на соответствующий коэффициент диффрагмирования и отношение площади открытого окна к площади охлаждаемой поверхности. Степень температурной функции k может быть определена на основании экспериментальных исследований.

Выводы

Представлена методика, позволяющая на предпроектной стадии выполнять оценку эффективности модернизации печи путем замены футеровки, а также определять целесообразность использования конкретных материалов либо многослойной конструкции в зависимости от рабочей температуры печи и условий теплообмена на поверхности. Разработана методика, позволяющая рассчитывать температуру поверхности футеровки при охлаждении в период выгрузки-загрузки садки.

Литература

1. А р е н д а р ч у к, А. В. Общепромышленные электропечи периодического действия / А. В. Арндарчук, А. С. Бородачев, В. И. Филиппов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 112 с.
2. А в е р и н, С. И. Расчеты нагревательных печей / С. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб, А. Ф. Кравцов [и др.]. Харьков: Техника, 1969. 540 с.

References

1. A r e n d a r c h u k, A. V., B a r a d a c h e v A. S., F i l i p p o v V. I. *Obshhepromyshlennye elektropечи periodicheskogo dejstviya* [Common industrial electric batch]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 112 p.
2. A v e r i n, S. I., G o l d f a r b E. M., K r a v t s o v A. F. [et al.] *Raschety nagrevatel'nyh pechej* [Calculations of heating furnaces]. Kharkiv, Engineering Publ., 1969. 540 p.

Сведения об авторе

Кабишов Сергей Михайлович, Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь. E-mail: boxsmk@gmail.com. Тел. моб.: +375 29 768 17 78.

Information about the authors

Kabishov Sergey, Belarusian National Technical University, 65, Nezavisimosti ave., Minsk, 200013, Belarus. E-mail: boxsmk@gmail.com. Tel.: +375 29 768 17 78.



УДК 669.21

Поступила 09.11.2015

СНИЖЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ РАСХОДОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ОАО «БМЗ – УПРАВЛЯЮЩАЯ КОМПАНИЯ ХОЛДИНГА «БМК» REDUCTION OF SPECIFIC CONSUMPTION OF FUEL AND ENERGY RESOURCES AT THE JSC «BSW – MANAGEMENT COMPANY OF HOLDING «BMC»

А. Л. СУГОЙДЬ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Беларусь

A. L. SUGOYD, JSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», Zhlobin city, Belarus

В настоящее время на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» проведена колоссальная работа, направленная на модернизацию производственных мощностей и создание новых энергоэффективных производств, позволяющих в конечном итоге снизить себестоимость готового продукта. Основой развития предприятия является проведение технических мероприятий для устранения дисбаланса переделов и создания условий для увеличения выплавки стали до уровня 3 млн. тонн в год. При этом главное условие – обеспечение полной переработки литой заготовки в готовую товарную продукцию с более высокой добавленной стоимостью.

Now on JSC «BSW – Management Company of Holding «BMC» the enormous work directed on modernization of capacities and creation of the new energy effective processes allowing to reduce final prime cost of a ready-made products is carried out. Basis of development of the enterprise are technical activities to eliminate an imbalance of process stages and creation of conditions to increase smelting of steel to the level of 3 million tons per year. Thus the main condition – ensuring full processing of cast preparation in ready products with higher value added.

Ключевые слова. Топливо-энергетические ресурсы, удельный расход, энергоэффективность, экономия, реконструкция, модернизация.

Keywords. Fuel and energy resources, specific consumption, energy efficiency, economy, reconstruction, modernization.

В настоящее время на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» реализованы следующие масштабные мероприятия:

1. Построена известково-обжигательная установка № 3 производительностью 400 т в сутки. Реализация данного проекта позволила отказаться от закупок флюсовых материалов у сторонних организаций, сталеплавильное производство обеспечено собственной известью с содержанием СаО до 92% (ранее около 80%). Использование такого материала обеспечивает оптимальный уровень шлака, сокращение тепловых потерь на излучение, при этом достигается экономия электроэнергии на 1 т выплавляемой стали.

2. Интенсификация выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи № 1. Успешное применение кислородных технологий на дуговых сталеплавильных печах № 2 и 3 доказало необходимость реализации данного мероприятия и на ДСП № 1. В ходе реконструкции также модернизирована гидравлическая система печи и заменена система управления с визуализацией технологического процесса. Реализованное мероприятие увеличило производительность агрегата до уровня 1 млн. т стали в год. Одновременно получено снижение удельных расходов электроэнергии и электродов, сокращено время выплавки, улучшены эргономические показатели процесса производства стали.

3. Реконструкция пылегазоулавливающей установки № 1. Основной целевой задачей проекта является снижение выбросов в атмосферу. Кроме того, мероприятие предполагает дополнительную утилизацию тепла отходящих газов, что позволяет сократить объемы сжигания импортируемого природного газа.

4. Для снижения потерь в системе электроснабжения с одновременным повышением качества электрической энергии внедрены установки динамической компенсации реактивной мощности на главных понизительных подстанциях «Прокат» и «Корд».

5. С целью снижения оплаты за электрическую энергию и оптимизации теплоснабжения внедрена собственная когенерационная установка мощностью 6,6 МВт. Прорабатывается вопрос внедрения дополнительных генерирующих мощностей в перспективе.

6. В стадии реализации проект увеличения мощностей внепечной обработки стали. В пролете между двумя сталеплавильными цехами запланировано создание нового участка внепечной обработки, в составе которого будут дополнительно построены двухпозиционная установка «печь-ковш», и установка для вакуумной дегазации стали циркуляционного типа. Комплекс мероприятий позволит обеспечить работу электросталеплавильных печей и машин непрерывного литья заготовок с оптимальной производительностью, что в свою очередь увеличит ритмичность производства; расширить номенклатуру производимых марок сталей, в том числе качественной группы, повысить качество литой заготовки; снизить удельный расход дорогостоящих легирующих добавок и энергоресурсов.

ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» является одним из крупнейших потребителей топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в Республике Беларусь. Потребление ТЭР в текущем году составит 696 тыс. т у. т. Структура потребления ТЭР за последние годы практически неизменна: 75% электроэнергии и 25% природного газа. Программа модернизации предусматривала, прежде всего, внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий, оборудования, отвечающих самому высокому мировому уровню развития науки и техники. В результате проведенных работ отмечается устойчивый тренд снижения удельных расходов энергоресурсов на 1 т продукции (рис. 1–4).

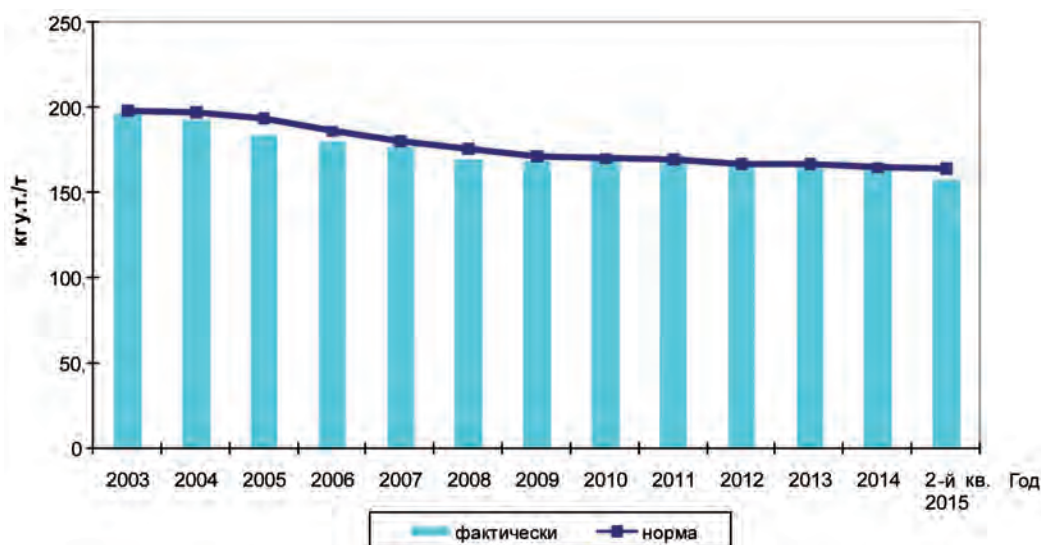


Рис. 1. Динамика снижения удельного расхода на производство стали

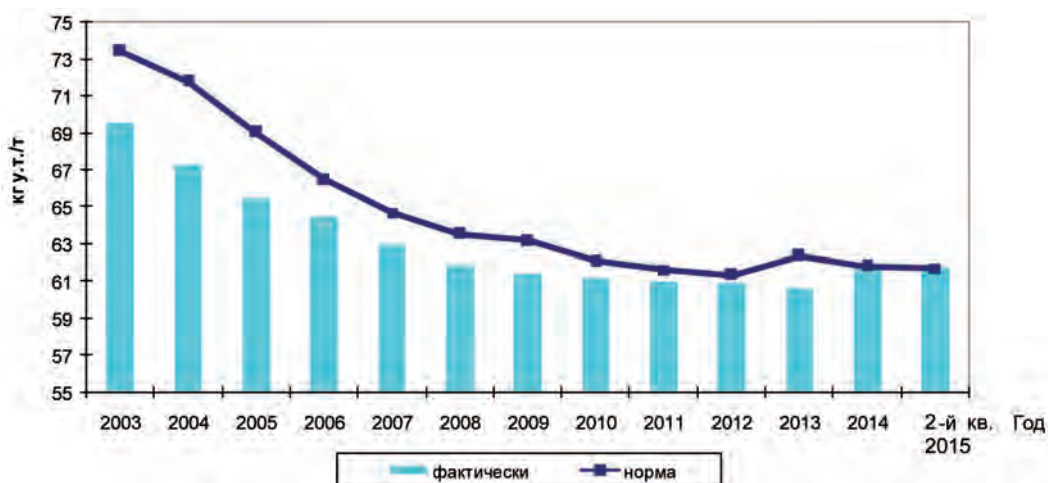


Рис. 2. Динамика снижения удельного расхода на прокат металлов

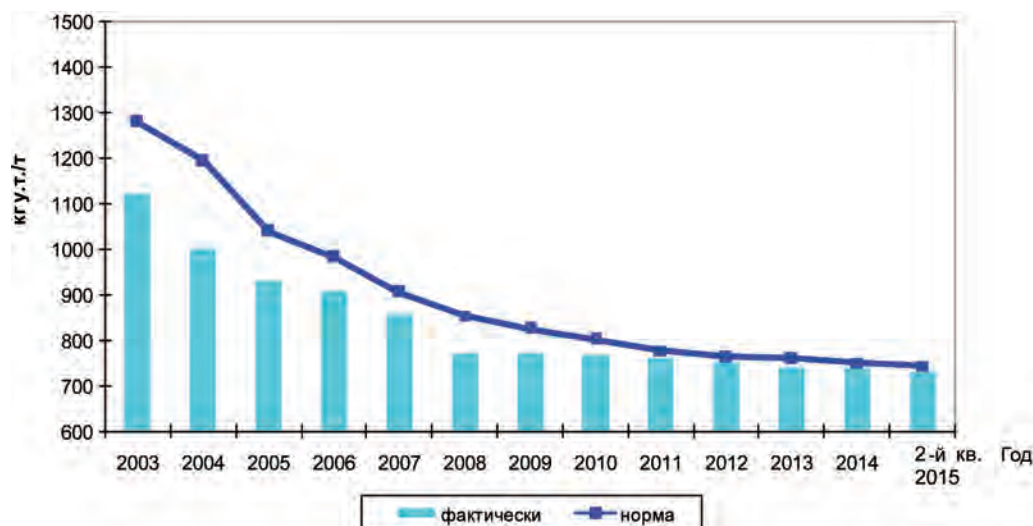


Рис. 3. Динамика снижения удельного потребления ТЭР на метизное производство

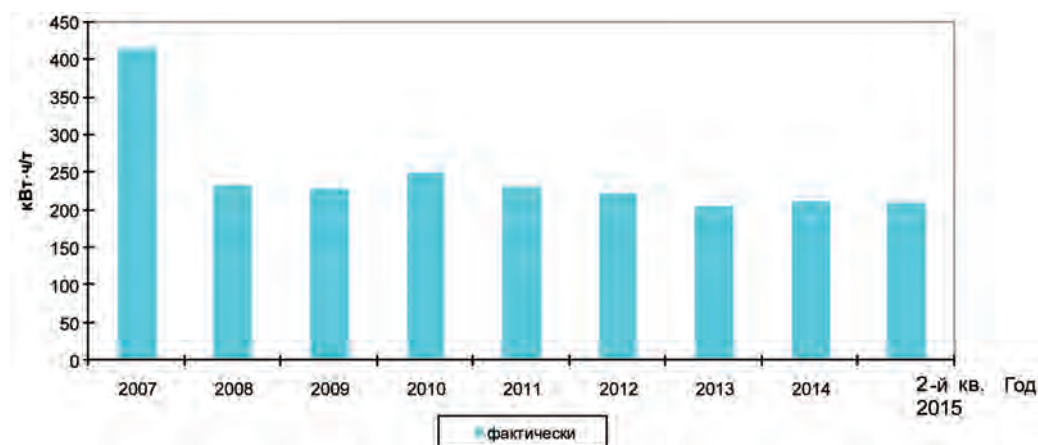


Рис. 4. Динамика снижения удельного расхода на трубное производство

В полном объеме выполняется программа по энергосбережению (см. таблицу).

Т а б л и ц а

Год	Количество внедренных мероприятий	Экономия ТЭР от внедренных мероприятий, т у. т.
2011	29	45 187
2012	27	36 892
2013	28	50 396
2014	19	41 600
Январь-июнь 2015	8	21 061

Несмотря высокую стоимость энергоресурсов, принятыми мерами удается удерживать долю ТЭР в себестоимости продукции на уровне не выше 20%, что характеризует существующий уровень использования энергии, как соответствующий лучшим мировым аналогам. В 2013 г. данный показатель составил 19,0%, в 2014 г. – 17,3%. Результат достигнут благодаря инвестициям в реконструкцию, модернизацию и техническое перевооружение.

Сведения об авторе

Сугойд Александр Леонидович, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», 247210, г. Жлобин, ул. Промышленная, 37, Гомельская обл., Республика Беларусь. Тел. + 375 2334 5-42-17. E-mail: bes@bmz.gomel.by

Information about the authors

Sugoyd Alexander, JSC «BSW — Management Company of Holding «BMC», Zhlobin city, Gomel Region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. Тел. + 375 2334 5-42-17. E-mail: bes@bmz.gomel.by



УДК 669.74

Поступила 29.10.2015

СИСТЕМА РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ОКРУЖЕНИЯ «5S»

THE SYSTEM OF RATIONAL ORGANIZATION OF THE WORKING ENVIRONMENT «5S»

С. В. ЗАХОРЕВИЧ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Беларусь

S. V. ZAKHOREVICH, JSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», Zhlobin city, Belarus

В статье представлена система рациональной организации рабочего окружения «5S», внедрение которой позволяет организовать и рационализировать рабочие места, что приведет к созданию комфортного психологического климата и повышению производительности труда.

This article outlines rational organization of work environment '5S'. Implementation of this system makes it possible to organize and rationalize working places, resulting in comfortable psychological climate and better labour efficiency.

Ключевые слова. Система 5S, лаборатория физико-механических испытаний, рабочее место, вредные факторы, этапы внедрения.

Keywords. 5S system, physical-mechanical testing laboratory, working place, harmful factors, implementation stages.

Система 5S – системный подход к организации, наведению порядка и уборке рабочего места, возникла к середине 50-х годов XX в. в Японии. В то время японские предприятия были вынуждены работать в условиях дефицита ресурсов. Поэтому они разработали для своего производства метод, при котором не было места никаким потерям.

При подготовке плана по внедрению системы 5S был проанализирован и сопоставлен ряд материалов с условиями в лаборатории физико-механических испытаний. Так образовался перечень вредных факторов, приводящих к следующим потерям:

- загрязненность может привести к выходу оборудования из строя и задержке выдачи результатов испытаний, а также проявлению чувства безразличия у персонала, нежелания улучшать качество своей работы;
- беспорядок отрицательно влияет на поиск необходимого инструмента или приспособлений, а при посменном графике работ беспорядок лишь увеличивается;
- посторонние предметы отвлекают внимание, требуют дополнительных перемещений в процессе выполнения операции, связанных с поиском необходимых инструментов и приводят к скоплению ненужных вещей;
- отсутствие регламента организации и поддержания рабочего окружения приводит к беспорядочным действиям работников, выполнению лишней работы и общей неорганизованности, что вызывает повышение вероятности несчастных случаев.

Внедрение системы 5S состоит из пяти этапов:

1. Сортировка (Seiri) – освобождение рабочего пространства от ненужных предметов.
2. Рациональное расположение (Seiton) – размещение предметов там, где они необходимы.
3. Уборка (Seiso) – устранение загрязнений и содержание рабочего места в чистоте.
4. Стандартизация (Seiketsu) – необходимое условие соблюдения первых трех этапов.
5. Совершенствование (Shitsuke) – непрерывное повышение эффективности методов по поддержанию рабочего окружения.

Приступив к внедрению системы 5S, мы столкнулись со следующими возражениями:



Рис. 1. Организация рабочего места в лаборатории физико-механических испытаний (до и после): а, б – ящики производственного шкафа на рабочем месте; в – оснастка для высадочного прессы с отрезным устройством; з – складское помещение



Рис. 2. Скопление проб после выдачи результатов испытаний

- Сортировка и рациональное расположение не влияют на рост производительности. Ошибочно недооценивать эти виды деятельности, а также то, что систему 5S следует внедрять только там, где очень грязно и нет должной организованности. Со временем появляется осознание значения сортировки и рационального расположения.

- Ранее уже принимались сортировка и рациональное расположение. Немного переставить предметы, аккуратно сгруппировав их, недостаточно. Это весьма отдаленное отношение к системе 5S.

- Содержание оборудования в чистоте. Зачем чистить оборудование, если оно все равно загрязнится? Однако это возражение утрачивает логику, если речь идет о негативном влиянии грязного рабочего места на качество и эффективность работы.

- Высокая занятость. При большом объеме работ сортировка, рациональное расположение и уборка отходят на второй план. Следует принять этот факт. Однако и в таких условиях можно достигнуть пятого этапа. Важно, чтобы каждый участник осознавал полезность внедрения системы 5S.

На данный момент внедрение системы 5S приближается к пятому этапу. Нам удалось навести порядок на рабочих местах в лаборатории физико-механических испытаний. Осуществляется постоянный контроль для содержания рабочих мест в чистоте.

Помимо этого, внедрение системы 5S позволило упорядочить и упростить производственную логистику. Ввод результатов испытаний в программы для внутреннего заводского пользования «Механика» и «Геометрия» осуществлялся на трех компьютерах, доступ к нормативно-технической документации в электронном виде – на одном. В настоящее время это возможно осуществлять на пяти компьютерах. Ликвидирована возможность скопления проб после проведения испытаний в рабочей зоне.

Для стандартизации были применены средства визуализации: плакаты, рамки, стенды и производственные надписи. Это позволило разделить производственное помещение на рабочие зоны и информировать персонал своевременно. Существует уголок для внесения предложений по организации рабочего места, что мотивировало персонал к рационализации работ по проведению испытаний. Поступившие предложения тщательно анализируются и прорабатываются на предмет оценки их обоснованности внедрения.

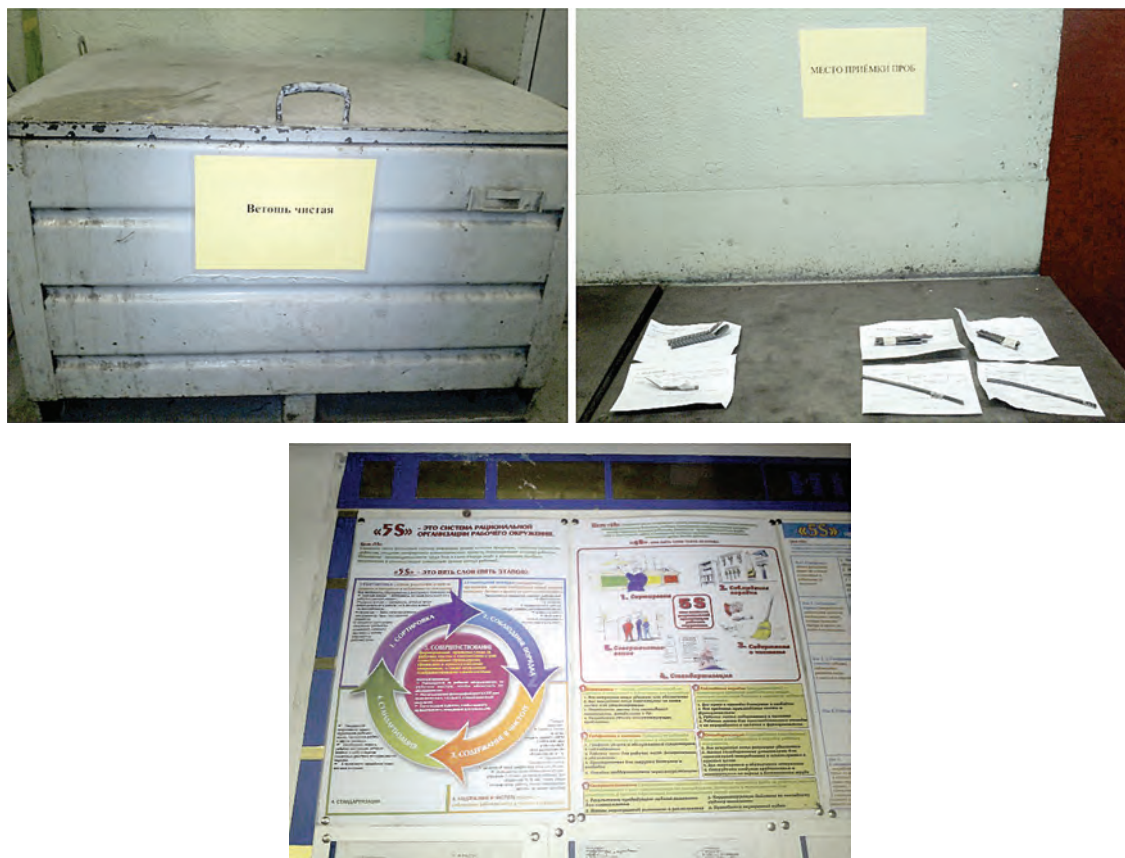


Рис. 3. Средства визуализации на рабочем месте

Выводы

Система 5S применима и может успешно внедряться на производстве. Однако содержание принципов системы и технология ее внедрения требуют существенной адаптации с учетом экономической ситуации, методов организации производства и менталитета персонала. Возможность успешного внедрения непосредственно зависит от социально-экономических условий труда на рабочих местах. Важно, чтобы каждый участник осознавал полезность внедрения системы 5S.

Сведения об авторе

Захоревич Сергей Владимирович, ОАО «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «БМК», ул. Промышленная, 37, 247210, г. Жлобин, Гомельская область, Беларусь. E-mail: sv.zahorevich@bmz.iron. Тел. (+375 2334) 55207.

Information about the author

Zakhorevich Sergei, JSC «Byelorussian Steel Works – Management Company of Holding «BMC», Promyshlennaya str., 37, Zhlobin city, Gomel region, Belarus. E-mail: sv.zahorevich@bmz.iron. Tel. (+375 2334) 55207.



УДК 669.74

Поступила 02.11.2015

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАЛЛОЛОМА В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF THE USE OF SCRAP IN STEEL PRODUCTION

*С. В. КОРНЕЕВ, С. М. КАБИШОВ, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь*

S. V. KORNEEV, S. M. KABISHOV, Belarussian National Technical University, Minsk, Belarus

Показаны основные экологические проблемы, возникающие при использовании металлического лома в сталеплавильном производстве. Представлены условия появления в выбросах электросталеплавильных печей вредных веществ и меры борьбы с ними. Показаны преимущества предварительной подготовки и очистки металлолома от примесей в качестве одной из мер по уменьшению вредных выбросов от сталеплавильных печей в атмосферу.

The article shows the major environmental problems arising from the use of scrap in steelmaking. Presented conditions appearance in the electric furnace emissions of harmful substances and their control measures. Shown the advantages of a preliminary preparation and cleaning impurities of metal as one of the measures to reduce emissions from the furnaces into the atmosphere.

Ключевые слова. Экология, дуговая сталеплавильная печь, металлический лом, предварительный подогрев, выбросы, дожигание, фураны, диоксины, подготовка лома.

Keywords. Ecology, electric arc furnace, preheat scrap metal, emissions, afterburning, furans, dioxins, preparing scrap.

Введение

В настоящее время снижение потребления энергетических и природных ресурсов и уменьшение отрицательного воздействия производства на окружающую среду входят в число основных приоритетов развития металлургических технологий и оборудования. Очевидно, что эти задачи тесно связаны между собой. Несмотря на высокий уровень внедрения новейших технических достижений, металлургические предприятия служат источниками вредных выбросов и крупными потребителями энергоресурсов. В связи с этим поиск рациональных методов, позволяющих улучшить ситуацию, является актуальным и целесообразным.

Сопоставление различных технологий выплавки стали с точки зрения энергопотребления, связь энергопотребления и экологических параметров процесса

Значительные объемы энергоресурсов, потребляемые металлургическими заводами, — основная причина увеличения выбросов парниковых газов и оксидов азота генерирующими установками. Поэтому разработка и внедрение технологий, обеспечивающих снижение энергопотребления на стадии выплавки стали, которая является одним из наиболее энергоемких технологических переделов черной металлургии, положительно отражается на общей экологической ситуации.

В условиях современных металлургических предприятий для получения стального расплава используются две основные технологии: передел жидкого чугуна и переплав стального лома. Следует отметить, что на практике технология выплавки стали и в кислородных конвертерах, и дуговых сталеплавильных печах зачастую включает элементы как первого, так и второго вариантов. Кроме того, в последние десятилетия все большее развитие получают технологии, связанные с применением при выплавке стали железа прямого восстановления (DRI) и горячебрикетированного железа (HBI). Данные шихтовые материалы характеризуются низкой концентрацией вредных примесей (S, P, Cu, Ni, Cr, Sn, и As), что по-

звolyет получать высококачественную металлопродукцию. Но замена 1 % лома металлизированным сырьем при степени металлизации окатышей (горячебрикетированного железа) 92–93 % и содержании в них 4–5 % пустой породы требует ввода до 2 кВт·ч/т дополнительной энергии. И, напротив, замена 1 % стального лома передельным чушковым чугуном позволяет дополнительно ввести 1,1 кВт·ч/т энергии за счет окисления C и Si.

Чушковый чугун также имеет низкую концентрацию примесей цветных металлов, но более высокое содержание серы и фосфора, чем в стальном ломе. Значительное количество чугуна в шихте приводит к увеличению продолжительности плавки из-за необходимости дополнительного обезуглероживания. Кроме того, результатом увеличения расхода шлакообразующих при работе с применением DRI, HBI и передельного чугуна является рост энергопотребления.

Несмотря на более высокие качественные показатели, использование первородного сырья приводит к увеличению расхода энергии на получение 1 т металлопродукции, а также снижению производительности печей. Таким образом, применение металлического лома в электродуговых печах, как правило, требует меньших энергетических затрат.

Помимо снижения энергопотребления, использование металлолома в металлургическом производстве позволяет уменьшить экологическую нагрузку на месторождения руд, а также значительно сократить объемы выбросов вредных веществ в окружающую среду по сравнению с предприятиями полного цикла, где используется первородное сырье. Кроме того, уменьшается рассеяние различных металлов в природной среде вследствие необходимости сортировки лома с выделением отдельных металлов и сплавов и дальнейшего их использования. Но достижение указанного результата возможно только при организации эффективной системы сортировки и использовании специальных способов предварительной подготовки металлошихты.

Предварительная подготовка металлошихты, безусловно, требует как затрат труда, так и затрат энергоресурсов, однако получаемый эффект заключается не только в удалении вредных веществ, но и в повышении технико-экономических показателей плавки.

Например, из практики сталеплавильного производства известно, что на расход энергии влияет количество загружаемых бадей шихты. Считается, что загрузка каждой бады требует дополнительных затрат энергии около 8–15 кВт·ч/т. Очевидно, что количество подвалок будет напрямую зависеть от насыпной плотности и способа загрузки шихты. Плотная завалка шихты обеспечивается оптимальным соотношением различных видов лома. Как правило, в ДСП рекомендуется вводить 15–20 % мелкого лома, 40–50 % крупного и 30–45 % среднего. Форма и размер кусков лома определяют скорость плавления и соответственно расход энергии. Различие в размерах и наличие примесей может существенно повысить расход энергии (до 40–50 кВт·ч/т).

При легковесном ломе и небольшом количестве крупногабаритных кусков их размещают сверху некоторой части легковесного лома и в центральной части первой бады. Практический опыт также показал, что при шихтовке плавок высокопроизводительных дуговых печей следует ограничивать количество тяжеловесного кускового лома с размерами сечения 250×250 мм и более на уровне 20 %, так как даже уменьшение числа подвалок при большей доле такого лома не позволит компенсировать дополнительные затраты времени и энергии на его расплавление [1].

Одной из сложных проблем при переработке вторичных металлов является переработка легковесного, в частности, автомобильного, лома, поскольку такой лом содержит большое количество неметаллических материалов, а также цветных металлов. Наибольший расход энергии на обработку наблюдается при дроблении кузовов вместе с двигателем, шинами и сиденьями и составляет в среднем 27 кВт·ч/т, а наименьший – для сплюснутых кузовов – в среднем 16 кВт·ч/т. Но, во-первых, дробление позволяет в дальнейшем разделить автомобильный лом на три фракции: магнитную (черные металлы), воздушную (неметаллические материалы с низкой плотностью) и цветную, в которую входят все цветные металлы – алюминий, цинк, медь, а также нержавеющая сталь, во-вторых, сепарация минимизирует вероятность попадания в печь ПВХ материалов и резины.

Для анализа влияния дополнительной предварительной подготовки металлошихты перед плавкой на технико-экономические показатели были рассчитаны материальные и тепловые балансы плавок, а также рассмотрены производственные данные. Полученные результаты показали, что подготовка металлошихты приводит к уменьшению времени плавки на 5–6 мин, что, в конечном итоге, обеспечивает большую производительность ДСП. Кроме того, с учетом потребления электрической энергии на пресс-ножницах (удельный расход электроэнергии 15 кВт·ч/т) и другом оборудовании для подготовки металлошихты

(5 кВт·ч/т) снижение расхода электрической энергии при плавке перекрывает затраты на предварительную подготовку и составляет в среднем 40 кВт·ч/т. Следовательно, с точки зрения энергосбережения данные мероприятия являются эффективными.

Условия и источники образования вредных выбросов при нагреве и плавлении металлолома в ДСП

Выбросы, которые образуются в процессе выплавки стали в ДСП, можно условно разделить на две группы. К первой относятся вещества, которые являются неизбежными продуктами технологического процесса и количество которых можно уменьшить путем совершенствования технологии и оборудования. Для очистки газов от выбросов первой группы эффективно применяют классические схемы, включающие систему дожигания и различные фильтры.

Основным назначением системы дожигания является окисление угарного газа до состояния CO_2 . Суммарный объем CO определяется количеством окисляемого углерода и интенсивностью продувки ванны кислородом, а также наличием устройств для дожигания CO в рабочем пространстве печи.

Задачей системы фильтров, применяемых в электросталеплавильном производстве, является снижение концентрации пыли до приемлемого уровня. Известно, что в процессе выплавки стали в электродуговых печах выделяется большое количество пыли, которое зависит от особенностей технологического процесса и изменяется в широких пределах: от 6 до 25 кг/т [2]. Состав пыли и скорость ее выделения также зависят от периода плавки и типа применяемого плавильного оборудования. Например, на количество оксидов железа, образующихся при горении дуг, оказывают влияние электрический режим плавки, состав атмосферы печи и другие факторы. В электродуговых печах переменного тока угар железа значительно выше, чем в печах постоянного тока.

Как показывает производственный опыт, в составе уловленной пыли также содержится значительное количество оксидов кальция, кремния, магния, источниками образования которых являются шлакообразующие, футеровка печи и примеси металлошихты. Концентрация фторидов в выбросах пропорциональна количеству плавикового шпата, подаваемого с известью в качестве компоненты шлакообразующих.

Для работников сталеплавильных цехов значительную проблему составляют также вторичные пылегазовые выбросы, которые невозможно полностью устранить. Данные выбросы возникают при выпуске металла, заправке печи и особенно при завалке шихты в печь с открытым сводом. При этом количество выбросов существенно зависит от засоренности металлошихты примесями.

Именно неметаллические примеси, содержащиеся в скрапе, являются причиной образования выбросов, которые следует выделить во вторую группу. Данные выбросы представляют собой продукты сгорания или иных химических процессов, происходящих в ДСП и системе дымоудаления с веществами, которые попадают в печь с засоренным металлоломом. Их концентрация в уходящих газах, как правило, невелика, но они могут представлять весьма серьезную опасность для людей и окружающей среды. Большинство систем газоочистки, действующих в электросталеплавильных цехах, не предназначено для качественного удаления газообразных веществ, что создает экологические проблемы в случае использования на предприятии засоренного лома.

Согласно СТБ 2026–2010, засоренность некоторых видов металлического лома безвредными примесями и маслами регламентируется и ограничена следующими значениями: 2АШР, 4А – 0,5 %; 2А, 6А, 8А, 11А – 1; 3А – 1,5; 1А, 5АК, 9А, 10А – 2; 5А, 7А, 10АС – 3; 6АМ, 7АМ, 15АМ – 5; 13А – 6%. Как показывает практика сталеплавильного производства, значительная часть неметаллических материалов, попадающих в металлолом, может представлять собой горючие вещества.

К основным загрязнителям металлошихты, способным к горению, относят резины, пластики, органическое стекло, покрытия в виде лаков и красок, масла и смазки и др. Как правило, это углеводороды, которые могут содержать различные добавки.

Полиэтилен, например, имеет температуру воспламенения 270 °С и при нагревании его на воздухе выше 120 °С возможно выделение в атмосферу летучих продуктов термоокислительной деструкции, содержащих уксусную кислоту, формальдегид, ацетальдегид, оксид углерода. Полиэтилентерефталат (ПЭТФ, ПЭТ, лавсан) имеет температуру плавления $t_{\text{пл}} = 260$ °С и температуру разложения – 350 °С. Полная утилизация ПЭТФ производится управляемым сжиганием при температуре не менее 850 °С. Органическое стекло имеет температуру плавления 160 °С, температуру кипения 200 °С, температуру воспламенения 260 °С. Оргстекло при горении не выделяет ядовитых газов. Поливинилхлорид (ПВХ) имеет температуру плавления 150–220 °С, при температурах выше 110–120 °С склонен к разложению с выделением хлористого водорода. Некоторые виды специальных резин (например, маслостойкие) получают на основе хлоропренового каучука (наирита) и при их разложении также могут образовываться хлорсодержащие соединения.

Таким образом, высокотемпературное сжигание большинства примесей приводит к выделению относительно безвредных продуктов разложения, за исключением примесей, содержащих в составе хлор и некоторые другие соединения. Именно продукты сгорания или высокотемпературного разложения сложных органических веществ часто представляют серьезную опасность. Сталеплавильные цеха с ЭДП являются значительными источниками органических загрязнителей, таких, как полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), полихлорированные бифенилы (ПХБ), полихлорированные дибензо-п-диоксины (ПХДД) и полихлорированные дибензофураны (ПХДФ) и летучие органические соединения (ЛОС).

Эквивалент токсичности (ЭТ или TEQ) смеси различных загрязнителей определяется суммой концентраций отдельных составляющих (C), умноженных на их относительную токсичность (TEF). За единицу принята относительная токсичность 2,3,7,8-тетрахлородибензо-п-диоксина, сокращенно 2,3,7,8- $TCDD$ ($C_{12}H_4Cl_4O_2$) с температурой плавления 320–325 °С, который разлагается при температурах выше 750 °С.

Диоксины обладают мощным мутагенным, иммуноподавляющим, канцерогенным и другими действиями. Кроме того, они слабо расщепляются как в организме человека, так и в природной среде.

Учитывая перспективы строительства в условиях ОАО «БМЗ» электросталеплавильной печи с шахтным подогревом лома, особую актуальность приобретает анализ экологических рисков, связанных с возможностью образования из галогенсодержащих полимеров, которые могут содержаться в металлоломе, диоксинов и фуранов.

Для того чтобы оценить характер возможного выделения данных веществ, выполним некоторые предварительные расчеты. Воспользуемся рекомендациями относительно массовой скорости выгорания твердых горючих материалов, применяемых в пожарно-технических расчетах при оценке продолжительности пожара. Скорость выгорания большинства твердых горючих материалов примерно в 2–3 раза ниже, чем у жидкостей, и составляет, например для синтетического каучука 0,72 кг/(м²·мин), а для органического стекла и полистирола – 1,14 кг/(м²·мин) [3].

Используя приведенные данные, были рассчитаны времена выгорания твердых горючих примесей в количестве 1% от общей массы металлошихты для условий нагрева с различными размерами кусков и, следовательно, разной удельной поверхностью. Время выгорания примесей составило от 0,2 до 3,5 мин. Однако следует учитывать, что при нахождении указанных веществ в металлозавалке скорость выгорания примесей будет сильно зависеть от условий прогрева металла, т. е. от их местонахождения в шахте.

На рис. 1 приведены результаты расчета нагрева кусков малого и крупного сечения (в качестве малого сечения принята пластина толщиной 5 мм, а крупного сечения пластина толщиной 100 мм) при их обтекании потоком газа с температурой 1000 °С.

Как следует из рисунка, горению примесей может предшествовать инерционный период, характеризующийся высокой интенсивностью теплоотвода к нагреваемому металлу, на продолжительность которого непосредственное влияние оказывают температура и скорость греющей среды, а также размеры кусков металлошихты.

Результаты проведенных расчетов свидетельствуют о том, что при предварительном подогреве лома, загрязненного различными примесями, завершенность процесса их выгорания будет зависеть от массивности кусков лома, температуры газов, способа укладки лома и времени нагрева, зависящего от того, до какой средней температуры необходимо подогреть металлошихту перед завалкой в печь.

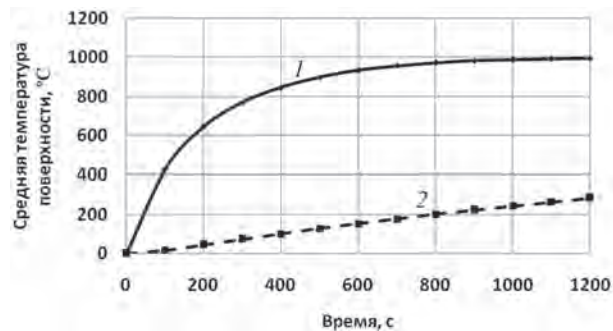


Рис. 1. Изменение температуры поверхности кусков металлолома при его нагреве газами с постоянной температурой 1000 °С: 1 – малое сечение; 2 – крупное сечение

Для исключения попадания вредных веществ в окружающую среду необходимо дожигание летучих органических соединений (ЛОС) до полного выгорания примесей. Эксперименты по моделированию дожигания летучих органических соединений из лома при предварительном нагреве показали, что ЛОС полностью окисляются, когда содержание кислорода в отходящем газе составляет по меньшей мере 4 %, температура газа выше 700 °С, а среднее время пребывания газов в установке дожигания больше, чем 0,3 с [4]. Эти условия должны быть выполнены для

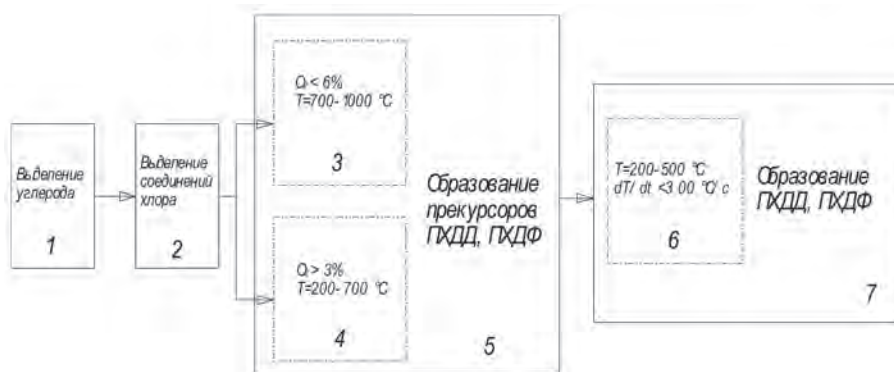


Рис. 2. Схема образования ПХДД и ПХДФ: 1 – формирование реакционного углерода; 2 – формирование реакционного хлора; 3, 4 – условия формирования прекурсоров ПХДД и ПХДФ; 5 – формирование прекурсоров ПХДД и ПХДФ; 6, 7 – условия и этап формирования ПХДД и ПХДФ

любой промышленной установки дожигания. Дожигание ЛОС в обычных установках предварительного нагрева лома происходит в отдельной камере сгорания.

Следует отметить, что, помимо системы шахтного подогрева, источниками выбросов диоксинов и фуранов служат также ДСП. Выбросы значительны в течение фазы начала плавления лома, когда температура еще низкая. Диоксины и фураны повторно образуются также при низких температурах (250–500 °C) из хлорорганических соединений с помощью вторичного синтеза, катализатором которого являются некоторые металлы. Имеющиеся данные указывают, что профиль распределения температур более важен, чем средняя температура при определении концентрации диоксинов и фуранов в отходящих газах [5]. В отличие от многих других вредных соединений для минимизации выбросов в окружающую среду диоксинов и фуранов дожигание ЛОС не является достаточным.

Разделяют три механизма формирования диоксинов и фуранов [4]: микрозагрязнители формируются путем прямого синтеза из конкретных реагентов (хлорбензол или полихлорированный бифенил), присутствующих в загруженных материалах; в результате термической деградации или трансформации органических веществ в ароматических соединениях с двумя кольцами при высокой температуре (600–850 °C); новосинтезом из прекурсоров при более низкой температуре (200–500 °C).

Процесс новосинтеза включает в себя первоначально частичную газификацию органических соединений и взаимодействие между кислородом и углеродом, после чего происходит формирование прекурсоров (предшественников) ПХДД/Ф и, наконец, при взаимодействии с хлором – синтез ПХДД и ПХДФ (диапазон температур 200–500 °C). Общая схема образования ПХДД и ПХДФ показана на рис. 2.

Как следует из рисунка, для минимизации выбросов в окружающую среду ПХДД и ПХДФ можно использовать различные способы:

- сократить количество исходных реагентов, например, при предварительной подготовке металлошхты с отделением хлорсодержащих материалов и органических веществ;
- обеспечить отсутствие необходимых условий для образования прекурсоров ПХДД и ПХДФ;
- обеспечить отсутствие необходимых условий для образования ПХДД и ПХДФ из их прекурсоров;
- поглотить ПХДД и ПХДФ при помощи адсорбентов и очистить газы от частиц загрязненного адсорбента до их попадания в атмосферу.

Анализ технологий, применяемых в мире, показал, что для сокращения вредных выбросов могут применяться как отдельные способы из числа перечисленных, так и комплексные варианты.

Недостатком наиболее распространенного способа, включающего дожигание загрязненных газов с последующим быстрым охлаждением продуктов сгорания газов, является снижение эффективности классических систем теплоутилизации, применяемых в электросталеплавильном производстве. В связи с этим большое значение приобретают технологии подготовки металлошхты к плавке, которые обеспечивают удаление источников образования вредных выбросов.

Основные технологические решения для снижения выбросов вредных веществ при предварительном нагреве металлошхты

В настоящее время существуют два основных способа нагрева металлошхты: предварительный нагрев металлошхты в корзинах (бадьях) и интегрированный нагрев в совмещенных с печью камерах.

Причем способ нагрева в бадьях как удаляемыми из электродуговых печей газами, так и продуктами сгорания природного газа, сжигаемого в самих установках, не получил широкого распространения. Связано это с относительно невысоким температурным уровнем подогрева по причине ограниченной стойкости самих корзин и с экологическими проблемами, возникающими при реализации данного процесса. Особенно это касается выделения вредных веществ в атмосферу цеха при перемещении корзин с подогретым ломом и загрузке металлошихты в ЭДП в случае неполного выгорания примесей.

Второй способ предусматривает нагрев металлошихты либо непрерывным процессом, как в процессе Consteel, либо порционным нагревом в установках шахтного типа.

В агрегатах шахтного типа камера подогрева отделена от ванны специальными устройствами: толкателями или удерживающими пальцами, которые позволяют проходить печным газам и обеспечивают подачу шихты в зону плавления в нужное время. Дуговые печи, работающие с подогревом лома, характеризуются меньшим выделением пыли с технологическими газами, что связано в основном с фильтрующим действием подогреваемого лома.

В печах с предварительным подогревом используют две схемы удаления печных газов: по первой схеме дымовые газы отводятся непосредственно на газоочистку (система без рециркуляции газов); по второй схеме газы возвращаются в камеру дожигания (система с рециркуляцией газов).

Наряду с некоторыми преимуществами системы без рециркуляции газов имеют принципиальный недостаток, который выражается в применении только чистого лома, не содержащего масел, пластмасс и других веществ. В противном случае печные газы загрязняют атмосферу цеха и могут создать взрывоопасную ситуацию, поступая в газоотводящий тракт.

В соответствии со Стокгольмской конвенцией о стойких органических загрязнителях, ратифицированной РБ 27 июня 2011 года, законодательство об охране окружающей среды стран Европы и СНГ требует ограничивать концентрацию диоксинов и фуранов на выходе из источника выбросов и применять для этого наилучшие имеющиеся методы. Это ограничивает применение средств теплоутилизации удаляемых из печей газов и, в частности, установок подогрева металлошихты, используемых без специальных средств снижения токсичности.

В ТКП 17.08-13-2011 приведены данные об удельных показателях выбросов при выплавке стали в электродуговых печах [6]. Например, без предварительной подготовки лома и низком или среднем уровне очистки отходящих газов (в скруббере) удельные выбросы диоксинов/фуранов составляют 10 мкг ЭТ/т стали, а с предварительной подготовкой лома либо использованием чистого железа или с использованием специальных мер по снижению выбросов диоксинов/фуранов – 0,2 мкг ЭТ/т стали.

Для очистки газов от диоксинов и фуранов применяют дорогостоящее оборудование, обеспечивающее дожигание и очистку печного газа от пыли и аэрозолей, на которых адсорбируются диоксины, например, в скрубберах типа «Airfine» [7].

Следует отметить, что технология дожигания удаляемых из электродуговой печи газов с последующим быстрым охлаждением была многократно опробована в производственных условиях и доказала свою эффективность в борьбе с выбросами вредных веществ [8]. В качестве примеров применения данной технологии можно привести BSW (г. Кельн, Германия); Salzgitter AG (г. Пайне); В. Е. S. (г. Бранденбург, Германия); HSE Henningsdorfer Stahl Engineering GmbH (г. Хеннингсдорф, Германия); DEW (Германия); ArcelorMittal (г. Гамбург, Германия); Gerlafingen Stahl AG (Швейцария); ArcelorMittal (г. Диффранж, Люксембург).

Например, на заводе BSW до 1989 г. концентрация диоксинов составляла около 0,3 нг/м³, после внедрения быстрого охлаждения разбрызгиванием воды за печью снизилась до 0,07 нг/м³ (т. е. в 4 раза), а после внедрения двухступенчатой системы с высокотемпературным дожиганием газа и камерой быстрого охлаждения до 150–300 °С – до 0,03 нг/м³ (т. е. в 10 раз) [9].

Снижения выбросов диоксинов и других вредных соединений можно также добиться с помощью адсорбирующих материалов в сочетании с рукавными фильтрами. В качестве адсорбентов, как правило, используются активированный уголь, пылевидный активированный буроугольный кокс или их смеси с известью, которые подаются в газопровод перед системой газоочистки [8]. Данная технология позволяет также удалять существенное количество тяжелых металлов и некоторое количество ртути из газовой фазы. Такая технология была внедрена с 1997 г. Arcelor Mittal на трех заводах в Люксембурге, Swiss Steel на заводах Швейцарии и Германии, ряд других компаний используют эту технологию в Германии и Бельгии.

Вдувание адсорбента в отходящие печные газы – один из самых дорогих способов очистки, однако в сочетании с другими способами обеспечивает снижение содержания диоксинов до уровня менее 0,1 нг/м³.

В настоящее время шахтные электродуговые печи часто оснащают устройствами для борьбы с выбросами диоксинов. Например, для одновременного решения двух задач, а именно снижения себестоимости и защиты окружающей среды, компания JP STEEL PLANTECH Co. разработала электродуговую печь нового поколения ECOARC™ [10]. Преимущества печи ECOARC в сравнении с традиционными конструкциями электродуговых печей: низкое потребление энергии (200 кВт·ч/т при использовании 40 нм³/т кислорода); низкий расход материала электродов (0,8–1,0 кг/т); низкий уровень выбросов диоксинов, низкий уровень запыления; низкий уровень импульсных помех и гармоник в электросети и др. Объем отходящего газа в печи снижен благодаря полугерметичной конструкции печи и газоходов отходящих газов. В Японии установлены три установки начиная с 2000 г.: Kishiwada Steel, 70 т, 2001 г.; JFE Bars & Shapes / Himeji Works, 140 т, 2005 г.; JFE Bars & Shapes/ Sendai Works, 130 т, 2008 г. В 2010 г. запущена установка Dongkuk Steel/ Incheon Works, 120 т в Южной Кореи, в 2012 г. – UMC Metals, 70 т в Таиланде [10].

Выводы

1. Современные технологии переплава стального лома позволяют добиться существенной экономии энергоресурсов, что положительно отражается на суммарных объемах выбросов и сбросов, образующихся при производстве металлопродукции.
2. Наиболее рациональным с точки зрения энергоэффективности и экологической безопасности является вариант внедрения систем предварительного подогрева лома при обязательной организации его качественной подготовки к плавке, чтобы исключить вероятность попадания в шахту или печь галогенсодержащих материалов, которые могут привести к образованию диоксинов и фуранов.
3. Применение металлолома без предварительной подготовки требует дополнительных затрат на систему дожигания и быстрого охлаждения образующихся газообразных продуктов, что минимизирует концентрацию вредных веществ в выбросах, но ухудшает энергетические показатели процесса, так как не позволяет эффективно использовать классические системы теплоутилизации.

Литература

1. Се м и н, А. Е. Плавление лома и предъявляемые к нему требования / А. Е. Семин, В. Н. Супрун // Рынок вторичных металлов. 2007. № 2. С. 40–45.
2. Л о п у х о в, Г. А. Переработка электросталеплавильной пыли // Электromеталлургия. 2001. № 1. С. 47–48.
3. Г р и н и н, А. С. Экологическая безопасность: учеб. пособ. / А. С. Гринин, В. Н. Новиков. М.: Гранд, 2001. 296 с.
4. F i s h e r, R., B r i g g s A. M. W., B a k e r S. S. et al. Effects of operational factors on the formation of toxic organic micropollutants in EAF steelmaking // EUR 21432 – Steelmaking processes. Luxembourg. 2005. 154 p.
5. P r ü m, et al. Reducing dioxin emissions in electric steel mills // MPT international. 2005. Vol. 1. N 2005. P. 36–42.
6. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Правила расчета выбросов стойких органических загрязнителей ТКП 17.08-13-2011 (02120). Минск, 2011. 44 с.
7. Х о ф ш т а д л е р, К. Система «Эрфайн» для удаления диоксинов из отходящих газов аглопроизводства и электродуговых печей / К. Хофштадлер, В. Геберт, К. Ланцершторфер // Сталь. 2001. № 12. С. 81–84.
8. Л и с и е н к о В. Г., Щ е л о к о в Я. М., Л а д ы г и ч е в М. Г. Сооружение промышленных печей. Проектирование плавильных комплексов: Справ. изд. Кн. 2. Т. I. М.: Теплотехник, 2006. 755 с.
9. Е л а н с к и й Г. Н., М е д в е д е в М. Н. Диоксины – экологическая опасность // Сталь. 2000. № 2. С. 82–86
10. S u g a s a w a, T., K a t o H., S a t o Y. The most advanced power saving technology in EAF introduction to ECOARC™ // 5th EFRS IRON&STEEL SYMPOSIUM / UCTEA, 2014, 10 p.

References

1. S e m i n A. E., S u p r u n V. N. Plavlenie loma i pred'javljajemye k nemu trebovaniya [Melting scrap and requirements applied to him]. *Rynok vtorichnyh metallov = Secondary metals market*, 2007, no. 2, pp. 40–45.
2. L o p u h o v G. A. Pererabotka elektrostaleplavil'noj pyli [Recycling electric steel dust]. *Elektrometallurgiya = Electrometallurgy*. 2001, no. 1, pp. 47–48.
3. G r i n i n A. S., N o v i k o v V. N. *Ikologicheskaja bezopasnost'* [Environmental safety]. Moscow, Grand Publ., 2001. 296 p.
4. F i s h e r R., B r i g g s A. M. W., B a k e r S. S. et al. Effects of operational factors on the formation of toxic organic micropollutants in EAF steelmaking. EUR 21432 – Steelmaking processes. Luxembourg, 2005. 154 p.
5. P r ü m, et al. Reducing dioxin emissions in electric steel mills. MPT international, 2005. Vol. 1, no. 2005, pp. 36–42.
6. *Ohrana okruzhajushhej sredy i prirodopol'zovanie. Atmosfera. Vybrosy zagryaznjajushhih veshhestv v atmosfernyj vozduh. Pravila rascheta vybrosov stojkih organicheskikh zagryaznitelej* [Protection of the environment and nature. Atmosphere Emissions of pollutants into the air. TAP 17.08-13-2011 (02120). Minsk, 2011. 44 p.
7. H o f s h t a d l e r K., G e b e r t B., L a n t s e r s h t o r f e r K. Sistema «Jerfajn» dlja udaleniya dioksina iz othodjashhih gazov agloproizvodstva i jelektrodugovyh pechej [The system «Erfayn» to remove dioxins from flue gases sinter plant and electric arc furnaces]. *Stal' = Steel*, 2001, no. 12, pp. 81–84.

8. Lisenko V. G., Schelokov Ya. M., Ladygichev M. G. *Sooruzhenie promyshlennyh pechej. Proektirovanie plavil'nyh kompleksov: Spravochnoe izdanie. Kniga 2, tom I* [The construction of industrial furnaces. Design melting complexes: Book 2, Volume I]. Moscow, Teplotekhnika Publ., 2006, 755 p.

9. Elansky G. N., Medvedev M. N. Dioksiny – jekologicheskaja opasnost' [Dioxins – ecological danger]. *Stal'* = *Steel*, 2000, no. 2, pp. 82–86.

10. Sugawara T., Kato H., Sato Y. The most advanced power saving technology in EAF introduction to ECOARC™ // 5th EFRS IRON&STEEL SYMPOSIUM. UCTEA, 2014, 10 p.

Сведения об авторе

Кабешов Сергей Михайлович, Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь. E-mail: boxsmk@gmail.com. Тел. моб.: +375 29 768 17 78.

Information about the authors

Kabishov Sergey, Belarusian National Technical University, 65, Nezavisimosti ave., Minsk, 200013, Belarus.

E-mail: boxsmk@gmail.com. Tel.: +375 29 768 17 78.



УДК 669.017:539.37

Поступила 19.10.2015

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛОМОВ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА В ЛИТОМ И ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

COMPARATIVE RESEARCHES OF FRACTURES OF HIGH-STRENGTH CAST IRON IN THE AS-CAST AND DEFORMED STATE

*А. И. ПОКРОВСКИЙ, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь,
И. Н. ХРОЛЬ, Министерство промышленности Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь*

*A. I. POKROVSKY, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
I. N. KHROL, Ministry of the Industry of Republic of Belarus, Minsk, Belarus*

Представлены результаты сравнительных исследований фрактограмм высокопрочного чугуна в литом состоянии и после горячей пластической деформации. Показан характер изменения формы и морфологии включений графита, а также структуры металлической матрицы по мере увеличения степени деформации от 0 (литое состояние) до 80%. При помощи метода электрохимического вытравливания с растворением металлической матрицы и постепенным обнажением поверхности включений графита впервые наглядно продемонстрирована их аксонометрия. Доказано, что при горячей деформации чугуна происходит пластическое течение включений графита. Показано, что во включении графита существуют различные зоны деформации, распределенные неравномерно: в большей мере деформируются краевые зоны, а в центральной части может сохраняться присущая исходному сферическому включению радиальная структура. Факт того, что большая часть включений графита в изломе деформированного высокопрочного чугуна оказалась неповрежденной (обнаружено весьма малое количество разрушенных включений) может изменить сложившееся мнение о роли графита как о месте зарождения трещины. Высказано предположение, что трещина зарождается в металлической матрице (вероятно, на границе между перлитом и ферритом) и распространяется от включения к включению графита, огибая, но не повреждая их.

The results of comparative studies of fracture surfaces of high-strength cast iron in the as-cast state and after hot direct extrusion through an aperture of a conical die are presented.

The shape change of graphite inclusions and components of the metal matrix is examined with increasing the reduction ratio from 0 (as-cast state) to 80%.

For the first time, using the electrochemical etching of the metal matrix of the cast iron, it is demonstrated experimentally that at plastic deformation the ductile flow of graphite inclusions occurs without fracturing of the latter. The surface morphology of a deformed graphite inclusion is revealed. It is shown that inside the inclusion the strain is distributed non-uniformly: the peripheral zones are deformed to a larger extent while the central part may retain its original radial structure.

The fact that the most part of graphite inclusions on the fracture surface of the deformed cast iron appeared undamaged (very small amount of fractured inclusions was observed) testifies against the common opinion that graphite acts as a crack nucleation site. A hypothesis is put forward that the crack nucleates in the metal matrix, presumably at the pearlite/ferrite interface, and propagates from one graphite inclusion to another rounding but not damaging the latter.

Ключевые слова. Горячая пластическая деформация, высокопрочный чугун, структура, металлическая матрица, включения графита.

Keywords. Hot plastic deformation, high-strength cast iron, structure, metal matrix, graphite inclusions.

Введение

Одним из широко распространенных методов исследования структуры металла является металлографический, основанный на изучении микроструктуры при химическом травлении плоской полированной поверхности шлифа. Применительно к исследованию чугунов ему посвящено множество публикаций, начиная от основополагающей монографии [1], ряда известных справочников [2, 3], а также действующего ГОСТ [4].

Следует отметить, что одна из специфических особенностей микроструктуры чугунов – ярко выраженная гетерогенность, обусловленная наличием в металлической матрице включений графита различной степени разветвленности, а также ледебуритной эвтектики с цементитным скелетом сложной конструкции и аустенитными зернами. Поэтому металлографические исследования произвольных сечений на плоских образцах не всегда достаточно информативны, не позволяют объективно оценить пространственное расположение включений в структуре чугуна, провести их стереологический анализ, оценить их объемный вид. Для уточнения результатов металлографического анализа иногда используют сложный и непроизводительный метод многократной переполировки шлифа и исследование одного и того же участка структуры под микроскопом. С его помощью удастся доказать, например, что кажущиеся изолированными многие мелкие включения графита являются на самом деле сечением одной разветвленной графитной колонии.

Между тем, новые процессы обработки чугунов продолжают развиваться, что приводит к дальнейшему усложнению микроструктур. Например, в последние десятилетия разработаны технологические процессы обработки чугунов давлением при высоких температурах. Исследованию влияния воздействия горячей пластической деформации на чугуны посвящен ряд работ, например, в [5] описаны технологические аспекты процесса, в [6, 7] – особенности структурообразования деформированного чугуна. Показано, что с помощью обработки давлением можно не только придать изделию из чугуна точную форму и устранить ряд литейных дефектов, но и получать такую микроструктуру, которая обеспечивает существенное улучшение механических, триботехнических и эксплуатационных характеристик по сравнению с литым состоянием, например, возможно существенное снижение уровня шума при работе деталей [8]. Следует отметить, что при изучении микроструктуры чугунов, подвергнутых деформированию (когда структура претерпевает очень сильные изменения, а включения дробятся, вытягиваются, переплетаются), недостатки и малоинформативность классической металлографии проявляются еще в большей мере.

Определенную помощь в прогнозировании структурообразования деформированного чугуна могут оказать методы компьютерного моделирования. Например, моделирование напряженно-деформированного состояния высокопрочного чугуна при горячем выдавливании позволяет спрогнозировать форму и расположение включений и высказать предположение, что включения цементита и графита испытывают пластическое течение [9, 10].

Наиболее же информативным методом исследования структуры является сканирующая электронная микроскопия. Обладая в отличие от оптической металлографии большей разрешающей способностью и глубиной резкости, она позволяет проследить в объемном виде видоизменение формы и морфологии включений, металлической матрицы, характера разрушения поверхности. Что касается литого высокопрочного чугуна, то описания его фрактограмм известны [11–13]. Исследованию же изломов деформированного чугуна уделено недостаточное внимание.

Цель работы – исследование микроструктур и фрактограмм высокопрочного чугуна после горячей пластической деформации и сравнение их с исходными (литыми) образцами. Были поставлены следующие задачи исследования:

1. Провести сравнение характера излома металлической матрицы в литом и деформированном чугуне.
2. Получить максимально наглядные изображения формы и морфологии включений графита после деформации, выяснить, как они видоизменяются по мере увеличения степени деформации.
3. Определить место возникновения трещины при разрушении литого и деформированного чугуна, как она распространяется, какие структурные составляющие отвечают за ее распространение, а какие ее тормозят.
4. Однозначно ответить на вопрос: что происходит с включением графита при деформации. Оно дробится и разрушается на фрагменты и осколки, превращается в порошкообразную субстанцию, «размазывается» по микропорам, или пластически деформируется? Предварительно отметим, что до сегодняшнего дня существует мнение, что хрупкие графитные включения при деформации должны разрушаться так же, как разрушается под нагрузкой, например, графит в грифеле карандаша, превращаясь в раздробленную порошкообразную субстанцию.

Материал и методика исследования

Исследовали высокопрочный чугун марки ВЧ50 (ГОСТ 7293-85) следующего химического состава: С – 3,2–3,6 мас.%; Si – 1,7–2,1; Mn – 0,5–0,7; Ni – 0,4–0,6, Mg – 0,04–0,06, P – до 0,08, S – до 0,01 мас.%.

Плавку чугуна проводили в индукционной высокочастотной печи марки ИСТ-016 емкостью 150 кг с кислой футеровкой по известной технологии. В качестве шихтовых материалов использовали чушковый чугун, стальной лом и ферросплавы. Для получения шаровидной формы графита жидкий металл модифицировали в ковше лигатурой ФСМg7K03, для вторичного модифицирования использовали ферросилиций марки ФС75. Разливку осуществляли в вертикальные песчано-глинистые формы. Отливки представляли собой прутки диаметром 35 мм и длиной 150 мм.

Для деформирования использовали схему неравномерного всестороннего сжатия, которую реализовали в технологическом процессе прямого горячего выдавливания через круглое отверстие конической матрицы, получая на выходе деформированные прутки. Выдавливание проводили на серийном кривошипно-шатунном прессе марки K2130 усилием 100 т в специальной подогреваемой до 400 °С штамповой оснастке. Скорость движения пуансона составляла около 1 м/с. Относительную степень деформации (отношение разности площадей начального и конечного сечения заготовки к исходной площади) варьировали от 20 до 80% путем увеличения диаметра исходной заготовки при том условии, что получаемые деформированные прутки имели одинаковый диаметр – 12,5 мм. Условия всестороннего неравномерного сжатия обеспечивались использованием противодавления: на выходе прутка из штамповой оснастки устанавливали пневмоцилиндр со сжатым воздухом, давление которого подбиралось экспериментально для каждой степени деформации так, чтобы получать качественное изделие без трещин.

Применяли индукционный нагрев заготовок под деформацию, общее время которого не превышало 50–90 с. Температура деформации находилась в интервале 900–1000 °С, контролировали ее оптическим пирометром, охлаждение полученных прутков проводили как на спокойном воздухе, так и с обдувом воздухом.

Приготовление шлифов и металлографические исследования выполняли по известным методикам [3]. В качестве химического травителя использовали состав так называемого «ниталья» – 3%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

Фрактограммы исследовали на сканирующем электронном микроскопе SEM 515 производства фирмы «Phillips». Сравнивали поверхности изломов литых и деформированных образцов высокопрочного чугуна после стандартных испытаний на растяжение и ударную вязкость. Как известно, при деформации выдавливанием структура приобретает текстурированность вдоль направления вытяжки. Поэтому исследовали образцы, вырезанные как вдоль, так и поперек направления выдавливания. Схема вырезки образцов из деформированного чугунного прутка показана на рис. 1 (чтобы наглядно показать, как в образце расположены вытянутые включения графита, они условно изображены в виде эллипсов темного цвета).

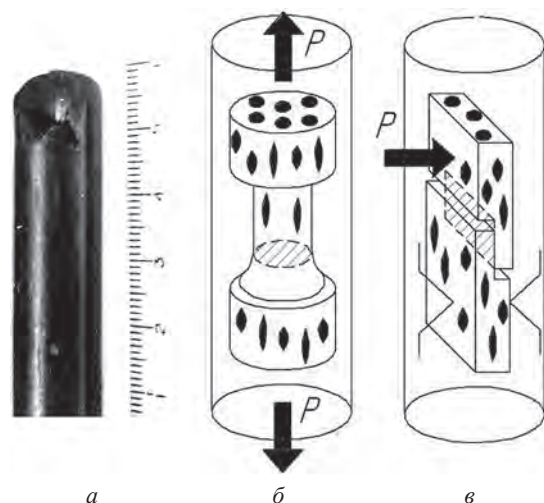


Рис. 1. Внешний вид чугунного прутка, полученного горячим выдавливанием (а) и схемы вырезки из него образцов для испытания на растяжение – для исследования изломов в поперечном сечении (б) и образцов для испытания на ударную вязкость – для исследования изломов в продольном сечении (в). На каждом из образцов схематично показаны расположение вытянутых графитных включений (в виде темных эллипсоидов) и плоскость разрушения (заштрихована)

разце расположены вытянутые включения графита, они условно изображены в виде эллипсов темного цвета).

Терминологию в обозначении изломов образцов поясним исходя из рис. 1. «Поперечным сечением» называли сечение образца, располагающееся в плоскости, перпендикулярной направлению вытяжки (на рис. 1, б сечение заштриховано). «Продольным» называли сечение, располагающееся в плоскости, параллельной направлению вытяжки (на рис. 1, в сечение заштриховано).

Особенности образцов для испытаний на ударную вязкость. Из-за того, что деформированные прутки имели небольшой диаметр (12,5 мм), «вписать» в него стандартный образец на ударную вязкость можно было только таким образом, что плоскость излома располагалась бы тоже поперек направления вытяжки. Чтобы получить расположение излома вдоль направления вытяжки, использовали специальный образец с двумя надрезами (рис. 1, в). Нижняя сторона образца жестко фиксировалась в зажиме копра (на рис. 1, а зажим схематично обозначен в виде двух треугольников), а оба надреза оставались при этом свободными. При ударе молота о свободный край зафиксированного образца (место удара на рис. 1, в указано стрелкой с буквой «Р») формировалась поверхность излома, совпадающая с направлением течения металла.

Исследовали два типа поверхностей излома:

1. Излом после разрушения без какой-либо дополнительной обработки поверхности в состоянии «как есть». Следует уточнить, что предварительные исследования выявили определенные недостатки этого метода, связанные с тем, что в ходе разрушения образца часть включений графита из места излома теряется (выпадает, выкрашивается, обламывается). На поверхности сохраняются лишь следы нахождения включений в виде лунок и кратеров. В случае исследования деформированных образцов прямое наблюдение изломов оказалось еще менее информативным. Дело в том, что под воздействием обработки давлением шаровидные включения графита значительно вытягиваются, приобретая эллипсообразную или волокнообразную форму, их поверхность можно рассмотреть лишь частично, большая ее часть скрыта в толще металлической матрицы, что не позволяет объективно оценить морфологию.

2. Поверхности изломов после дополнительного травления. Поскольку особый интерес для нас представляли внешний вид и морфология включений графита после деформации, то поверхности исследовали также после дополнительного электрохимического травления. Основная часть методики электрохимического травления известна [3]. Но в данной работе для более эффективного выявления включений дополнительно использовали специально для этого разработанные оригинальные устройства [14, 15]. В качестве электролита применяли раствор, состоящий из смеси 0,5%-ной соляной и 3%-ной лимонной кислот в воде. Процесс травления происходил следующим образом: при приложении к исследуемому образцу положительного заряда металлическая матрица чугуна растворялась, а графитные включения постепенно «обнажались», причем в неповрежденном виде.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микроструктурный анализ

На рис. 2 приведены микроструктуры высокопрочного чугуна в литом (рис. 2, а) и деформированном состоянии (рис. 2, б).

Микроструктура в обоих случаях состоит из перлитно-ферритной металлической матрицы и включений графита. В литом чугуне графит имеет форму, близкую к сферической (рис. 2, а), а после деформации превращается в вытянутую волокнообразную (рис. 2, б). В результате деформации, проводимой в аустенитном состоянии, а также последующего ускоренного охлаждения на воздухе количество перлита в структуре возрастает с 60 до 90% (рис. 2, б).

Приведенные микроструктуры подтверждают высказанный выше тезис о недостаточной информативности классической металлографии, так как морфологию и целостность графитных включений, подвергшихся деформации, трудно объективно оценить.

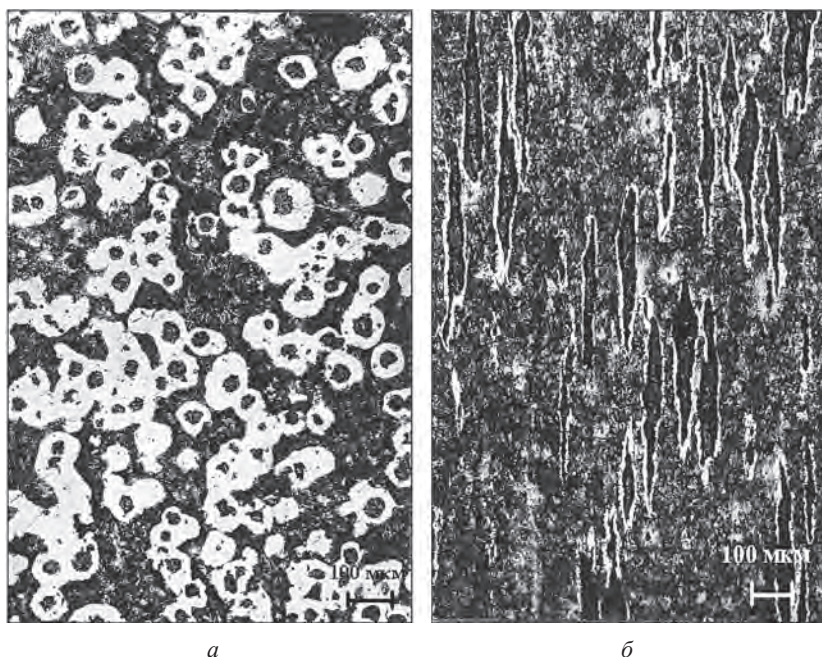


Рис. 2. Микроструктура высокопрочного чугуна в литом состоянии (а) и после горячего выдавливания со степенью деформации 80%, продольное сечение (б). Травлено ниталем. $\times 100$

Исследование фрактограмм чугуна в литом состоянии

Анализ изломов чугуна в литом состоянии (рис. 3) показывает, что поверхность неоднородна и носит рельефный характер. Можно отметить наличие весьма характерных, назовем их «листьеобразными», участков, напоминающих древесный лист с темными плоскими участками и веерообразно расходящимися по ним светлыми прожилками (рис. 3, *а*). С большой вероятностью можно утверждать, что контуры так называемых «листьев» являются границами бывшего аустенитного зерна, а их внутреннее содержимое представляет собой пластинчатый перлит. Часто встречающиеся на поверхности «листа» достаточно большие плоские участки, имеющие однородную фактуру, представляющие своего рода фасетки или террасы (рис. 3, *а*), вероятнее всего, участки хрупкого разрушения, распространяющегося по пластинам цементита перлита. Светлые линии, напоминающие «прожилки в листе», – места вязкого разрушения ферритной составляющей перлита.

В целом излом металлической матрицы литого чугуна можно охарактеризовать как смешанный. Под этим мы подразумеваем то, что он включает в себя как зоны хрупкого межзеренного излома с преимущественным разрушением по границам зерен (занимающие большую долю излома), так и с элементами пластической деформации ферритной составляющей (значительно меньшая доля в изломе).

Помимо металлической матрицы, состоящей из пластинчатого перлита, на поверхности излома присутствуют шаровидные включения графита темного цвета (рис. 3, *а, б*), выступающие над поверхностью излома на $1/3$ – $1/2$ своего диаметра. Отметим, что после разрушения включение графита либо сохраняется в металлической матрице, либо вырывается из нее, но при этом видимые следы разрушения самих включений графита отсутствуют. При увеличении 2000 можно наблюдать (рис. 3, *б*), что включение находится в окаймляющей его вязкой зоне, характеризующейся повышенной пластичностью, о чем свидетельствуют приподнятые и вытянутые края воронки. Очевидно, что это ферритная оторочка вокруг включения, носящая, согласно терминологии специалистов по чугунам, специфическое название «блуждающий глаз».

Судя по характеру излома, можно предположить, что развитие трещины могут тормозить два элемента структуры: участки ферритной составляющей в перлите и ферритные оторочки графита, так как на их пластическую деформацию затрачивается определенная часть энергии. В связи с этим ферритная оторочка вокруг включения графита является зоной, где трещина распространяется по вязкому типу, а скорость ее распространения замедляется.

Что касается места зарождения трещины, то можно предположить, что это перлит или межфазная граница между включением графита и металлической матрицей в той области, где графит расположен непосредственно в перлите, а не окаймлен ферритной оторочкой. Начавшись в одном из таких мест, трещина распространяется, вероятно, по границам бывших аустенитных зерен с формированием больших участков межкристаллитного излома протяженностью до 300–400 мкм. Отметим еще раз удивительную особенность излома, что включения графита при этом огибаются трещиной, но не повреждаются.

Поверхности излома литого чугуна после дополнительного электрохимического травления приведены на рис. 4. Из рисунка видно, что включение графита сохраняется неповрежденным и удерживается у своего основания небольшими остатками металлической матрицы (рис. 4, *а*), сферическая форма его хорошо просматривается. Морфология поверхности графита складывается из большого числа чешуек,

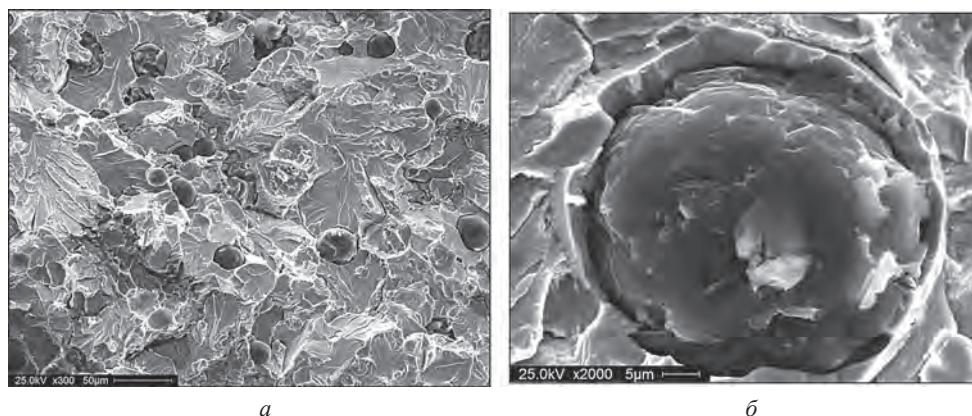


Рис. 3. Излом литого высокопрочного чугуна (в исходном недеформированном состоянии). Место исследования – «шейка» разрушенного образца после испытаний на растяжение: *а* – $\times 300$; *б* – $\times 2000$

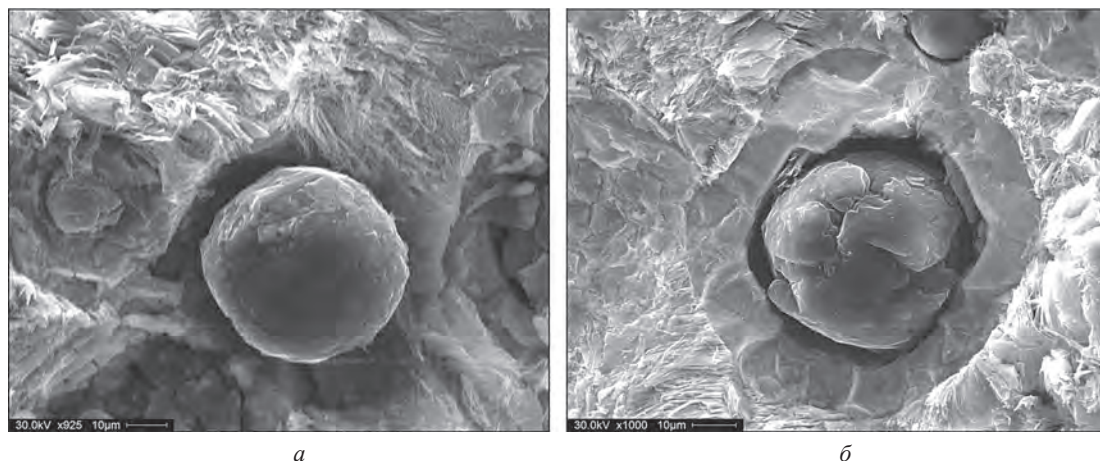


Рис. 4. Поверхность разрушения литого высокопрочного чугуна (в исходном состоянии, без деформации). Электрохимическое травление: *а* – $\times 925$; *б* – $\times 1000$

по форме, близких к сегментам полусфер разной величины, перекрывающих друг друга и напоминающих строение кочана капусты (рис. 4, *б*).

После электрохимического вытравливания (рис. 4) можно проанализировать и образовавшуюся характерную морфологию металлической матрицы – перлита. Она состоит из множества тонких пластин и игл. Такой характер поверхности объясняется тем, что в пластинчатом перлите ферритная составляющая растворяется гораздо интенсивнее, чем цементитный каркас. В случае, когда скол происходит поперек перлитной колонии, заметны своего рода террасы, состоящие из параллельно расположенных пластинок цементита (на рис. 4, *а* справа сверху).

Ферритная оторочка вокруг включения графита после электролитического травления (рис. 4, *б*) приобретает характерную рельефную поверхность. Менее сильно вытравливается сердцевина ферритного зерна, а границы зерен – больше и по ним образуются канавки травления. Это подтверждается при сопоставлении фрактограммы (рис. 4, *б*) с микрошлифом аналогичного участка (рис. 5); в обоих случаях заметны границы зерен, радиально отходящие от края графитного включения.

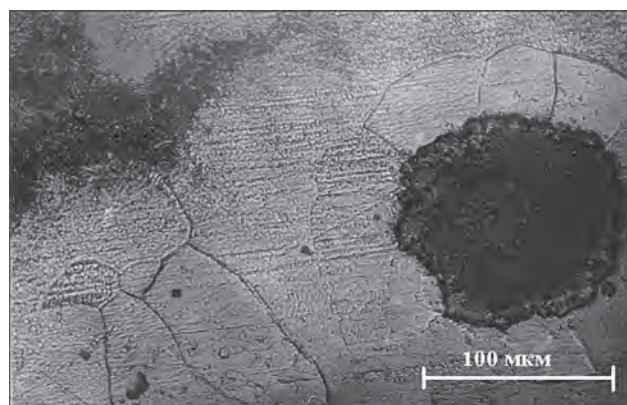


Рис. 5. Микроструктура высокопрочного чугуна в литом состоянии (без деформации). Травлено ниталем. $\times 100$

Исследование фрактограмм чугуна, деформированного со степенью 20%

При рассмотрении изломов деформированного чугуна следует учитывать, что на их микроструктуру оказывают влияние несколько факторов: наклеп и последующая рекристаллизация, а также распад аустенита при охлаждении поковки на воздухе. Следовательно, в структуре можно ожидать как изменения размеров аустенитных зерен, так и изменения соотношения в структуре количества перлита и феррита.

На рис. 6 приведены фрактограммы чугуна, деформированного со степенью 20% в поперечном и продольном сечениях.

Из рисунка видно, что включения графита либо сохраняются в металлической матрице, либо вырываются из нее (в верхней части рис 6, *б*), но не повреждаются. Следы пластической деформации выражаются в образовании кратеров и ямок различной величины, а также в формировании складок по краям кратеров.

При степени деформации 20% морфология поверхности графита на поперечных образцах отличается от литых образцов незначительно (сравним рис. 6, *а*, *в* с рис. 4, *а*). Некоторым отличием, пожалуй, является лишь то, что в литом чугуне чешуйки выглядят более гладкими, а у деформированного – на поверхности чешуек имеются большое число рисок и полосок, похожих на террасы.

Рассмотрение продольного сечения изломов (рис. 6, *б*, *г*) показывает, что включение графита при степени деформации 20% существенно не изменяет своей формы, сохраняясь шаровидным, зато за-

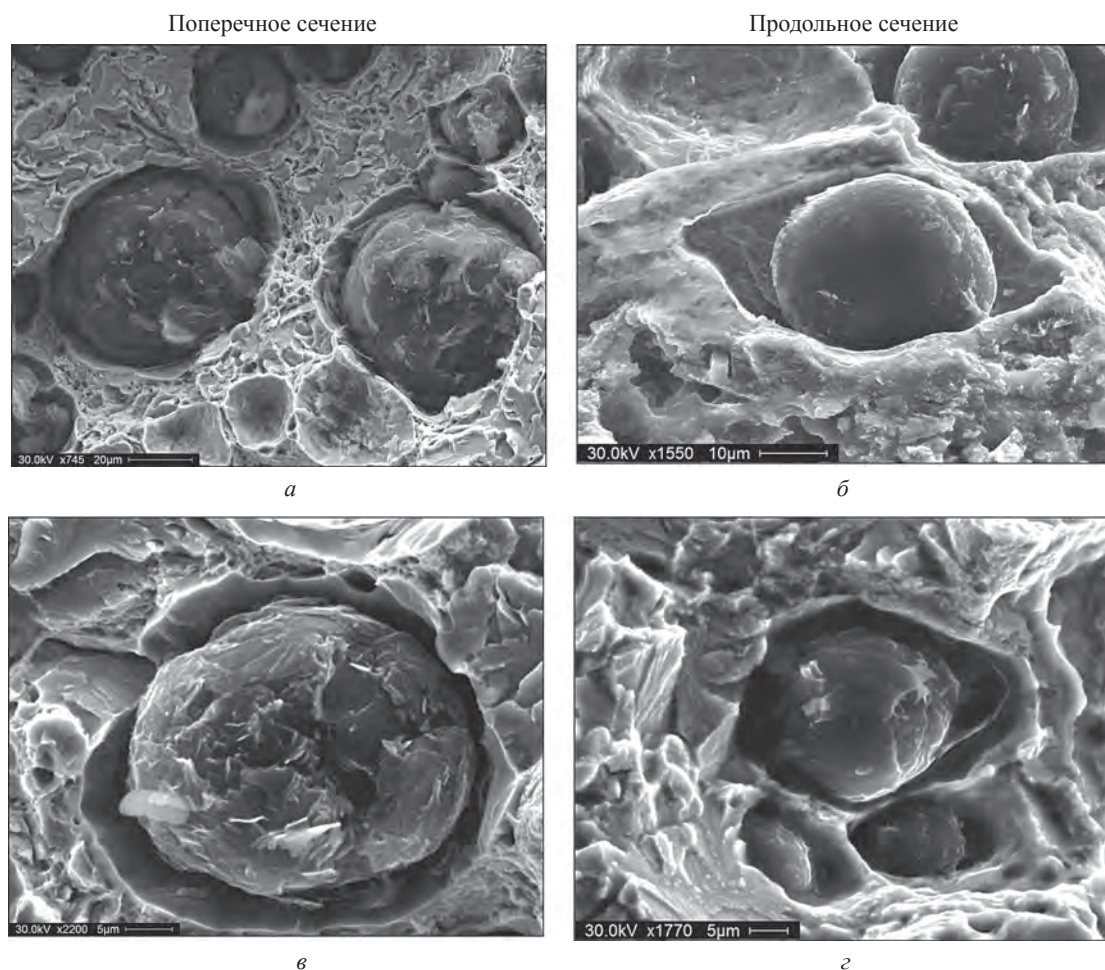


Рис. 6. Расположение включений графита на поверхности излома высокопрочного деформированного чугуна. Степень деформации 20%. *а, в* – поперечное сечение; *б, з* – продольное сечение. *а* – $\times 745$; *б* – $\times 1550$; *в* – $\times 2200$; *з* – $\times 1770$

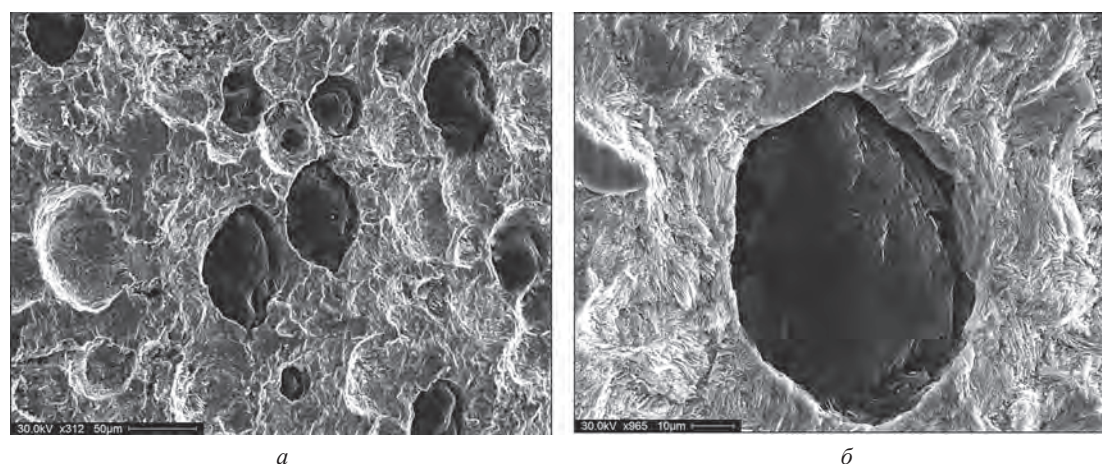


Рис. 7. Поверхность излома высокопрочного деформированного чугуна. Степень деформации 20%. Ускоренное охлаждение за счет обдува воздухом. Продольное сечение. Электрохимическое травление: *а* – $\times 312$; *б* – $\times 965$

метно деформируется окружающая его ферритная оторочка, приобретая характерную форму эллипса (рис. 6, *б, з*). Можно даже предположить образование пустот в вершинах ферритного «эллипса» в процессе деформации феррита.

Характер разрушения металлической матрицы у деформированных со степенью 20% образцов является смешанным хрупковязким и близок к литым образцам, однако доля вязкой составляющей становится несколько выше. Можно отметить следующую закономерность: чем больше доля перлита в структуре, тем больше доля хрупкой составляющей. Анализируя рис. 7, где представлен излом деформированного чугуна с той же степенью деформации (20%), но с ускоренным охлаждением за счет обдува возду-

хом, можно заключить, что количество перлита и соответственно доля хрупкой составляющей в изломе значительно увеличиваются. Вязкой составляющей является ферритная оболочка вокруг графита, образующая на поверхности сеть крупных ямок и кратеров, а основная часть структуры представляет собой фасетки скола, проходящие по границам бывших аустенитных зерен.

На рис. 7, б показано графитное включение, располагающееся в металлической матрице на 90% состоящей из пластинчатого перлита. Подавляющую часть металлической основы занимают тонкие параллельно расположенные пластинки цементита перлита, сохранившиеся не вытравленными, а само включение находится в обрамлении тончайшей пластичной ферритной оторочки (ее пластическая деформация хорошо заметна в верхней правой части кратера в виде своеобразного «обрыва», имеющего однородную светлую фактуру (рис. 7, б)).

Исследование фрактограмм чугуна, деформированного со степенью 60%

На рис. 8 представлены фрактограммы чугуна, деформированного со степенью 60%.

Анализируя фрактограммы чугуна, деформированного со степенью 60%, можно обратить внимание на то, что в поперечном сечении графитные включения выглядят шаровидными (рис. 8, а, в, д), зато в продольном сечении (рис. 8, б, г, е) приобретают гораздо более сложную вытянутую форму. Ее можно охарактеризовать терминами: «веретенообразная» (рис. 8, е) либо как «шаровидная с отходящими в направлении деформации коническими отростками, сужающимися к окончанию» (рис. 8, б). Кажущаяся на поперечных образцах шаровидной форма графита на самом деле представляет собой сохранившееся шаровидное ядро включения, от которого отломались вытянутые конические отростки – «усы». Эту версию подтверждает и рис. 8, г, где показано продольное расположение такого включения: его шаровидное ядро выкрошилось, заметна сферическая воронка от него, зато сохранилась вытянутая часть «усов» (располагается в правой части рис. 8, г горизонтально).

Границу отрыва «усов» от шаровидного «ядра» включения графита на поперечных образцах трудно четко идентифицировать из-за того, что «ядро» образовано из множества чешуек. Отрыв или если так можно выразиться «вылущивание» «усов» от «ядра» происходит по некой поверхности вдоль окружающих чешуек. Сохранившееся как составная часть вытянутого включения ядро внешне ничем не отличается от исходного шаровидного включения литого чугуна (но, разумеется, меньше его по диаметру). Иногда на ядре сохраняются обломки и остатки оторвавшихся «усов» (их можно наблюдать в центре рис. 8, а, в) в виде перпендикулярно и наклонно расположенных чешуек. В продольном сечении обломанные «усы» заметны гораздо нагляднее (например, в левой части рис. 8, б слева представлена воронка, справа – сохранившийся «ус»).

Что касается вопроса, является ли деформированное со степенью 60% включение графита целостным, а если разрушается, то каким образом и на какие фракции, можно сделать следующие заключения:

1. Дробления включений до уровня порошкообразной субстанции не происходит.
2. Включения графита испытывают пластическую деформацию. Однако деформация затрагивает не весь объем включения, а распределяется по его сечению, причем весьма неравномерно и специфически.
3. Деформации подвергаются лишь наружные слои включения. Они из-за своей слоистой структуры «сползают», если так можно выразиться, как чулок, вдоль чешуек центрального «ядра» и образуют вытянутые в направлении течения металла своеобразные отростки (выше мы уже предложили для их обозначения термин – «усы»).

4. Центральная часть графитного включения (так называемое «ядро»), по крайней мере, до степени деформации 60% сохраняется целостным и неповрежденным, имеет слоистое строение, характерное для литого чугуна, а также шаровидную форму, но меньшего диаметра, чем недеформированное включение.

5. Вопрос о том, являются ли вытянутые отростки («усы») графитного включения при деформации 60% монолитной субстанцией или состоят из раздробленных частей, пока для нас остается открытым. С одной стороны, на рис. 8, е включение выглядит монолитным, с другой – анализируя рис. 8, г, можно обратить внимание, что «усы» в правой части рисунка выглядят состоящими из нескольких раздробленных блоков.

В качестве отличия изломов чугуна, деформированного со степенью 60% от степени 20%, а также от литого состояния, можно отметить следующее:

1. Кардинально меняется характер разрушения графитных включений; если в литом и деформированном со степенью 20% образце включение не разрушалось, а сохранялось неповрежденным в одной

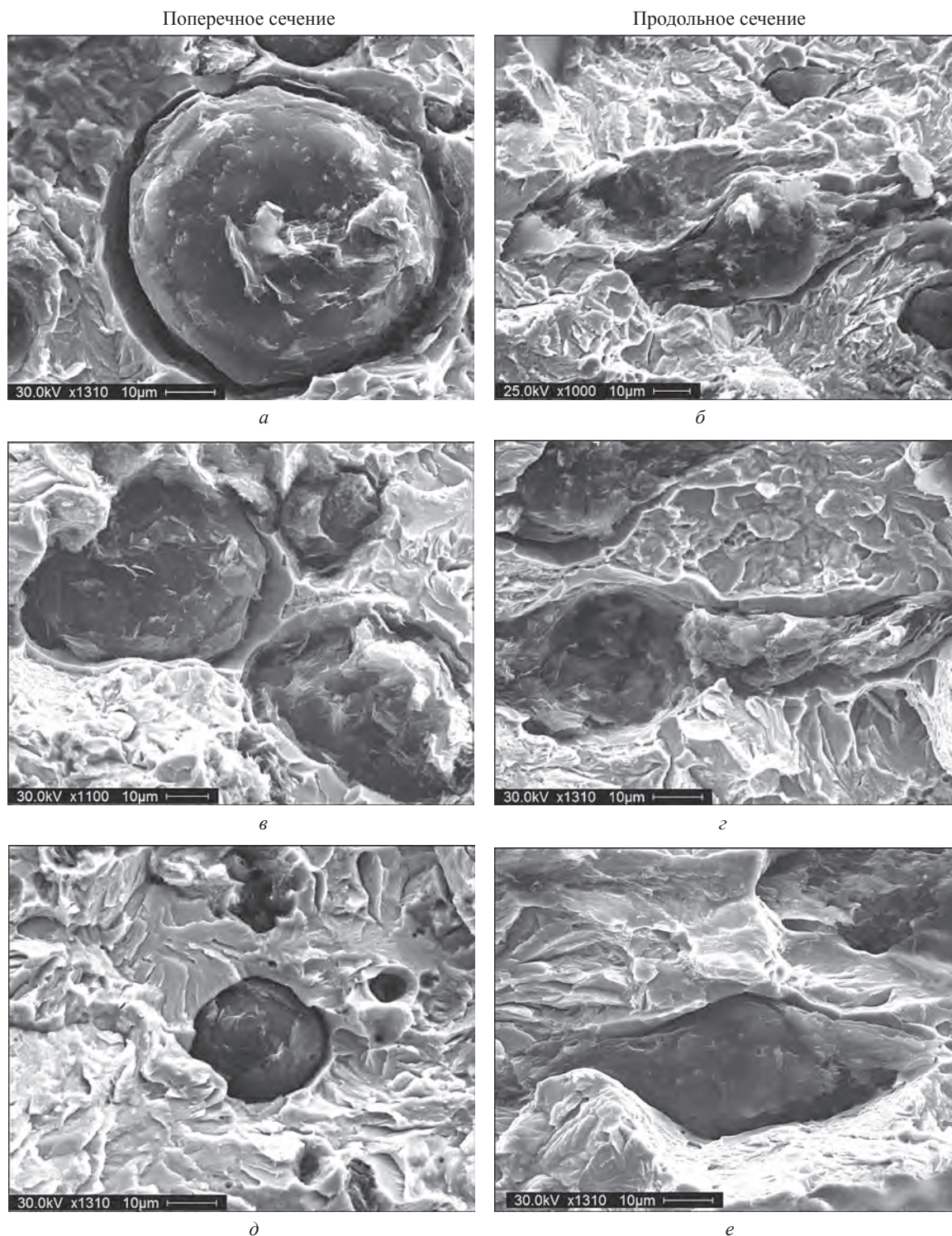


Рис. 8. Поверхность излома высокопрочного деформированного чугуна. Степень деформации 60%. *а, в, д* – поперечное сечение; *б, г, е* – продольное сечение. *а, г, д, е* – $\times 1310$; *б* – $\times 1000$; *в* – $\times 1100$

из половинок образца либо вырывалось неповрежденным из металлической матрицы, то при 60% «усы» могут отрываться от «ядра» (характерный пример такого отрыва приведен на рис. 8, *г*).

2. При степени деформации 60% кратеры и ямки на поверхности металлической матрицы имеют меньшие диаметры. Что касается типа металлической матрицы, то она сохраняется в основном перлитной. Присутствует лишь тонкая ферритная оторочка светлого цвета вокруг включения графита (рис. 8, *а, е*), которая носит вязкий характер разрушения. Излом же перлитной матрицы сохраняет хрупкий характер, разрушение проходит по колониям перлита, в частности вдоль пластин цементита (характерные веерообразные сколы можно наблюдать, например, на рис. 8, *д, е*), однако размеры фасеток при степени деформации 60% немного меньше, чем в литом состоянии.

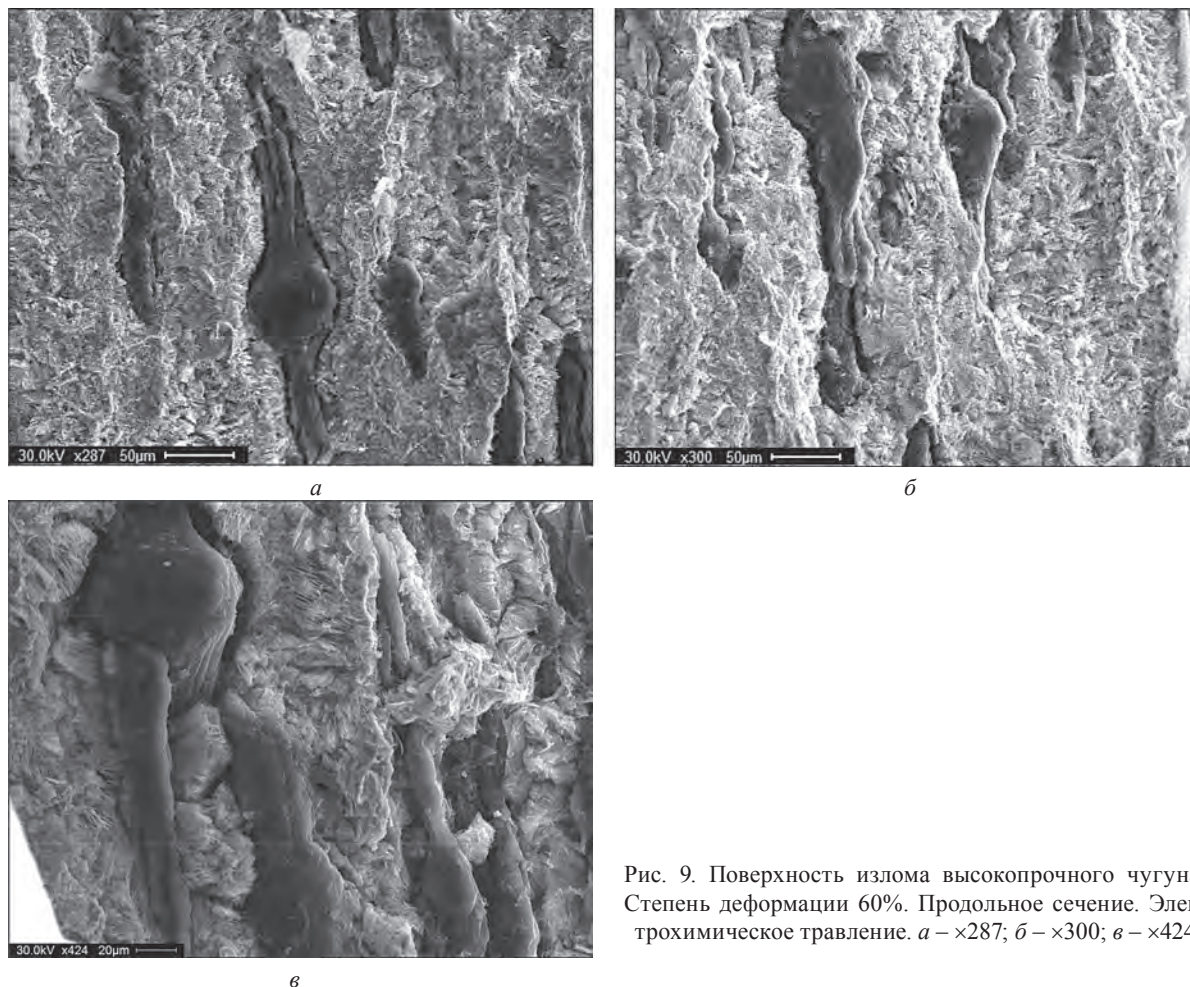


Рис. 9. Поверхность излома высокопрочного чугуна. Степень деформации 60%. Продольное сечение. Электрохимическое травление. *а* – $\times 287$; *б* – $\times 300$; *в* – $\times 424$

Использование электрохимического травления дает возможность более детально исследовать изменения, происходящие с графитным включением в высокопрочном чугуне, деформированном со степенью 60% (на рис. 9 для большей наглядности приведены изломы только продольных сечений).

На рис. 9 показано, что с помощью электрохимического вытравливания можно добиться вытравливания включений графита из металлической матрицы более чем на $2/3$ их абсолютных размеров. Причем полученный результат свидетельствует о том, что включения испытали пластическую деформацию, но при этом сохранили целостность (рис. 9, *а*, *б*). Заметны параллельно располагающиеся террасы (справа от основного сферического тела графитного ядра, рис. 9, *в*). Вероятно, это полосы скольжения и можно предположить, что пластическое течение графита происходит путем множественных сдвигов слоев оболочки с ядра.

Электрохимическое вытравливание позволило наглядно продемонстрировать, что вытягивание «усов» может происходить по двум, а иногда и по трем параллельным осям. При этом окончания «усов» могут разделяться на несколько волокон, раздваиваясь (на рис. 9, *б* показаны два отростка внизу включения), а иногда разделяясь даже на три «ответвления» (вверху рис. 9, *а* – три отростка вверху включения).

Таким образом, данные фотографии свидетельствуют в подавляющем большинстве случаев о пластической деформации хрупких включений графита с сохранением их целостности. Возможная линия разрыва между «ядром» и «усом» просматривается только на рис. 9, *в*.

Исследование фактограмм чугуна, деформированного со степенью 80%

У чугуна, деформированного со степенью 80%, поверхность разрушения металлической матрицы становится еще более однородной (рис. 10), что объясняется большим измельчением зерна по сравнению с предыдущими степенями деформации (20 и 60%), а также литым состоянием.

При степени деформации 80% преимущественно хрупкий характер излома металлической матрицы сохраняется, что обусловлено присутствием цементитной составляющей перлита. Можно отметить, что

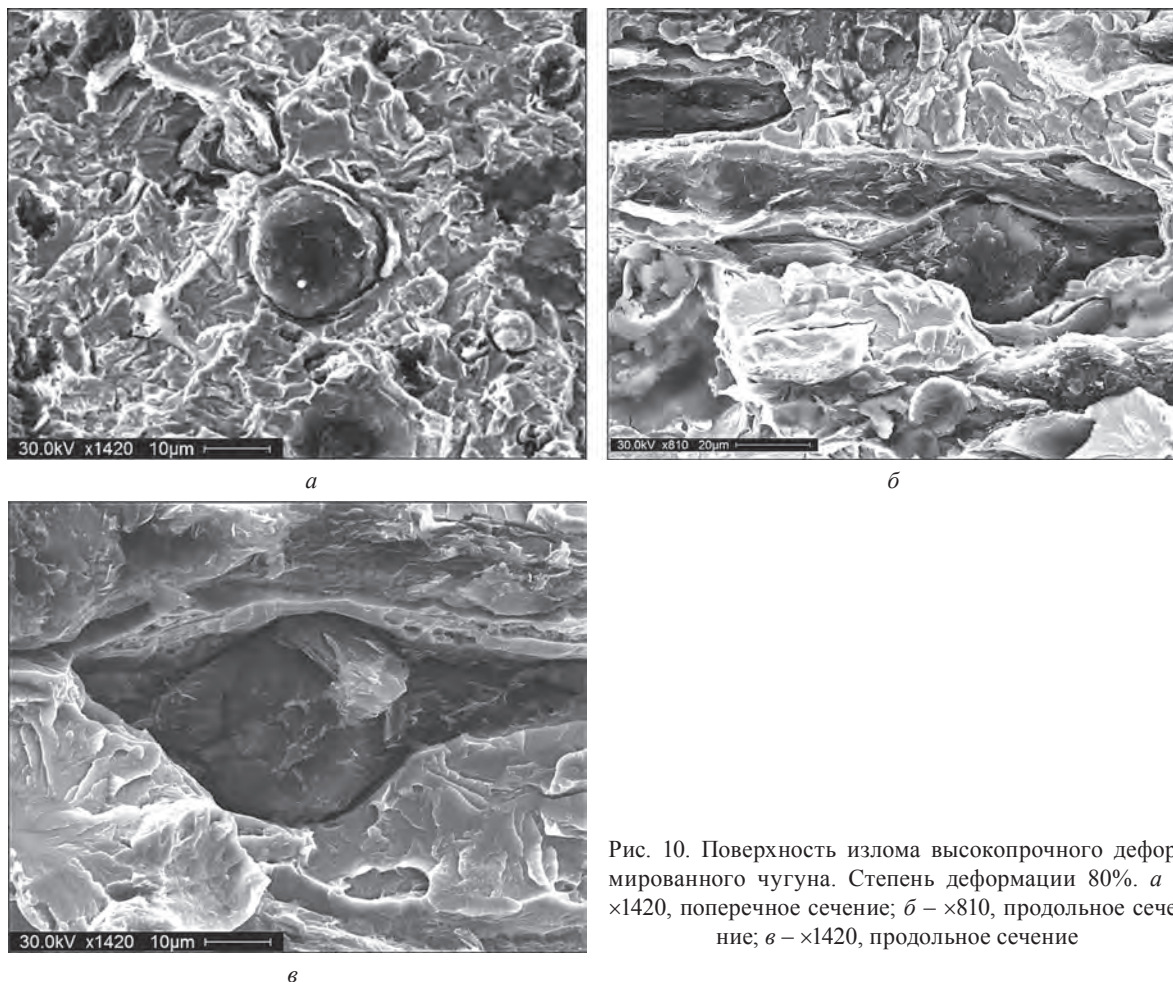


Рис. 10. Поверхность излома высокопрочного деформированного чугуна. Степень деформации 80%. *а* – $\times 1420$, поперечное сечение; *б* – $\times 810$, продольное сечение; *в* – $\times 1420$, продольное сечение

ферритная оторочка вокруг включений графита практически отсутствует. Включения графита имеют меньшие диаметры (в поперечном сечении) и большую степень вытянутости (в продольном сечении) по сравнению с образцами, деформированными с меньшими степенями деформации 20 и 60%.

В поперечном сечении при степени деформации 80%, так же как и при деформации 60%, включения графита выглядят как имеющие сферическую форму. На самом деле, как уже было показано выше, у них просто механически обломаны вытянутые отростки. Сохранившиеся «усы» хорошо видны на продольных сечениях (сравним рис. 10, *а* и 10, *б*).

Использование дополнительного электрохимического травления позволило выявить кардинальное отличие характера изменения формы графитных включений при степени деформации 80%. Оно заключается в том, что процесс пластической деформации захватывает теперь уже все включение полностью. Отличие характера деформации графитных включений хорошо заметно при сравнении рис. 9, *а* и 10.

Наиболее характерный вид включений графита после деформации чугуна со степенью 80% в виде остроконечных вытянутых веретен представлен в продольном сечении (рис. 11). Следует отметить, что при степени деформации 80% непрдеформированное ядро графита сферической формы сохраняется лишь в редких случаях (см. рис. 10), наиболее же характерным является наличие веретенообразных включений (рис. 11).

Что касается механизма пластической деформации графита, то можно предположить, что она происходит за счет сдвига по параллельным плоскостям. Как известно, атомы углерода в графите в базисных (наиболее плотно упакованных) плоскостях располагаются в углах правильных шестиугольников. Расстояние между атомами, находящимися в одной плоскости, составляет 0,1415 нм, между слоями – 0,33544 нм, т. е. в 3 раза больше. Известно также, что энергия связи между слоями гексагонального графита составляет 16,7 Дж/моль, а энергия связи между атомами углерода в слое на целый порядок больше – 167,6 Дж/моль. Существенная разница в энергиях связи обеспечивает легкую подвижность слабо связанных между собой слоев. Пластическая деформация происходит за время около 1 с (столько длится процесс выдавливания) путем сдвига целых слоев графита, после чего практически мгновенно возника-

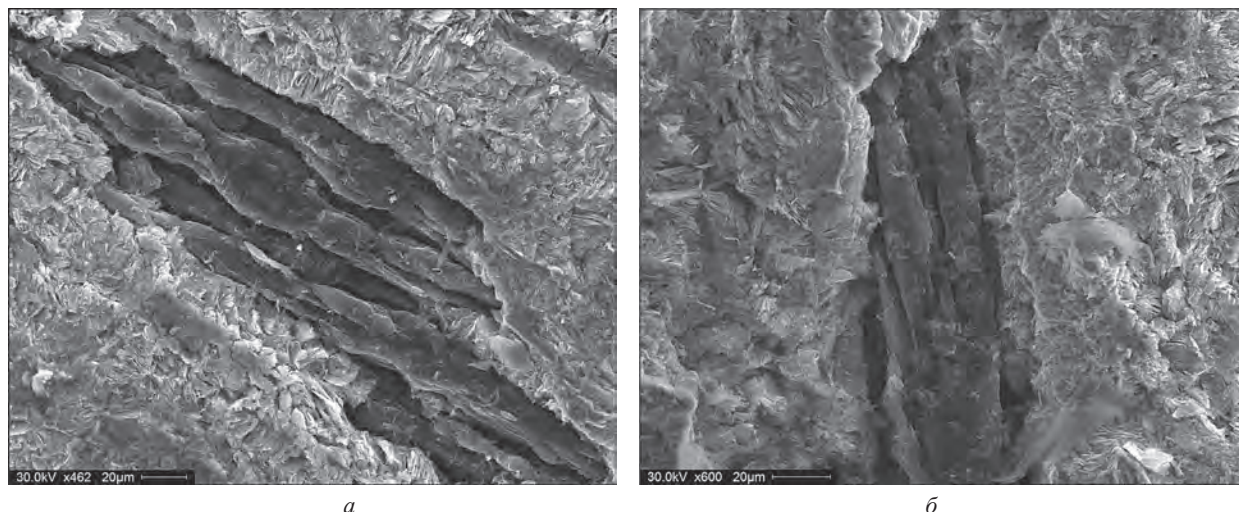


Рис. 11. Поверхность излома высокопрочного деформированного чугуна. Степень деформации 80%. Продольное сечение. Электрохимическое травление. *а* – $\times 462$; *б* – $\times 600$

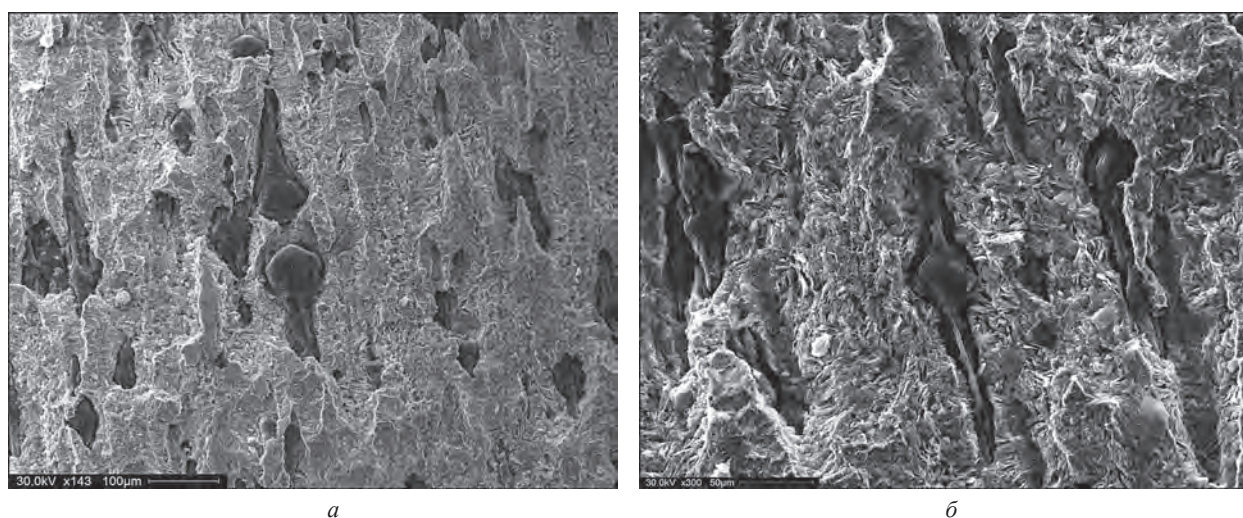


Рис. 12. Поверхность излома высокопрочного деформированного чугуна. Степень деформации 80%. Продольное сечение. Электрохимическое травление. *а* – $\times 143$; *б* – $\times 300$

ют новые связи между атомами в соседних слоях и сплошность включения сохраняется. Однако это предположение является гипотезой и требует дополнительных исследований и доказательств.

В сущности основными факторами, обеспечивающими пластическое течение графита без разрушения, являются два (технологический и структурный):

1. Использование схемы неравномерного всестороннего сжатия и наличие противодействия на выходе деформированного прутка из штамповой оснастки. Как известно, при выдавливании наружные слои прутка тормозятся из-за трения о матрицу, а течение внутренних слоев их опережает. Противодействие выравнивает скорости истечения чугуна и позволяет избежать трещин.

2. Наличие в структуре, окружающей графит, пластичной оболочки в виде перлитной, а лучше перлитно-ферритной металлической матрицы. Наиболее же благоприятным является такое сочетание: графит в ферритной оторочке. Пластичные оболочки для деформации хрупких сред использовали классики обработки материалов давлением Т. Карман, Р. Беккер и П. В. Бриджмен [16]. Они доказали, что даже хрупкие материалы типа мрамора в пластичной стальной оболочке в условиях неравномерного всестороннего сжатия могут получать пластические деформации без разрушения.

Для случая чугунов можно предположить, что отсутствие или недостаточная толщина такой оболочки с одной из сторон графитного включения уменьшит его деформируемость. Иллюстрация этому представлена на рис. 12, *а*: два включения, расположенные вдоль оси деформации, причем очень близко между собой. Как видно из рисунка, при малом расстоянии между включениями толщины окружающей пластичной оболочки оказывается недостаточно, для того чтобы «вовлечь» графит в пластическое течение. Можно предположить (рис. 12, *а*), что минимальным «критическим» расстоянием между включениями

является $\frac{1}{2}$ их диаметров. В результате происходит лишь если так можно выразиться «односторонняя» деформация: а именно, то включение, которое расположено выше на рис. 12, *а* течет вверх, а расположенное ниже – течет вниз, округлая же форма обоих включений с той стороны, где оболочка тонкая, сохранилась неизменной. В случае, когда включения графита располагаются от соседних на расстоянии более чем $\frac{1}{2}$ своего диаметра, его деформация проходит равномерно с обоих концов с образованием симметричных «усов-отростков» (сравним рис. 12, *а* с рис. 12, *б*).

Выводы

1. Представлены результаты сравнительных исследований фрактограмм высокопрочного чугуна в литом состоянии и после горячей пластической деформации.

2. Показан характер изменения структуры металлической матрицы по мере увеличения относительной степени деформации от 0 (литое состояние) до 80%. Излом литого чугуна носит смешанный характер и включает в себя как зоны хрупкого межзеренного излома с преимущественным разрушением по границам зерен (в большинстве случаев), так и с элементами пластической деформации ферритной составляющей. Излом деформированного чугуна также носит смешанный хрупковязкий характер, но более мелкозернистый, в нем возрастает доля перлитной составляющей из-за ускоренного охлаждения на воздухе.

3. Представлен характер изменения формы и морфологии включений графита по мере увеличения степени деформации. При помощи метода электрохимического вытравливания и специально разработанных устройств, позволяющих избирательно растворять металлическую матрицу с постепенным «обнажением» поверхности включений, впервые наглядно продемонстрировано, как в аксонометрии выглядят деформированные включения графита.

4. Впервые экспериментально доказано, что в чугуне включения графита, считающиеся до сих пор хрупкими, при деформации в условиях неравномерного всестороннего сжатия (при температурах порядка 900–1000 °С) пластически деформируются, причем без разрушения. Дробления включений до уровня порошкообразной субстанции не происходит, они остаются монолитными.

5. Пластическая деформация графита до определенной степени деформации (60%) затрагивает не весь объем включения, а распределяется по его сечению, причем неравномерно, а весьма специфически.

6. До степени обжатия 60% деформации подвергаются лишь наружные слои включения, которые из-за своей слоистой структуры «сползают» вдоль чешуек центрального «ядра», как некий «чулок», и образуют вытянутые в направлении течения металла своеобразные отростки («усы»). Образование вытянутых отростков («усов») может происходить по двум, а иногда и по трем параллельным осям, при этом окончания «усов» могут разделяться на несколько волокон, раздваиваясь, а иногда даже делясь на три «ответвления». Центральная часть включения («ядро») по крайней мере до степени деформации 60% сохраняется цельным и неповрежденным, имеет слоистое чешуйчатое строение, шаровидную форму, но меньшего диаметра, чем недеформированное включение. В «ядре» сохраняется присущая исходному сферическому включению радиальная структура.

7. Значительное изменение характера деформации включений графита происходит по достижению степени деформации 60% и наиболее заметно при степени деформации 80%. Однозначно установить его удалось после электрохимического вытравливания слоя металлической матрицы. Данное отличие заключается в том, сферическое ядро во включении графита уже отсутствует, а процесс пластической деформации захватывает все включение целиком, оно приобретает вид остrokонечных вытянутых веретен.

8. Показано, что пластическая деформация высокопрочных чугунов с феррито-перлитной основой и включениями хрупкого графита в ферритной оторочке (типа так называемый «бычий глаз») является примером общего случая деформации гетерогенных материалов, в которых хрупкая фаза расположена внутри пластичной основы.

9. Подтверждено, что наиболее важным фактором успешной пластической деформации чугуна является использование схем, обеспечивающих условия, близкие к всестороннему сжатию. Помимо получения бездефектных поковок, это позволяет пластически деформировать такую хрупкую фазу, как графит в структуре чугуна.

10. Основными факторами, обеспечивающими пластическое течение графита без разрушения, являются два: использование схемы неравномерного всестороннего сжатия и наличие «подпора» (противодавления) на выходе деформированного прутка из матрицы, что позволяет сблизить скорости истечения внутренних слоев прутка с наружными, тормозимыми за счет трения о стенки штамповой матрицы; на-

личие окружающей графит гораздо более пластичной оболочки в виде перлитной, а лучше перрито-ферритной матрицы, причем наиболее благоприятным является случай, когда графит находится в ферритной оторочке.

11. Большое внимание мы уделили в данной статье доказательству, казалось бы, сугубо теоретической дилеммы, а именно того, что же происходит с графитом в чугунах при его деформации: включения подвергаются пластическому течению или же дробятся и рассыпаются в порошкообразную субстанцию, на самом деле имеют важную практическую значимость. Очевидно, что доля площади, занимаемой графитными включениями по отношению ко всей площади шлифа, существенно изменяется по мере роста степени деформации. Как известно, именно графитные включения обеспечивают высокие триботехнические (в первую очередь антифрикционные) характеристики у широкого круга изделий – от поршневых колец до толкателей клапанов двигателей. Регулируя степень деформации, можно целенаправленно управлять количеством и степенью вытянутости включений, а значит, и свойствами. Поэтому выяснение морфологии графита в деформированном чугуне очень важно для прогнозирования эксплуатационных характеристик деталей.

12. То, что большая часть включений графита в изломе деформированного высокопрочного чугуна оказалась не поврежденной (обнаружено весьма малое количество разрушенных включений), может изменить сложившееся мнение о роли графита, как о месте зарождения трещины. Что касается места зарождения трещины, то можно предположить, что это межфазная граница между включением графита и матрицей в той зоне, где графит расположен непосредственно в перлите, а не окаймлен ферритной оторочкой. Трещина распространяется от включения к включению графита, огибая, но не повреждая их.

13. Отмечены преимущества горячей пластической обработки как метода точного формообразования высококачественных деталей из чугуна. Даже при достаточно глубоком травлении не удалось выявить скрытых дефектов структуры в деформированном материале: поры, трещины, другие несплошности отсутствуют.

Литература

1. Основы металлографии чугуна / К. П. Бунин, Я. Н. Малиночка, Ю. Н. Таран. М.: Металлургия, 1969. 416 с.
2. Справочник по металлографическому травлению / М. Беккерт, Х. Клемм. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1979. 336 с.
3. Металлографическое травление металлов и сплавов: Справ. изд. / Л. В. Баранова, Л. М. Демина. М.: Металлургия, 1986. 256 с.
4. ГОСТ 3443-87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. М.: Стандартиформ, 2005. 42 с.
5. Пластическая деформация чугуна / Ю. Т. Антонишин. Минск: Навука і тэхніка, 1991. 119 с.
6. Горячая пластическая деформация чугуна: структура, свойства, технологические основы / А. И. Покровский. Минск: Беларуская навука, 2010. 256 с.
7. Влияние горячей пластической деформации на изменения микроструктуры чугуна с шаровидным графитом / А. С. Чаус, Я. Сойка, А. И. Покровский // Физика металлов и металловедение. 2013. Т. 114. № 1. С. 94–104.
8. Влияние формы графитовых включений на акустические характеристики изделий из литого и деформированного чугуна / А. И. Покровский, А. С. Чаус, Э. Б. Куновский // Металловедение и термическая обработка металлов. 2011. № 7 (673). С. 3–10.
9. Покровский А. И. Пластическое течение включений цементита и графита при обработке давлением чугуна // Литье и металлургия. 2013. № 1 (69). С. 88–95.
10. Покровский А. И., Луцкий П. Е. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и особенностей структурообразования чугуна при горячем выдавливании // Литье и металлургия. 2014, № 4 (77). С. 33–44.
11. Энгель Л., Клингеле Г. Растровая электронная микроскопия. Разрушение: Справ. / Пер. с нем. М.: Металлургия, 1986. 232 с.
12. Изломы конструкционных сталей: Справ. изд. / Л. П. Герасимова, А. А. Ежов, М. И. Маресев. М.: Металлургия, 1987. 272 с.
13. Высокопрочный чугун в автомобилестроении / М. П. Шебашинов, Ю. Е. Абраменко, Н. И. Бех. М.: Машиностроение, 1988. 216 с.
14. Пат. Респ. Беларусь № 10650 от 02.02.2015 по заявке u20140426 от 20.11.2014. Покровский А. И. Устройство для выявления формы графитных включений в структуре чугуна.
15. Пат. Респ. Беларусь № 10652 от 02.02.2015 по заявке u20140426 от 20.11.2014. Покровский А. И. Устройство для выявления формы графитных включений в структуре чугуна.
16. Бриджмен П. В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М.: Изд-во иностранной литературы, 1955. 444 с.

References

1. Bunin K. P., Malinochka J. A. N., Taran Ju. N. *Osnovy metallografii chuguna* [Fundamentals of iron metallography]. Moscow, Metallurgija Publ., 1969. 416 p.

2. Bekkert M., Klemm H. *Spravochnik po metallograficheskomu travleniju* [Reference metallographic etching]. Moscow, Metallurgija Publ., 1979. 336 p.
3. Baranova L. V., Demina L. M. *Metallograficheskoje travlenije metallov i splavov* [Metallographic etching of metals and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1986. 256 p.
4. GOST 3443-87. *Otlivki iz chuguna s razlichnoj formoj grafita. Metody opredelenija struktury* [Castings of iron with various forms of graphite. Methods for determination of the structure]. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 42 p.
5. Antonishin Ju. T. *Plasticheskaja deformatsija chuguna* [Plastic deformation of cast iron]. Minsk, Navuka i Tehnika Publ., 1991. 119 p.
6. Pokrovskij A. I. *Gorjachaja plasticheskaja deformatsija chuguna: struktura, svojstva, tehnologicheskiye osnovy* [Hot plastic deformation of iron: structure, properties, processing base.]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2010. 256 p.
7. Chaus A. S., Sojka Ja., Pokrovckij A. I. Vlijanije gorjachej plasticheskoy deformatsii na izmenenija mikrostruktury chuguna s sharovidnym grafitom [Effect of hot plastic deformation changes the microstructure of nodular cast iron]. *Fizika metallov i metallovedenije – Physics of Metals and Metallography*, 2013, vol. 114, no. 1, pp. 94–104.
8. Pokrovskij A. I., Chaus A. S., Kunovskij E. B. Vlijanije formy grafitovykh vkljuchenij na akusticheskije harakteristiki izdelij iz litogo i deformirovannogo chuguna [Impact of the shape of graphite inclusions in the acoustic characteristics of products from cast and deformed iron]. *Metallovedenije i termicheskaja obrabotka metallov – Metal Science and heat treatment of metals*. 2011, no. 7, pp. 3–10.
9. Pokrovskij A. I. Plasticheskoe techenije vkljuchenij tsementita i grafita pri obrabotke davlenijem chuguna [Plastic flow cementite and graphite inclusions in the processing of pressure cast iron]. *Lit'e i metallurgija – Foundry Production and metallurgy*, 2013, no. 1 (69), pp. 88–95.
10. Pokrovskij A. I., Luschik P. E. Chislennoe modelirovanije naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija i osobennosti strukturoobrazovanija chuguna pri gorjachem vydavlivanii [Numerical simulation of stress-strain state and peculiarities of structure of iron during hot extrusion]. *Lit'e i metallurgija – Foundry Production and metallurgy*, 2014, no. 4 (77), pp. 33–44.
11. Engel' L., Klingele G. *Rastrovaja elektronnaja mikroskopiya. Razrushenije* [Scanning electron microscopy. Destruction. Directory]. Moscow, Metallurgija Publ., 1986. 232 p.
12. Gerasimova L. P., Jezhov A. A., Maresev M. I. *Izlomy konstruktsionnykh stalej* [Fractures of structural steels: Reference Vol.]. Moscow, Metallurgija Publ., 1987. 272 p.
13. Shebatinov M. P., Abramenko Ju. E., Beh N. I. *Vysokoprochnyj chugun v avtomobilestrojenii* [High-strength cast iron in the automotive]. Moscow, Mashinostrojenije Publ., 1988. 216 p.
14. Pokrovskij A. I. *Ustrojstvo dlya vyyavleniya formy grafitnykh vkljucheniy v strukture chuguna* [An apparatus for detecting inclusions in the form of graphite structure of cast iron]. Patent RB, no. 10650, 2015.
15. Pokrovskij A. I. *Ustrojstvo dlya vyyavleniya formy grafitnykh vkljucheniy v strukture chuguna* [An apparatus for detecting inclusions in the form of graphite structure of cast iron]. Patent RB, no. 10652, 2015.
16. Bridzhmen P. V. *Issledovanie bol'shih plasticheskikh deformatsij i razryva* [Study of large plastic deformation and fracture]. Moscow, Izdatel'stvo inostrannoj literatury Publ., 1955. 444 p.

Сведения об авторе

Покровский Артур Игоревич, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси. ул. Купrevича, 10, 220141, г. Минск, Беларусь. E-mail: arturu@tut.by.

Information about the author

Pokrovsky Artur, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevich Str., Minsk, 220141, Belarus. E-mail: arturu@tut.by.



УДК 542.4

Поступила 05.10.2015

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МАКРОГЕТЕРОГЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ, ИХ СТРУКТУРА И СВОЙСТВА

FEATURES OF MACROHETEROGENEOUS COMPOSITE MATERIALS SYNTHESIS WITH THE HELP OF INDUCTION MELTING, THEIR STRUCTURE AND PROPERTIES

*В. А. КАЛИНИЧЕНКО, С. В. ГРИГОРЬЕВ, М. Л. КАЛИНИЧЕНКО, А. Е. ЗЕЛЕЗЕЙ,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь.*

*V. A. KALINICHENKO, S. V. GRIGOREV, M. L. KALINICHENKO, A. E. ZELEZEY,
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

Композиционные материалы с макрогетерогенной структурой являются довольно новым классом композитов и представляют несомненный интерес для применения в тяжело нагруженных узлах трения, позволяя иногда отказаться от подшипников качения. В настоящее время практическое применение нашли композиционные материалы с матрицей на основе медных сплавов. Научный и практический интерес представляют и сплавы на основе алюминия, что позволит снизить стоимость материала и их массу, а также расширить номенклатуру получаемых изделий. В работе рассмотрены способ синтеза композиционных материалов при индукционной плавке, их триботехнические свойства.

Composite materials with macroheterogeneous structure are a relatively new class of composites and are of great interest for application in heavy-duty friction, allowing sometimes to abandon bearings. Currently in practical use is made of composite materials with a matrix based on copper alloys. Scientific and practical interest and alloys based on aluminum, which will reduce the material cost and weight, as well as expand the range of products obtained. In work the method of synthesis of composite materials in induction melting, considered their tribological properties.

Ключевые слова. *Композиционные материалы, алюминиевые сплавы, медные сплавы, узлы трения, микроструктура, испытания на износостойкость.*

Keywords. *Composite materials, aluminum alloys, copper alloys, friction, microstructure, test the durability.*

Повышение износостойкости поверхностей деталей в узлах трения является одной из приоритетных задач машиностроения. Для решения данной задачи целесообразно переходить на управление процессом формирования микроструктуры на микро- и наноуровнях. Представляет научный интерес применение таких технологий для управления микроструктурой композиционных материалов с макрогетерогенной структурой, получаемых литейной технологией (твердо-жидким синтезом). Данные материалы обладают высокими эксплуатационными свойствами при использовании в тяжело нагруженных узлах трения [1]. В силу особенностей структуры и состава эти композиционные материалы показали наиболее эффективное применение при низких скоростях относительного движения в узлах трения и высокой удельной нагрузке [2]. Наибольшую нагрузку несут поверхностные слои, поэтому для повышения ресурса деталей важно обеспечить высокую износостойкость поверхностных слоев. Было изучено влияние модифицированных смазок и установлено их положительное влияние [3]. Однако разработанные материалы интересны и для условий отсутствия смазки, что происходит при аварийных состояниях. Поэтому необходимо разрабатывать методы повышения износостойкости поверхностных слоев материалов с макрогетерогенной структурой. Одним из методов управления микроструктурой поверхностных слоев является воздействие концентрированными потоками энергии, что создает условия для формирования структуры при неравновесных условиях, способствующих образованию микро- и наноразмерных фаз. Установлено, что применение лазерной обработки повышает триботехнические свойства материала [4].

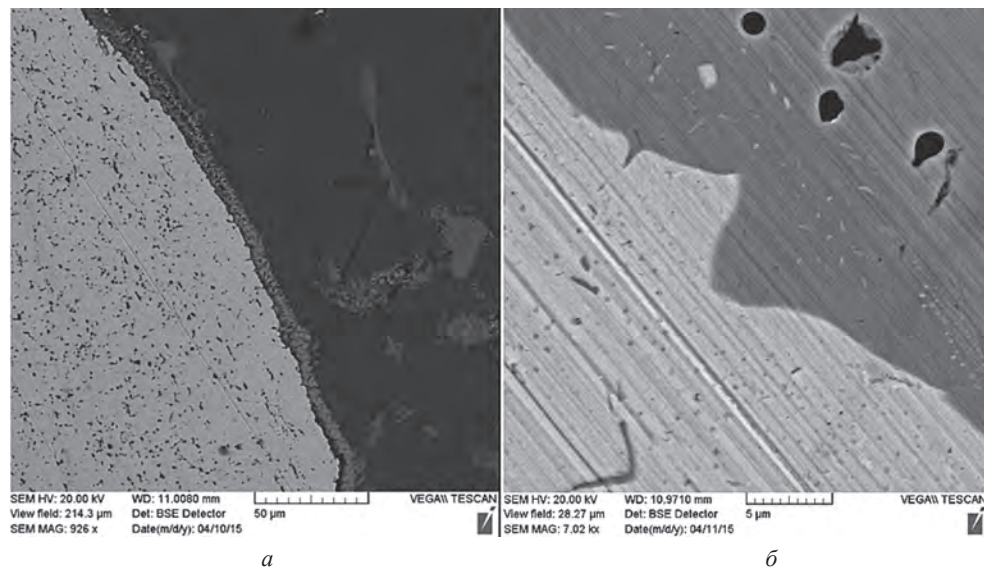


Рис. 1. Композиционные материалы, полученные с помощью индукционного нагрева: *а* – на основе сплава АК-7; *б* – на основе БрКМц3-1

Одна из практических задач – снижение стоимости продукции, что применительно к разрабатываемым сплавам заключается в сокращении времени синтеза. Для реализации поставленной задачи было решено использовать вместо стандартной литейной технологии производства данного типа материалов способ нагрева и синтеза композитов с применением индукционного нагрева. В качестве объекта исследований был выбран макротетерогенный композиционный материал на основе алюминиевого сплава АК-7 в первом случае и бронзы КМц3-1 во втором цикле экспериментов. Оба материала были армированы чугунными сферическими гранулами диаметром около 1,0 мм (ДЛЧ1.0).

Эксперименты проводили с помощью индукционного нагрева заранее подготовленной смеси гранул чугуна и сплавов, используя стандартную индукционную печь ИСТ-0,06. После обработки шлифы из образцов были изучены с применением оптической микроскопии (микроскоп «Микро 200») и электронного микроскопа VEGA II LMU, оборудованного микроанализатором INGA Energy 350 и приставкой «SpectroScan Max-GV».

В результате проведенных экспериментов установлено, что полученные материалы имеют типичную для литых композиционных материалов структуру (рис. 1), как для материала на алюминиевой, так и на бронзовой основе.

Для оценки качества полученного материала перед триботехническими испытаниями было принято решение провести детальный анализ микроструктуры для выяснения особенностей распределения химических элементов по сечению шлифа, особенно в зоне контакта «чугунная дробь – алюминиевая матрица». По характеру зон раздела фаз возможно оценить качество полученного композиционного материала и спрогнозировать вероятность его разрушения в процессе эксплуатации из-за трещинообразования либо выкрашивания армирующего элемента.

При оценке свойств композиционных материалов наибольшее внимание уделяется зоне раздела «чугунная гранула – алюминиевый сплав», поэтому эта граница фаз и была выбрана для исследований. Проведен анализ распределения элементов по линии выбранного участка (рис. 2), а также спектральный анализ элементов (рис. 3) и распределение их по линии (рис. 4).

Из анализа распределения материалов видно, что при индукционном синтезе наблюдается четко выраженная граница раздела «матрица-армирующая гранула», характерная и для литейного синтеза. Диф-

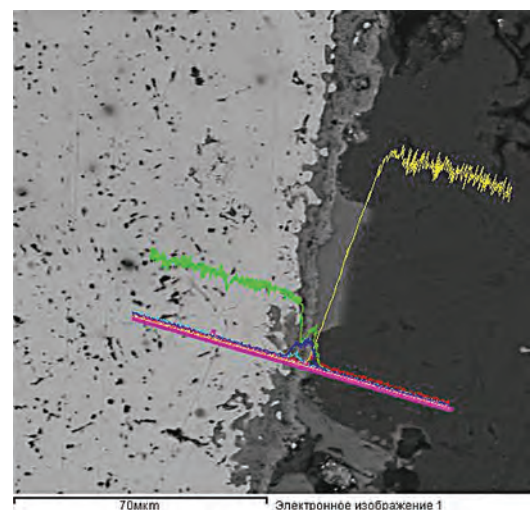


Рис. 2. Граница раздела «чугунная дробь – алюминиевый сплав» в композиционном материале, полученном с помощью индукционного нагрева

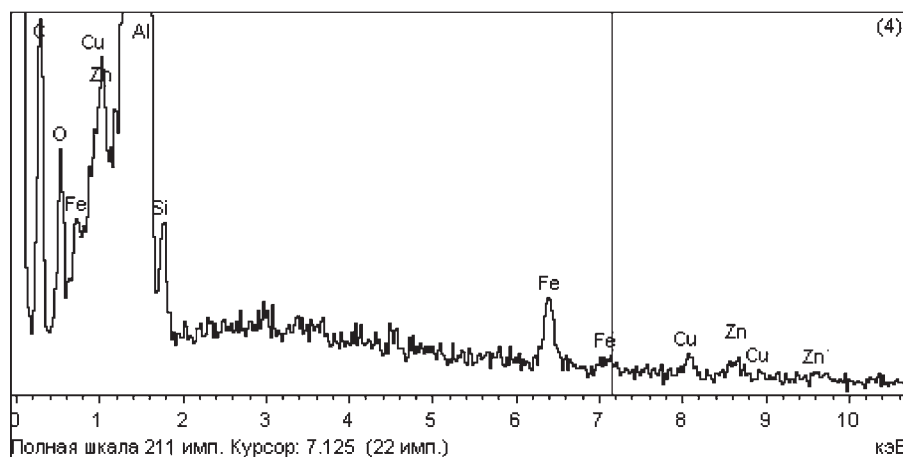


Рис. 3. Спектральный анализ элементов в образце рис. 2

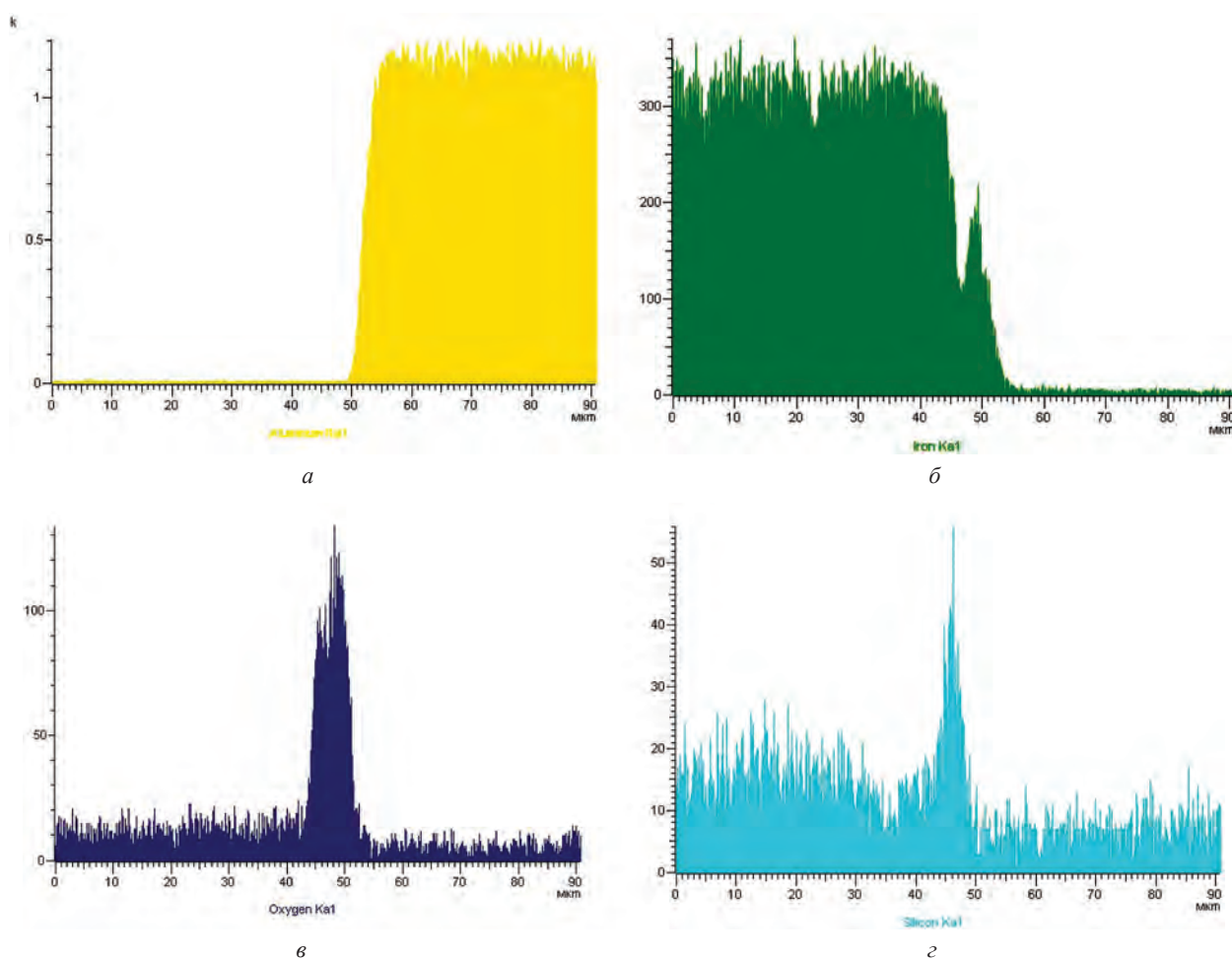


Рис. 4. Распределение элементов по линии в образце рис. 2: а – алюминий; б – железо; в – кислород; г – кремний

фузионная зона, образованная при взаимодействии матричного расплава и гранул, очень незначительна. Анализ распределения элементов (рис. 4) показывает, что в переходной зоне раздела содержится значительное количество кислорода (вероятнее всего, в виде оксидов), что при эксплуатации данного материала может негативно влиять на прочностные свойства. Возможно, появление значительного количества оксидов связано с захватом кислорода воздуха при индукционном нагреве. Однако необходимо отметить, что синтез композиционных материалов с макрогетерогенной структурой путем индукционного нагрева имеет хороший потенциал и возможность развития данной технологии.

Для сравнения следующим был испытан образец, синтезированный с матричным сплавом из бронзы Кмц3-1 (рис. 5). Для данного образца был также проведен спектральный анализ элементов (рис. 6) и установлены их суммарные концентрации (см. таблицу).

Анализ элементов материала, полученного с помощью индукционного нагрева по выбранным точкам (нормализован)

Спектр	Si	Mn	Fe	Cu	Итого
(1)	1,15	0,44	2,56	95,85	100,00
(2)	1,85	0,39	9,64	88,12	100,00
(3)	0,74	0,36	5,10	93,79	100,00
(4)	6,70	0,40	84,64	8,26	100,00
(5)	3,72	0,59	92,72	2,98	100,00
Среднее	2,83	0,44	38,93	57,80	100,00
Стандартное отклонение	2,44	0,09	45,57	47,75	
Максимальное	6,70	0,59	92,72	95,85	
Минимальное	0,74	0,36	2,56	2,98	

Анализ распределения элементов, проведенный для бронзового образца, показал, что в переходной зоне раздела в отличие от алюминиевого композита практически не наблюдается кислорода, что позволяет предположить о правильности выбранного направления и необходимости дальнейших исследований по данной тематике.

Проведенные триботехнические испытания полученных образцов показали (рис. 7), что алюминиевые композиции заметно уступают их медным аналогам, а также исходному сплаву АК-7. Однако, рассматривая композиционные материалы, полученные методами индукционной плавки и по стандартной технологии, можно с уверенностью отметить сходство их триботехнических свойств.

Необходимо отметить, что синтез композиционных материалов с макрогетерогенной структурой путем индукционного нагрева имеет хороший потенциал и возможность развития данной технологии. Однако, рассматриваемая технология требует дальнейшего изучения и доработки, так как в теле получаемых изделий (особенно в угловых зонах) встречаются места полного проплавления армирующего элемента, что негативно сказывается на их эксплуатационных свойствах. Но в тоже время разрабатываемая технология позволяет сократить время синтеза изделия из композиционного материала (например, для шпонки размером 220×45×50 мм используемой для термической стабилизации корпусов опор вала турбины) с 5 часов при использовании стандартной схемы литья до 25–35 мин при использовании индукционного нагрева.

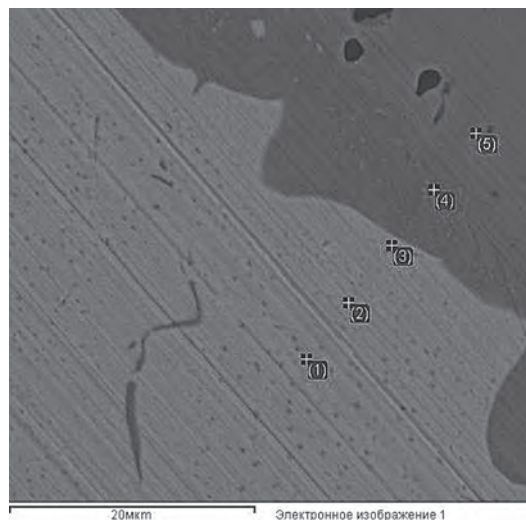


Рис. 5. Зона композиционного материала, полученного с помощью индукционного нагрева, и точки для анализа элементов

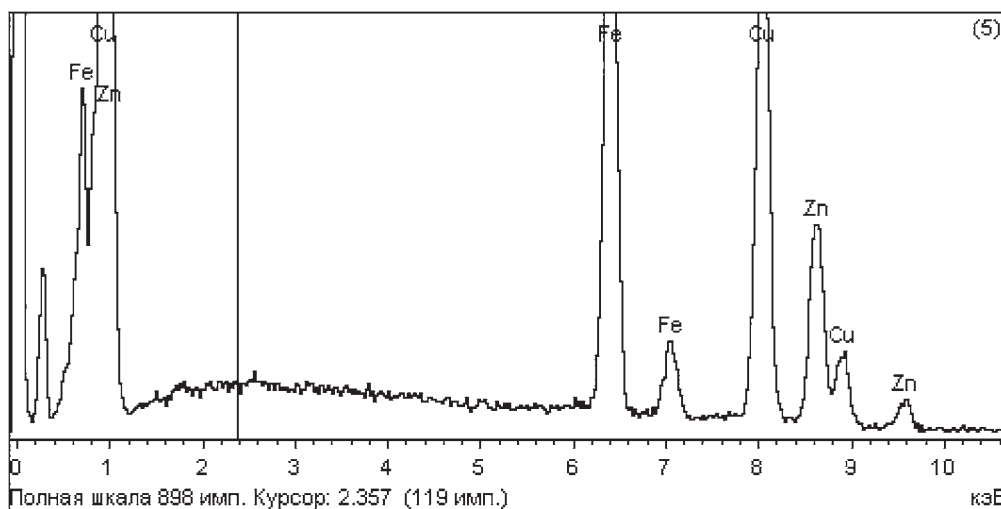


Рис. 6. Спектральный анализ элементов в образце рис. 5

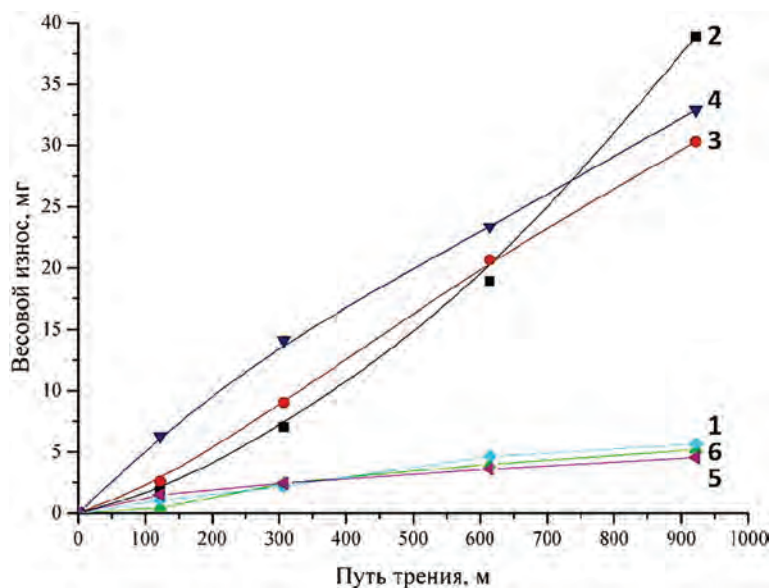


Рис. 7. Триботехнические испытания полученных образцов: 1 – исходный АК-7; 2 – композит с алюминиевой матрицей № 1; 3 – композит с алюминиевой матрицей № 2; 4 – БрКМц3-1 исходная; 5 – композиционный материал, полученный по стандартной технологии; 6 – композит с бронзовой матрицей, полученный индукционным нагревом

Литература

1. Kalinichenko A. S., Kezik V. Ya., Bergmann H. W., Kalinitchenko V. A. Structure of surface layers of metal matrix composites // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 1999. Vol. 30. P. 136–144.
2. Калиниченко А. С., Кезик В. Я., Иванова Р. К. Формирование структуры поверхностного объема литых макрогетерогенных композиционных материалов в условиях низкоскоростного трения без смазки // *Литье и металлургия*. 2003. № 2. С. 118–123.
3. Калиниченко В. А. Анализ структуры и свойств макрогетерогенных композиционных материалов, полученных методами высокоэнергетического воздействия / Сб. науч. тр. X МНТК «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». Минск: ФТИ. Кн. 2. С. 175–179.
4. Калиниченко А. С., Калиниченко В. А., Девойно О. Г. Микроструктурные изменения в поверхностных слоях макрогетерогенных композитов при высокоэнергетическом воздействии // *Литье и металлургия*. 2013. № 2. С. 106–109.

References

1. Kalinichenko A. S., Kezik V. Ya., Bergmann H. W., Kalinitchenko V. A. Structure of surface layers of metal matrix composites. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 1999. Vol. 30, pp. 136–144.
2. Kalinichenko A. S., Kezik V. Ya., Ivanova R. K. Formirovanie strukturu poverhnostnogo obioma lituh makrogeterogennuh kompozicionnuh materialov v uslovijah nizkoskorostnogo trenija bez smazki [The formation of the structure of the surface of the volume of cast macroheterogeneous composite materials in conditions of low friction without lubrication]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2003, no. 2, pp. 118–123.
3. Kalinichenko U. A. Analys strukturu i svoistv lituh makrogeterogennuh kompozicionnuh materialov, poluchennuh metodami vysokoenergeticheskogo vosdeistvija [Analysis of the structure and properties of macroheterogeneous composite materials obtained by high-energy impact]. *Sbornik trudov X MN TK «Sovremennue materialy i tehnologii sozdanija i obrabotki materialov»*. [Proceedings of the X international science-technical conference. Modern methods and technologies of creation and processing of materials. Minsk. Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 2015. Book 2, pp. 175–179.
3. Kalinichenko A. S., Kalinichenko U. A., Devoino O. G. Mikrostrukturnie izmenenija v poverhnostnuh sloyah makrogeterogennuh kompozitov pri vusokoenergeticheskom vozdeistvii [Microstructural changes in the surface layers of macroheterogeneous composites under high-energy impact]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. 2013, no. 2, pp. 106–109.

Сведения об авторе

Калиниченко Владислав Александрович, Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь. E-mail: kvlad@bntu.by.

Information about the author

Kalinichenko Vladislav, Belarusian National Technical University. Nezavisimosty ave., 65, 220013, Minsk, Republic of Belarus. E-mail: kvlad@bntu.by.



УДК 669.3

Поступила 07.09.2015

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ КУПРИТА ПРИ АНАЛИЗЕ КИСЛОРОДНОЙ МЕДИ DETERMINATION OF CUPRITE DENSITY BY ANALYSIS OF OXYGENOUS CUPPER

А. Г. АНИСОВИЧ, Т. П. УРБАН, А. С. БУЙНИЦКАЯ, ГНУ «Физико-технический институт
НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь

A. G. ANISOVICH, T. P. URBAN, A. S. BUYNITSKAYA, Physical and Technical Institute of National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Рентгеноструктурным и металлографическим способами определена плотность куприта (закись меди Cu_2O) в составе эвтектики кислородной меди. Показано, что величина плотности $6,2 \text{ г/см}^3$, наиболее часто встречаемая в справочной литературе, не может быть использована для расчета количества кислорода в деформированной меди. Рентгеноструктурным анализом найдено значение плотности, равное $2,14 \text{ г/см}^3$. Металлографический анализ на основании определения площади куприта в эвтектической фазе дает значение плотности $3,3 \text{ г/см}^3$.

The cuprite density (Cu_2O cuprous oxide) as a part of an eutectic of oxygen copper was determined by X-ray diffraction and by metallographic way. It is shown that the size of density of $6,2 \text{ g/cm}^3$, the most often met in the reference books, cannot be used for calculation of quantity of oxygen in the deformed copper. By the X-ray diffraction analysis it is found value of density equal $2,14 \text{ g/cm}^3$. By the metallographic analysis, on the basis of determination of the area of cuprite in the eutectic phase, gives value of density of $3,3 \text{ g/cm}^3$.

Ключевые слова. Куприт, закись меди, кислородная эвтектика.

Keywords. Cuprite, cuprous oxide, oxygeneous eutectic.

Определение количества кислорода в меди металлографическим методом разработано только для литого состояния [1, 2]. Основой этого метода является постоянное количество кислорода в эвтектике состава $\text{Cu}-\text{Cu}_2\text{O}$ (0,39 мас.%). Вычисление количества кислорода производится по площади, занимаемой эвтектикой. Представленные в литературе данные по плотности куприта относятся в основном к минералам. Плотность закиси меди, сформировавшейся в результате кристаллизации расплава, в литературе не приводится. Для реализации компьютерных методов анализа кислородной меди необходимо проведение исследований по определению точного значения плотности соединения Cu_2O . Также определение плотности закиси меди металлографическим анализом эвтектики $\text{Cu}-\text{Cu}_2\text{O}$ осложнено отсутствием методик компьютерного анализа изображений, современных стандартов на металлы и сплавы и низким качеством графических материалов уже существующих ГОСТ [3].

Существует возможность определения плотности куприта методом гидростатического взвешивания образцов литой меди с различным содержанием кислорода. Количество кислорода определено металлографически по методике [4]. Результаты определения количества кислорода, а также плотности методом гидростатического взвешивания приведены в табл. 1. В расчете плотность меди принималась равной $8,96 \text{ г/см}^3$. Учитывая, что плотность куприта меньше плотности меди, при повышении количества кислорода следовало бы ожидать снижения плотности сплава. В соответствии с полученными данными с повышением содержания кислорода плотность сплава увеличивается. По-видимому, основное влияние на плотность кислородной меди оказывают параметры литейного процесса.

Определение плотности закиси меди возможно провести рентгенографически, а также металлографическим анализом эвтектики $\text{Cu}-\text{Cu}_2\text{O}$.

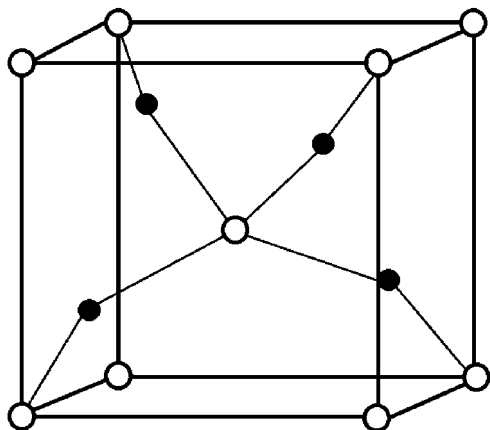


Рис. 1. Схема кристаллической структуры куприта: • – медь; о – кислород

Таблица 1. Результаты определения гидростатической плотности и количества кислорода в меди

Плотность, г/см ³	Количество кислорода, мас.%, определение металлографически
8,650	Нет
8,867	0,0186
8,920	0,10

Рентгенографическое определение плотности. Схема кристаллической решетки куприта показана на рис. 1 [5]. Согласно этой схеме, в элементарной ячейке содержится 1 атом кислорода в центре и 8 атомов кислорода по углам куба, а также 4 атома меди, т.е. по две формульные единицы состава Cu₂O на элементарную ячейку.

Для соединения состава Cu₂O в картотеке ASTM имеются следующие данные:

1. Кубическая форма закиси меди, структурный класс Pn3m, параметр решетки $a = 4,267$ (карточка 78-2076).
2. Кубическая форма закиси меди, структурный класс Pn3m, параметр решетки $a = 6,0$ (карточка 02-1067).

Таким образом существуют два варианта индексирования линий рентгенограммы (табл. 2).

Таблица 2. Варианты индексирования рентгенограммы куприта по картотеке ASTM

Карточка № 78–2076, $a = 4,267 \text{ \AA}$		Карточка № 02–1067, $a = 6,0 \text{ \AA}$	
$d, \text{ \AA}$	hkl	$d, \text{ \AA}$	hkl
3,0172	110	3,01	200
2,4635	111	2,46	211
2,1335	200	2,13	220
1,7420	211	1,74	222
1,5086	220	1,51	400
1,4223	221		
1,3493	310		
1,2865	311	1,28	332
1,2317	222	1,23	422
1,1404	321	1,06	440
		0,97	611
		0,95	620
		0,87	444
		0,82	641

Определение рентгеновской плотности проведено согласно методике [6]. Расчет плотности производили по формуле

$$\rho = \frac{zM}{V}, \quad (1)$$

где z – число формульных единиц в элементарной ячейке, $z = 2$; V – объем элементарной ячейки куприта: при $a = 6,048 \text{ \AA}$ $V = 221,22 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3$; при $a = 4,27 \text{ \AA}$ $V = 77,85 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3$; M – молекулярная масса: $M = 143,0794 \text{ у.е.}$

Рентгенограмма кислородной меди показана на рис. 2, а ее расшифровка приведена в табл. 3. На рентгенограмме линии закиси меди отмечены стрелками.

Определение параметра решетки куприта при различном индексировании рентгенограммы показало, что для параметра решетки $a = 6,0 \text{ \AA}$ плотность составляет $6,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ($6,1 \text{ г/см}^3$), что соответствует большинству справочных данных. Для параметра кристаллической решетки $a = 4,267 \text{ \AA}$ плотность составляет $2,14 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ($2,14 \text{ г/см}^3$). Использование значения плотности куприта $6,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ при определении количества кислорода в деформированной меди создает трудности, описанные в [3]. Значение плотности $2,14 \text{ г/см}^3$ попадает в интервал значений, приведенных в [7], и согласуется с оценками [3].

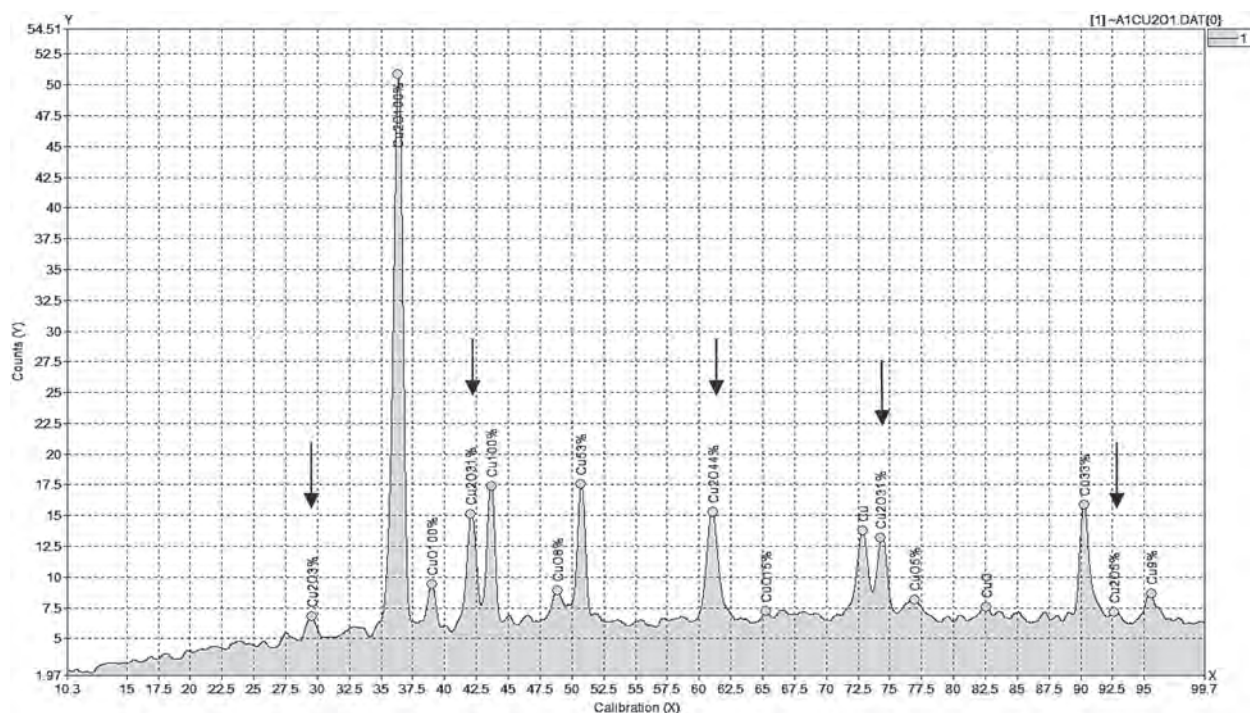


Рис. 2. Рентгенограмма кислородной меди

Таблица 3. Результаты фазового анализа кислородной меди

Угол дифракции θ , град	Межплоскостное расстояние d , Å	Вещество
29,36	3,04	Cu_2O
36,2	2,48	Cu_2O
38,8	2,32	CuO
41,92	2,15	Cu_2O
43,39	2,08	Cu
48,68	1,87	CuO
50,67	1,8	Cu
60,98	1,52	Cu_2O
65,22	1,43	CuO
72,76	1,3	CuO
74,23	1,28	$\text{Cu, Cu}_2\text{O}$
76,83	1,24	CuO
82,46	1,17	CuO
90,17	1,09	Cu
92,86	1,06	Cu_2O
95,28	1,04	Cu

Металлографическое определение плотности. Оценка плотности закиси меди по доле площади, занимаемой ею в эвтектике, предпринята в [3]. Было получено, что объемная доля закиси меди в эвтектике составляет 33%. Исходя из этого результата, плотность Cu_2O была оценена как $1,53 \text{ г/см}^3$, что также согласуется с данными [7]. Тем не менее, величина объемной доли закиси меди в эвтектике, определенная как 33%, представляется несколько завышенной. В процессе проверки методики определения доли площади куприта выяснилось, что имеет место декорирование включений куприта оксидом хрома, на котором производилась окончательная полировка шлифа. На рис. 3, а представлена структура кислородной меди, на которой включения закиси меди декорированы оксидом хрома. Оксид хрома имеет зеленый цвет, при освещении желтым светом лампы микроскопа включения приобретают голубоватый оттенок. По-видимому, на фотографии, приведенной в [8], также показан не куприт, а результат декорирования включений куприта оксидом хрома (рис. 3, б).

Эффект осаждения оксида хрома на бескислородной меди показан на рис. 4, а. Осаждение имеет место по всей площади шлифа, предпочтительно на межзеренных и двойниковых границах. При промывке шлифа этиловым спиртом осадки частично растворяются (рис. 4, б). Наиболее полное удаление продук-

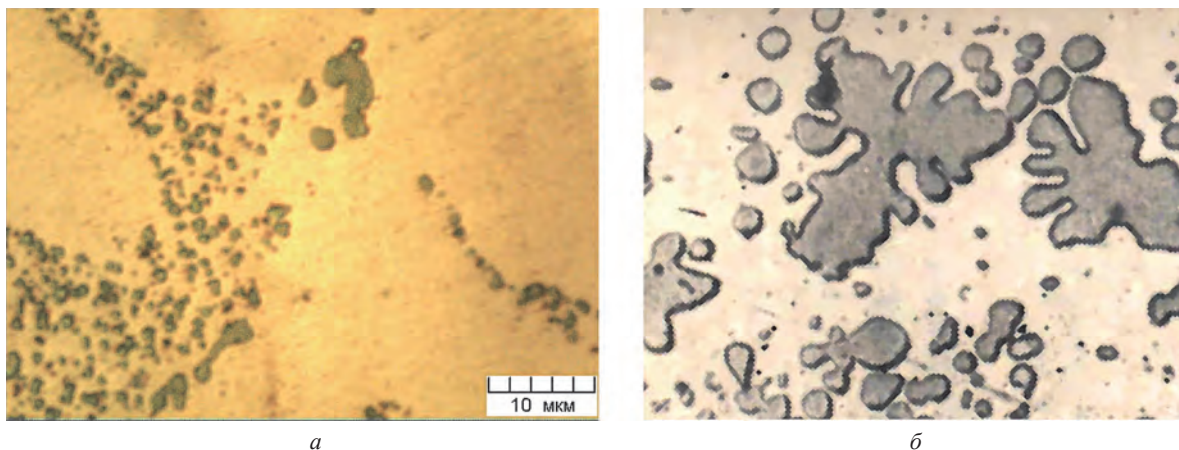


Рис. 3. Декорирование кислородной эвтектики оксидом хрома (а), структура из [11] (б)

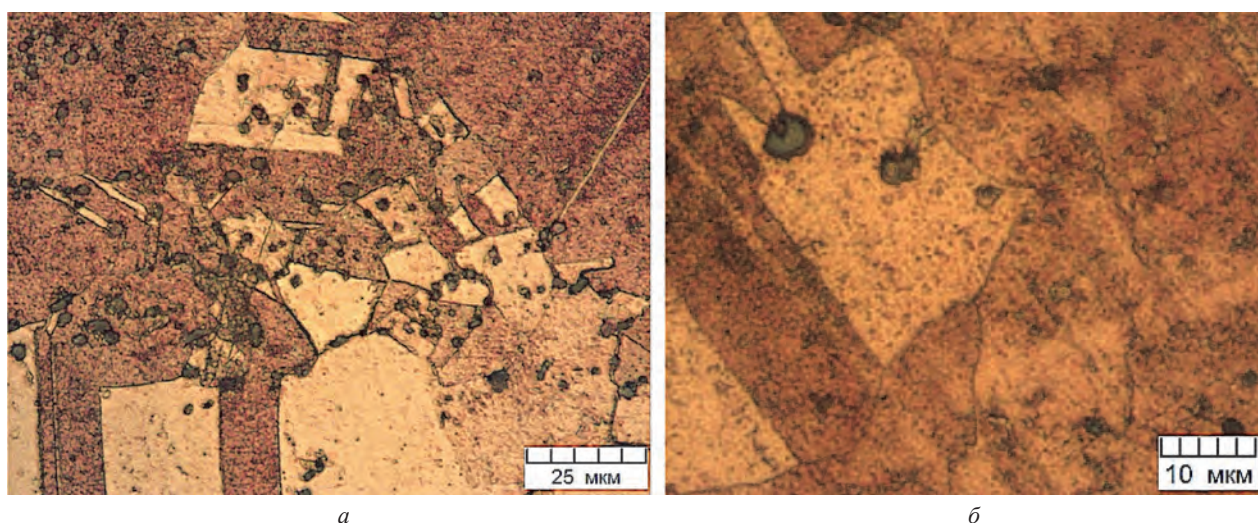


Рис. 4. Осаждение оксида хрома на поверхности бескислородной меди (а) и результат промывки шлифа этиловым спиртом (б)

тов полировки достигается при травлении шлифа реактивом Келлера (рис. 5). При этом вид эвтектики существенно изменяется.

Оценку плотности закиси меди возможно провести из анализа эвтектической фазы, как для сплава эвтектической концентрации (0,39% O_2). Определение площади куприта в эвтектике выполнено по шести независимым кадрам после травления реактивом Келлера. Доля площади куприта в эвтектике составила 9% (табл. 4).

Согласно [4], возможно определение массовой доли компонента сплава, если известна объемная доля фазы. Плотность закиси меди можно рассчитать по соотношению:

$$G_a = \frac{d_{Cu_2O} \sum V_{Cu_2O}}{d_{Cu_2O} \sum V_{Cu_2O} + d_{Cu} (1 - \sum V_{Cu_2O})} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $\sum V_{Cu_2O}$ – объемная доля куприта в эвтектике, %; d_{Cu_2O} , d_{Cu} – соответственно плотность куприта и меди, г/см³. Оценку плотности закиси меди проводили для сплава эвтектической концентрации: при 0,39% содержания кислорода в сплаве и 11% содержания кислорода в закиси меди величина G_a составляет 3,48%.

Результаты представлены в табл. 4. Исходя из полученных данных, была определена плотность куприта, которая составила 3,3 г/см³.

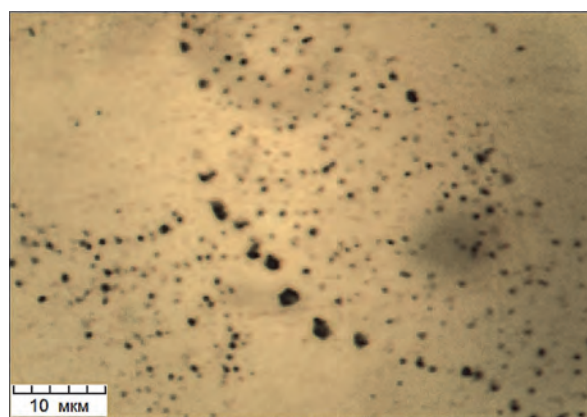


Рис. 5. Эвтектика в кислородной меди; травление реактивом Келлера

Т а б л и ц а 4. Результаты определения плотности куприта металлографическим методом

№ п.п.	Площадь куприта, мкм	Площадь эвтектики, мкм	Доля площади куприта, %	Плотность, г/см ³
1	156,17	1772,98	8,8	3,3
2	129,01	1636,08	7,9	3,8
3	58,4	605,38	9,65	3,0
4	108,01	936,14	11,5	2,5
5	97,08	1053,49	9,2	3,2
6	82,82	1100,87	7,5	4,0
Среднее			9,091	3,3

Таким образом, в результате исследования были получены следующие значения плотности: рентгеновская плотность – $2,14 \cdot 10^3$ кг/м³, металлографически определенная плотность – $3,3 \cdot 10^3$ кг/м³. Рентгеновская плотность является «идеальной» плотностью вещества; реальная плотность материалов обычно не достигает этих значений вследствие наличия дефектов структуры – вакансий, дислокаций, несплошностей и т.п. Металлографически полученное значение может быть несколько завышенным в силу ошибки оператора из-за высокой дисперсности включений куприта (рис. 5). Поэтому на данном этапе целесообразно принять среднее значение плотности куприта по результатам металлографического и рентгеновского анализов – $2,72 \cdot 10^3$ кг/м³.

Литература

- ГОСТ 13938.13-93. Медь. Методы определения кислорода.
- А н и с о в и ч А. Г. Определение содержания кислорода в меди методом компьютерного анализа изображений / А. Г. Анисович, И. Н. Румянцева, П. Н. Мисуно // Литье и металлургия. 2010. № 1–2. С. 306–310.
- А н и с о в и ч А. Г. Проблемы металлографического определения количества кислорода в деформированной меди / А. Г. Анисович // Литье и металлургия. 2014. № 1. С. 74–78.
- С а л т и к о в С. А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1976. 270 с.
- Куприт // Про камни [Электронный ресурс]. 2015 – Режим доступа: <http://pro-kamni.ru/kuprit>.
- Г о р е л и к С. С., Р а с т о р г у е в Л. Н., С к а к о в Ю. А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. Практическое руководство по рентгенографии, электронографии и электронной микроскопии металлов, полупроводников и диэлектриков. М.: Металлургия, 1970. 366 с.
- Камень куприт // Инмомент [Электронный ресурс]. 2013–Режим доступа: <http://www.inmoment.ru/magic/healing/kuprit.html>.
- Г е л л е р Ю. А., Р а х ш т а д т А. Г. Материаловедение. М.: Металлургия, 1975. 447 с.

References

- State Standard 13938.13-93. Copper. Methods of oxygen concentration determination. Moscow, Standartinform Publ., 1993. 24 p. (In Russian).
- Anisovich A. G., Rumjantseva I. N., Misuno P. N. Determination of oxygen content in copper by means of computer analysis of images. *Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 1–2, pp. 306–310 (in Russian).
- Anisovich A. G. Problems of metallographic definition of oxygen quantity in the deformed copper. *Foundry production and metallurgy*, 2014, no. 1, pp. 74–78 (in Russian).
- Saltikov S. A. *Stereometric metallography*. Moscow, Metallurgy Publ., 1976. 270 p.
- Cuprite (2015). Available at: <http://www.pro-kamni.ru/kuprit> (accessed 3 November 2015).
- Gorelic S. S., Rastorguev L. N., Scaikov Ju. A. X-ray and electron-optical analysis. Moscow, Metallurgy Publ., 1970. 366 p.
- Stone of Cuprite (2015). Available at: <http://www.inmoment.ru/magic/healing/kuprit.html> (accessed 3 November 2015).
- Geller Ju. A., Rachstadt A. G. *Material Science*. Moscow, Metallurgy Publ., 1975. 447 p.

Сведения об авторе

Анисович Анна Геннадьевна, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», 220141, Минск, ул. Купревича, 10. Тел. 237-06-13 (паб). E-mail: anna-anisovich@yandex.ru.

Information about the author

Anisovich Anna, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 10, Kuprevich str., Minsk, 220141, Belarus. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru.



Поступила 12.11.2015

ОБ ЭКСПОРТНЫХ ПОСТАВКАХ ПРОДУКЦИИ ЛИТЕЙНОЙ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИЗ БЕЛАРУСИ, РОССИИ И УКРАИНЫ В СТРАНЫ ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА

EXPORT OF FOUNDRY AND METALLURGICAL PRODUCTS FROM BELARUS, RUSSIA AND UKRAINE TO THE EUROPEAN UNION

Ю. А. НИКОЛАЙЧИК, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,
В. Е. СОБОЛЕВ, Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь

Y. NIKOLAICHIK, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,
V. SOBOLEV, Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Minsk, Belarus

Одним из основных торговых партнеров Беларуси, России и Украины являются страны Европейского Союза. В настоящей статье анализируется уровень экспортных поставок из этих стран в ЕС в 2009–2014 гг. изделий литейного и металлургического производства в соответствии с принятой товарной номенклатурой по группе 72 «Черные металлы». Данные взяты из официальных статистических отчетов Европейского Союза. Дается информация по экспорту из Беларуси, России и Украины в ЕС, общему мировому экспорту в ЕС и данные по трем крупнейшим странам-экспортерам в страны ЕС по каждой позиции указанной группы. Сделан анализ тенденций развития поставок, приведены некоторые выводы по работе данных трех стран с ЕС.

The EU is one of the main trade partners of Belarus, Russia and Ukraine. The export operations between these countries and EU of foundry and metallurgical products according to Harmonized Commodity Description (Group 72 «Iron and Steel») in 2009–2014 are analyzed. The information of three biggest export countries to EU is given on every of the abovementioned positions of HCD. Analysis of trends and variations of export from Belarus, Russia and Ukraine and some conclusions are given in the article.

Ключевые слова. Экспортные поставки в ЕС, черные металлы, гармонизированная товарная номенклатура.

Keyword. Exports to the European Union, iron and steel, harmonized commodity description.

Введение

Крупным мировым потребителем, и вместе с тем, производителем изделий литейной и металлургической промышленности является Европейский Союз – объединение 28 стран с населением свыше 500 млн. человек (Австрия, Бельгия, Болгария, Великобритания, Венгрия, Греция, Дания, Германия, Ирландия, Испания, Италия, Кипр, Латвия, Литва, Люксембург, Мальта, Нидерланды, Польша, Португалия, Румыния, Словакия, Словения, Финляндия, Франция, Хорватия, Чехия, Швеция, Эстония).

Европейский Союз – один из основных партнеров Беларуси, России и Украины. В табл. 1–18 на основании официальных статистических данных Европейского Союза дается сводная информация по объему экспорта продукции литейной и металлургической промышленности по международной товарной номенклатуре – раздел XV, группа «Черные металлы», позиции 7201, 7202, 7203, 7204, 7205, 7206, 7207, 7208, 7209, 7210, 7211, 7212, 7213, 7214, 7215, 7216, 7217 и 7218 из Беларуси, России и Украины в страны ЕС в тысячах евро с 2009 по 2014 гг., а также общий мировой стоимостной объем поставок в ЕС по указанным позициям.

Отдельной строкой дается перечень трех основных стран-экспортеров мира в ЕС по каждой указанной выше товарной позиции за каждый год в период с 2009 по 2014 год. Проводится анализ экспортных поставок по указанным товарным позициям и даются некоторые выводы.

Объемы экспорта из Беларуси, России и Украины в страны ЕС

1. Товарная позиция 7201 (табл. 1) – чугуны переплавленные и зеркальные в чушках, болванках или прочих первичных формах (в тысячах евро).

В данную позицию входят:

720110 – чугун переделный нелегированный, содержащий 0,5% или менее фосфора; менее 0,4% марганца (даются и некоторые другие показатели по кремнию, марганцу и фосфору);

720120 – чугун переделный нелегированный, содержащий более 0,5% фосфора;

720150 – чугун переделный нелегированный; чугун зеркальный (с заданными характеристиками по титану и ванадию).

Т а б л и ц а 1. Товарная позиция 7201 (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна-экспортер	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	–	–	–	–	–	–
Россия	313 971	435 154	553 693	447 721	376 534	368 528
Украина	67 576	147 636	300 118	203 992	291 364	299 334
Мировой экспорт в ЕС	536 446	803 026	1130 715	929 158	883 814	963 442
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	Россия Украина Бразилия	Россия Украина Ю. Африка	Россия Украина Бразилия	Россия Украина Ю. Африка	Россия Украина Бразилия	Россия Украина Бразилия

2. Товарная позиция 7202 (табл. 2) – ферросплавы.

В данную позицию входят:

720211 – ферромарганец, содержащий более 2% углерода; в гранулах размером не более 5 мм и с содержанием марганца более 65%; прочий;

720221 – ферросилиций, содержащий более 55% кремния;

720229 – прочий, содержащий от 4 до 10% магния;

7202300000 – ферросиликомарганец;

720241 – феррохром, содержащий более 4% углерода;

720249 – феррохром прочий, содержащий от 0,05 до 4% углерода;

7202500000 – ферросиликохром;

7202600000 – ферроникель;

7202700000 – ферромолибден;

7202800000 – ферровольфрам и ферросиликовольфрам; прочие (плюс несколько других позиций).

Т а б л и ц а 2. Товарная позиция 7202 – ферросплавы (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	2	2	–	–	–	250
Россия	308 314	512 063	450 511	523 647	357 100	114 685
Украина	246 159	503 737	464 399	397 766	281 237	246 511
Мировой экспорт в ЕС	3301 647	5541 609	6064 361	5341 400	4482 909	43350726
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	Ю. Африка Норвегия Россия	Ю. Африка Норвегия Россия	Ю. Африка Норвегия Бразилия	Ю. Африка Норвегия Бразилия	Ю. Африка Норвегия Россия	Ю. Африка Бразилия Норвегия

3. Товарная позиция 7203 (табл. 3) – продукты прямого восстановления железной руды и прочее губчатое железо в кусках, окатышах или аналогичных формах.

В данную позицию входят:

7203100000 – продукты прямого восстановления железной руды;

7203900000 – прочие.

Т а б л и ц а 3. Товарная позиция 7203 (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	–	–	–	–	–	–
Россия	92 771	201 791	267 071	332 441	265 496	223 416
Украина	–	–	–	3 018	–	–
Мировой экспорт в ЕС	175 880	401 931	588 077	545 172	538 906	467 920
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	Россия Венесуэла Тринидад	Россия Тринидад Ливия	Россия Тринидад Венесуэла	Россия Венесуэла Тринидад	Россия Венесуэла Тринидад	Россия Тринидад Ливия

4. Товарная позиция 7204 (табл. 4) – отходы и лом черных металлов; слитки черных металлов для переплавки (шихтовые слитки).

В данную позицию входят:

7204100000 – отходы и лом литейного чугуна и легированной стали;

720421 – коррозионностойкой стали;

720429000 – прочей стали;

7204300000 – отходы и лом черных металлов, покрытых слоем олова; отходы и лом, прочие;

720441 – токарная стружка, обрезки, обломки, опилки, отходы обрезки и штамповки, пакетированные или непакетированные;

720449 – прочие;

7204500000 – слитки для переплавки (шихтовые слитки).

Т а б л и ц а 4. Товарная позиция 7204 – (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	3557	3438	5015	4594	8492	7620
Россия	334 510	569 173	516 910	521 690	353 613	445 667
Украина	24 252	49 744	27 380	17 890	20 205	9430
Мировой экспорт в ЕС	1036 871	2030 930	2130 412	1739 461	1342 306	1387 652
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	Россия США Швейцария	Россия Швейцария США	Россия США Швейцария	Россия Швейцария США	Россия Швейцария США	Россия Швейцария США

5. Товарная позиция 7205 (табл. 5) – гранулы и порошки из переделного и зеркального чугунов, черных металлов.

В данную позицию входят:

7205100000 – гранулы; порошки;

7205 210000 – из легированной стали;

7205 290000 – прочие.

Т а б л и ц а 5. Товарная позиция 7205 (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	876	2113	3428	2880	3623	2536
Россия	1749	1509	2794	2151	2627	3098
Украина	5832	9476	8122	7965	7516	5297
Мировой экспорт в ЕС	115 330	181 424	19 4347	186 469	185 371	179 323
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	Канада США Япония	США Канада Китай	США Канада Китай	США Канада Китай	США Канада Япония	США Канада Япония

6. Товарная позиция 7206 (табл. 6) – железо и нелегированная сталь в слитках или прочих первичных формах (кроме железа товарной позиции 7203).

В данную позицию входят:

7206100000 – слитки;

7206900000 – прочие;

Т а б л и ц а 6. Товарная позиция 7206 (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	1668	2152	–	–	–	–
Россия	26 579	35 779	89 528	23 368	14 513	23 318
Украина	6139	4197	2810	3693	3114	3614
Мировой экспорт в ЕС	58 910	80 467	171 993	145 026	83 405	124 738
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	Россия Норвегия Венесуэла	Россия Норвегия Украина	Россия Норвегия Китай	Китай Норвегия Россия	Китай Норвегия Россия	Сербия Россия Китай

7. Товарная позиция 7207 (табл. 7) – полуфабрикаты из железа или нелегированной стали.

В данную позицию входят:

720711, 720712, 720719, 720720 – полуфабрикаты из железа или нелегированной стали (с разделением на подразделы по содержанию углерода, размерам, форме, толщине и способу производства – катаные, непрерывное литье, кованные).

Т а б л и ц а 7. Товарная позиция 7207 (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	64 971	106 072	144 559	45 863	48 629	28 699
Россия	803 153	1324 316	1587 176	1146 488	974 607	1067 354
Украина	568 787	1312 959	1703 558	1378 150	1526 815	1268 802
Мировой экспорт в ЕС	1716 796	3036 948	4277 851	3258 690	2900 305	2734 630
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	Россия Украина Мексика	Россия Украина Беларусь	Украина Россия Бразилия	Украина Россия Бразилия	Украина Россия Швейцария	Украина Россия Бразилия

8. Товарная позиция 7208 (табл. 8) – прокат плоский из железа или нелегированной стали шириной 600 мм или более, горячекатаный, неплакированный, без гальванического или другого покрытия.

В данную позицию входят:

7208100000 – в рулонах, без дальнейшей обработки;

7208250000, 7208260000, 7208270000, 7208360000, 7208370000, 7208380000, 7208390000 – разделение по толщине проката;

7208400000 – не в рулонах, без дальнейшей обработки, кроме горячей прокатки;

720851 – разделение по толщине, ширине и методам прокатки.

Т а б л и ц а 8. Товарная позиция 7208 (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	–	–	18	1339	6299	4985
Россия	380 801	613 193	621 950	719 966	659 927	658 561
Украина	380 227	677 798	1057 307	664 347	672 703	724 720
Мировой экспорт в ЕС	2170 128	3446 908	4774 306	2817 232	2769 803	2962 936
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	Россия Украина Китай	Китай Украина Россия	Украина Россия Китай	Россия Украина Китай	Украина Россия Китай	Украина Россия Китай

9. Товарная позиция 7209 (табл. 9) – прокат плоский из железа или нелегированной стали шириной 600 мм и более, холоднокатаный, неплакированный, без гальванического или другого покрытия.

В данную позицию входят:

720915-16-17-180000 – в рулонах с разделением по толщине, прочий;

720916-17-181000 – в рулонах из электротехнической стали;

720925-26-27-280000 – не в рулонах с разделением по толщине; прочий;

7209261-271-281 – не в рулонах из электротехнической стали.

Т а б л и ц а 9. Товарная позиция 7209 (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	–	–	19	44	191	2
Россия	127 436	246 057	205 606	229 931	327 116	309 003
Украина	43 916	71 764	129 795	72 403	76 064	73 628
Мировой экспорт в ЕС	522 282	653 235	117 545	671 507	904 342	899 941
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	Россия Турция Китай	Россия Украина Китай	Китай Россия Украина	Китай Россия Украина	Китай Россия Украина	Китай Россия Украина

10. Товарная позиция 7210 (табл. 10) – прокат плоский из железа или нелегированной стали шириной 600 мм и более, плакированный, с гальваническим или другим покрытием.

В данную позицию входят:

721011-12-20-30-41-49-50-61-69-70-90 – разделение по толщине, виду покрытий, форме, окраске.

Т а б л и ц а 10. Товарная позиция 7210 (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	–	111	–	34	73	417
Россия	59 125	35 818	24 556	7710	15 325	8878
Украина	3751	1344	1752	891	772	218
Мировой экспорт в ЕС	1843 400	2344 160	3320 776	2272 051	2161 037	2412 290
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	Ю. Корея Индия Тайвань	Ю. Корея Индия Тайвань	Ю. Корея Индия Тайвань	Ю. Корея Индия Тайвань	Ю. Корея Индия Тайвань	Ю. Корея Индия Тайвань

11. Товарная позиция 7211 (табл. 11) – прокат плоский из железа или нелегированной стали шириной менее 600 мм, неплакированный, без гальванического или другого покрытия.

В данную позицию входят:

721113-14-190000 – без дальнейшей обработки, кроме горячей прокатки, с разделением по виду прокатки, ширине и толщине;

7211232-33-38000 – разделение по толщине и виду стали;

721190 – прочий.

Т а б л и ц а 11. Товарная позиция 7211 (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	–	585	1297	2709	2396	2149
Россия	56 827	68 366	75 745	60 352	52 263	63 502
Украина	4336	4522	8349	10 941	1849	558
Мировой экспорт в ЕС	148 970	168 979	229 473	184 947	150 177	160 913
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	Россия Швейцария Норвегия	Россия Швейцария Норвегия	Россия Швейцария Индия	Россия Швейцария Украина	Россия Швейцария Норвегия	Россия Швейцария Турция

12. Товарная позиция 7212 (табл. 12) – прокат плоский из железа или нелегированной стали шириной менее 600 мм, плакированный, с гальваническим или другим покрытием.

В данную позицию входят:

721210-20-30-40-50-6000000 – разделение по виду покрытий и окраске.

Т а б л и ц а 12. Товарная позиция 7212 (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	–	9	17	13	6	68
Россия	2271	6622	4642	4652	5868	4345
Украина	381	10	1	35	22	1
Мировой экспорт в ЕС	109 521	151 992	157 666	145 161	148 349	148 214
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	США Япония Ю. Корея	США Япония Ю. Корея	США Япония Ю. Корея	США Япония Ю. Корея	США Ю. Корея Япония	США Ю. Корея Япония

13. Товарная позиция 7213 (табл. 13) – прутки горячекатаные в свободно смотанных бухтах из железа или нелегированной стали.

В данную позицию входят:

7213100000 – имеющие выемки, выступы и пр., полученные при прокатке;

7213200000 – из автоматной стали;

721391 – круглого сечения диаметром менее 14 мм, в том числе для армирования бетона и шинного корда;

721391410-490-700-900 – разделение по содержанию углерода.

Т а б л и ц а 13. Товарная позиция 7213 (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	20 487	13 836	11 551	15 796	9943	3968
Россия	29 862	32 828	23 297	43 359	39 663	47 527
Украина	78 218	146 702	191 529	98 416	117 404	133 513
Мировой экспорт в ЕС	392 771	536 240	611 225	536 206	553 923	598 081
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	Турция Швейцария Украина	Украина Швейцария Турция	Украина Швейцария Турция	Швейцария Украина Норвегия	Швейцария Украина Турция	Украина Швейцария Турция

14. Товарная позиция 7214 (табл. 14) – прутки из железа или нелегированной стали, без дальнейшей обработки, кроме ковки, горячей прокатки, горячего волочения или горячего экструдирования, включая прутки, скрученные после прокатки.

В данную позицию входят:

7214100000 – кованые;

7214200000- имеющие выемки, выступы и пр., полученные при прокатке;

7214300000 – из автоматной стали;

721491 – прямоугольного (кроме квадратного) сечения, с разделением по содержанию углерода;

721499100 – для армирования бетона;

72149310 -390- 500–710–790–950-разделение по диаметру и содержанию углерода.

Т а б л и ц а 14. Товарная позиция 7214 (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	80 565	95 068	114 927	115 751	89 991	137 906
Россия	49 094	68 970	108 355	90 440	81 546	72 073
Украина	54 048	80 821	96 911	45 593	18 204	18 220
Мировой экспорт в ЕС	474 952	557 656	794 929	650 151	644 289	858 549
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	Турция Беларусь Украина	Беларусь Швейцария Украина	Беларусь Швейцария Россия	Беларусь Норвегия Россия	Турция Норвегия Беларусь	Турция Беларусь Норвегия

15. Товарная позиция 7215 (табл. 15) – прутки прочие из железа или нелегированной стали.

В данную позицию входят:

72151000000 – из автоматной стали без дальнейшей обработки, кроме холодной деформации;

7215 501110 – прямоугольного (кроме квадратного) поперечного сечения.

Т а б л и ц а 15. Товарная позиция 7215 (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	7	668	2 560	2 104	792	429
Россия	73 144	120 056	163 315	121 545	100 560	100 918
Украина	5 988	7 802	62 779	7 007	3 105	4 780
Мировой экспорт в ЕС	136 501	218 264	347 527	229 415	205 013	217 925
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	Россия Швейцария Украина	Россия Швейцария Украина	Россия Швейцария Украина	Россия Швейцария Китай	Россия Швейцария Китай	Россия Швейцария Китай

16. Товарная позиция 7216 (табл. 16) – уголки, фасонные и специальные профили из железа или нелегированной стали.

В данную позицию входят:

7216100000 – швеллеры, двутавры, без дальнейшей обработки, кроме горячей прокатки, волочения или экструдирования, высотой менее 80 мм;

7216210-220000 – угловые и тавровые профили;

721631-32-33-40-50 – различные профили по форме и высоте свыше 80 мм.

Т а б л и ц а 16. Товарная позиция 7216 (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	–	5	–	34	19	59
Россия	1011	1344	3463	4803	7395	5774
Украина	8046	6879	13 894	29 347	31 922	37 856
Мировой экспорт в ЕС	264 487	180 705	238 867	217 241	263 352	330 901
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	Турция Ю. Корея Швейцария	Турция Ю. Корея Швейцария	Турция Швейцария Ю. Корея	Турция Швейцария Украина	Турция Швейцария Украина	Турция Швейцария Украина

17. Товарная позиция 7217 (табл. 17) – проволока из железа или нелегированной стали.

В данную позицию входят:

721710 – без гальванического или другого покрытия, с разделением по форме и содержанию углерода;

721720 – оцинкованная, с разделением по форме и содержанию углерода;

721630 – с гальваническим или другим покрытием, с разделением по содержанию углерода;

721790 – прочая, с разделением по содержанию углерода.

Т а б л и ц а 17. Товарная позиция 7217 (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	42 113	81 386	88 717	90 152	113 539	124 084
Россия	45 766	43 900	39 374	40 349	42 399	46 060
Украина	35 832	34 950	32 635	21 229	23 101	29 877
Мировой экспорт в ЕС	321 261	410 488	509 587	432 251	448 867	528 553
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	Россия Беларусь Украина	Беларусь Россия Украина	Беларусь Ю. Корея Турция	Беларусь Россия Ю. Корея	Беларусь Турция Россия	Беларусь Турция Россия

18. Товарная позиция 7218 (табл. 18) – сталь коррозионностойкая в слитках или прочих первичных формах.

В данную позицию входят:

721810000 – слитки и прочие первичные формы;

7218100001 – для производства авиационных двигателей;

721891 – прямоугольного (кроме квадратного) поперечного сечения;

721899 – прочая; квадратного поперечного сечения;

7218991100 – квадратная, катаная или полученная непрерывным литьем;

7218991900 – квадратная ковкая;

7218992000 – прочая, катаная или полученная непрерывным литьем;

7218998000 – прочая ковкая.

Т а б л и ц а 18. Товарная позиция 7218 (поставки в ЕС в тысячах евро)

Страна	2009 год	2010 год	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год
Беларусь	17	–	296	33	–	221
Россия	457	156	6 835	19 013	14 779	15 254
Украина	6 587	6 866	1 006	61	231	1 806
Мировой экспорт в ЕС	49 140	53 986	86 877	92 382	70 586	65 140
Три ведущие страны-эксп. в ЕС	США Индия Китай	США Норвегия Ю. Африка	США Индия Китай	США Россия Индия	США Россия Индия	США Россия Индия

Выводы

1. Экспортные поставки из Беларуси, России и Украины по указанным товарным позициям обычно не имеют выраженных объемных тенденций и значительно изменяются по годам.

2. По многим товарным позициям Россия и Украина входят в первую тройку стран мира по объемам экспорта в ЕС. Республика Беларусь в последние годы стабильно занимает первое место по поставкам

в ЕС позиции 7217; занимала первые места по позиции 7214 в 2010, 2011 и 2012 годы и входила в тройку мировых экспортеров в ЕС по этой позиции в 2009, 2013 и 2014 годах; попала в первую тройку экспортеров по позиции 7207 в 2010 г.

3. Учитывая значительную стоимость транспортировки продукции литейного и металлургического производства, вызывает удивление выход на ведущие места по экспорту в ЕС таких стран, как Южная Африка, Бразилия, Мексика, Венесуэла, Тринидад и Тобаго, США, Южная Корея, Индия, Китай, Япония.

4. Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь может подготавливать аналитическо-справочные материалы по поставкам любых товарных позиций литейного и металлургического производств в ЕС или из ЕС (по четырех-, шести- или восьмизначному коду), в том числе и по каждой отдельной стране ЕС и их торговле с конкретными странами мира. Материалы будут подготавливаться по заявкам предприятий и организаций в целях проведения детального анализа и подготовки маркетинговых исследований по возможностям экспорта в ЕС.

Сведения об авторах

Николайчик Юрий Александрович, Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь. E-mail: yuni.06@mail.ru. Тел. +375 17 290-46-87.

Соболев Владимир Евгеньевич, Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, ул. Я. Колоса, 24, 220013, г. Минск, Беларусь. Тел. +375 17 331-11-16.

Information about the authors

Nikolaichik Yuri, Belarusian National Technical University, 65, Nezavisimosti ave., Minsk, Belarus, E-mail: yuni.06@mail.ru. Tel. +375 17 290-46-87.

Sobolev Vladimir, Association of foundrymen and metallurgists of Belarus, 22, Kolas str., Minsk, Belarus, Tel. +375 17 331-11-16.



РЕЗУЛЬТАТЫ 23-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МЕТАЛЛУРГИЯ 2015. БЕЛАРУСЬ»

В рамках 23-й Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия 2015. Беларусь» были организованы четыре круглых стола по актуальным темам металлургического производства.

Круглый стол «Перспективные направления в производстве и эксплуатации огнеупорных материалов, ориентированные на увеличение стойкости футеровки тепловых агрегатов» открыла его руководитель начальник сталеплавильной лаборатории исследовательского центра Бондаренко Ирина Анатольевна, обозначив основные направления по работе с огнеупорными материалами на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», которые в настоящее время наиболее актуальны. Участникам круглого стола был представлен ознакомительный ролик по основным переделам производства продукции на предприятии.

Специалистами технического управления, исследовательского центра и сталеплавильных цехов № 1, 2 БМЗ были представлены доклады по темам:

- «Увеличение срока службы футеровки ДСП-1 в условиях ОАО «БМЗ-управляющая компания холдинга «БМК» (докладчик – технолог (ведущий) технического управления Шкулькова И. И.);
- «Огнеупоры МНЛЗ-2» (докладчик – оператор МНЛЗ-1, 2 сталеплавильного цеха № 1 Яковлев Д. А.);
- «Тенденции по увеличению стойкости периклазоуглеродистых изделий в рабочей футеровке сталеразливочных ковшей в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (докладчик – инженер-технолог исследовательского центра Турыгин А. К.);
- «Использование новых шибберных затворов в условиях ОАО «БМЗ-управляющая компания холдинга «БМК» (докладчик – ковшевой 4-го разряда сталеплавильного цеха № 2 Безоруков О. В.);
- «Увеличение срока службы элементов футеровки вакууматора РН» (докладчик – огнеупорщик 5-го разряда сталеплавильного цеха № 2 Михальцов А. В.).

В докладах были представлены достигнутые результаты проведенных научно-исследовательских работ. Хотелось бы отметить наиболее значимые работы по сталеплавильным печам и сталеразливочным ковшам:

- за счет изменения схемы футеровки при использовании промышленных изделий увеличение стойкости ДСП составило 18,1%, привело к снижению удельных затрат на футеровку и увеличению производительности сталеплавильных агрегатов;
- при проведении ряда мероприятий, включающих как испытания опытных партий периклазоуглеродистых изделий от ряда поставщиков, так и применение добавочных материалов при выпечной обработке стали, увеличение стойкости рабочей футеровки сталеразливочных ковшей составило 20%.

Помимо представителей ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», свои доклады представили участники научно-технической конференции представители заводов-производителей огнеупорной продукции по следующим темам:

- «Сервис агрегатов» – выступил генеральный директор ООО «Управляющая компания «Сибпроект» (г. Новокузнецк, Россия) Каримов С. М.
- «Шлакообразующие смеси для кристаллизатора, особенности технологии производства, преимущества» – выступил директор представительства компании «Yingkou Tasori International Trading Co., Ltd.» (г. Москва, Россия) Третьяк С. П.
- «Опыт применения бетона CERALIT CAST TU86150 для рабочего слоя футеровки днища сталеразливочных ковшей» – выступил начальник отдела инжиниринга ООО «Кералит» (г. Москва, Россия) Попов А. Ю.

- «Использование периклазохромитовых изделий в футеровке вакууматора» – выступил ведущий инженер ООО «Группа «Магнезит» (г. Сатка, Россия) Данильченко С. В.

Представленные доклады нашли свои положительные отзывы у специалистов БМЗ. Темы докладов являлись актуальными для применения в условиях предприятия, по отдельно освещенным вопросам были предложены новые пути увеличения стойкости тепловых агрегатов сталеплавильного производства.

Во второй день конференции был организован ряд встреч технических специалистов БМЗ с представителями заводов-производителей. В рамках данных встреч обсуждались условия эксплуатации огнеупорных материалов в условиях БМЗ, номенклатура производимых материалов огнеупорными предприятиями и возможность проведения их испытаний на предприятии.

В ходе работы круглого стола состоялось общение производителей и потребителей огнеупорных материалов, в котором каждый поделился своим наработанным опытом. Результатом круглого стола по теме огнеупорных материалов явились ТКП на опытные партии огнеупорных материалов, поступившие на БМЗ.

В рамках круглого стола «Перспективы освоения новых для автомобилестроения Беларуси марок стали. Прокаливаемость автомобильных марок стали» обсуждались характеристики и требования, предъявляемые к автомобильным маркам стали. Руководитель круглого стола – начальник Центральной заводской лаборатории ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Барадынцева Елена Петровна.

Одним из многих видов металлопродукции, постоянный спрос на которую внутри страны и за рубежом практически не снижается, является прокат из легированных сталей, предназначенных для изготовления автокомпонентов. Автомобильная промышленность предъявляет к стали очень высокие требования, которые служат составной частью общих требований к современному автомобилю. Прежде всего, это требования к снижению массы изделий и повышению норм безопасности, что предопределяет использование высокопрочных материалов, а также уменьшение стоимости и повышение технологичности производства.

Применение экономнолегированных конструкционных сталей с улучшенными технологическими и эксплуатационными свойствами заставляют производителей проката искать способы снижения себестоимости без существенной потери качества.

Прокаливаемость – наиболее важная характеристика термически обрабатываемых сталей, так как характеризует однородность структуры стали, а также определенный уровень прочностных свойств в реальных деталях и, тем самым, их работоспособность и долговечность.

С докладами о практических и теоретических методах получения результатов испытаний, о важности прогнозирования полосы прокаливаемости в машиностроении выступили специалисты Центральной заводской лаборатории Захоревич С. В. «Оценка прокаливаемости стали методом торцевой закалки», Радионов А. В., Сидоренко Т. И. «Повышение качества и надежности машин и механизмов между производителем и потребителем за счет создания прогнозируемой полосы прокаливаемости автомобильных марок сталей».

Особый интерес вызвал доклад Роговцовой О. В., в котором рассматривался вопрос влияния бора на прокаливаемость в перспективных для предприятия марках стали.

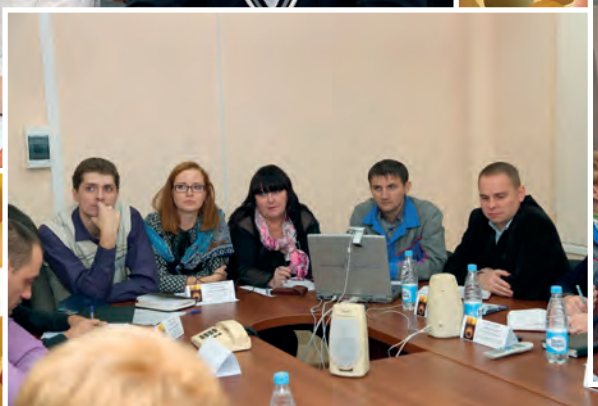
Сотрудниками Объединенного института машиностроения Национальной академии наук Беларуси (г. Минск) представлен доклад «Универсальная программа расчета прокаливаемости конструкционных сталей». Программа разработана специалистами Объединенного института машиностроения НАН Беларуси. Результаты расчетов оказались сопоставимы с практическими результатами полосы прокаливаемости заводских плавок.

На круглом столе обсудили результаты сотрудничества специалистов предприятия Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, ПО «Гомсельмаш», ОАО «Научно-технический центр комбайностроения» (г. Гомель). Результаты обсуждений дали толчок к формированию новых целей и дальнейшему сотрудничеству.

Круглый стол «Комплексные решения по повышению надежности эксплуатации трубопроводов нефтяных месторождений» открыла его руководитель начальник исследовательской лаборатории исследовательского центра Ковалева Ирина Анатольевна.

Такая тема выбрана не случайно, поскольку одной из важнейших проблем в нефтепромысловом машиностроении на сегодняшний день является коррозионное разрушение стальных трубопроводов. Ущерб,





причиненный коррозией, связан с безвозвратной потерей металла, и тем самым включает в себя затраты как на ремонт преждевременно вышедшего из строя оборудования, так и на ликвидацию последствий аварий. Кроме того, аварийность нефтяных трубопроводов несет за собой и экологические проблемы, связанные с загрязнением окружающей среды. Все эти факторы в совокупности приводят к увеличению себестоимости добычи нефти. Сокращение коррозионных потерь возможно за счет более широкого использования в практике накопленных знаний о данном процессе и методов защиты, которые уже внедряются в нефтяной отрасли.

Ознакомительный ролик о технологии изготовления горячекатаных бесшовных труб в условиях трубопрокатного цеха БМЗ представил ведущий калибровщик трубопрокатного цеха Ком О. И.

Большое внимание было уделено контролю качества горячекатаных труб. С докладом на тему «Сортамент и марочный состав труб нефтегазового сортамента производства ОАО «БМЗ» – управляющая компания холдинга «БМК». Контроль качества на этапах производства» выступил Щеглов А. Г., ведущий технолог прокатного отдела технического управления.

Участникам круглого стола также был представлен классификатор дефектов бесшовных горячекатаных труб производства ОАО «БМЗ-управляющая компания холдинга «БМК».

В классификаторе в полном объеме подобраны фотографии (внешний вид дефектов, макро- и микроструктуры), отражающие характерные признаки и их видоизменение в зависимости от стадии технологических переделов при производстве горячекатаных труб (нагрев заготовок, прошивка, раскатка, редуцирование, отделка и т. д.). В нем показаны все дефекты горячекатаных бесшовных труб, среди них есть и уникальные. Практическое значение его огромно. Специалисты РУП «ПО «Белоруснефть» дали высокую оценку работе по созданию классификатора дефектов бесшовных горячекатаных труб.

Необходимо отметить, что на протяжении более чем двух лет специалистами предприятия и Белорусского научно-исследовательского и проектного института нефти (БелНИПИнефть) проводится огромная работа по исследованию коррозионного разрушения поверхностей нефтепроводов после их эксплуатации. Кроме того, была проведена интересная работа по поиску марок сталей, способных обеспечить высокую коррозионную стойкость при эксплуатации в нефтяных скважинах. С результатами проведенной работы участников познакомил Ходосовская Н. А., ведущий инженер-технолог исследовательской лаборатории исследовательского центра.

Одним из видов деятельности РУП «ПО «Белоруснефть» является добыча нефти и попутного нефтяного газа. Транспортируемая продукция содержит агрессивные компоненты (сероводород и углекислый газ), а также постоянно обводняется (рост процента воды в продукции скважин обусловлен длительностью эксплуатации месторождений – более 40 лет). В результате коррозионная агрессивность добываемой продукции увеличивается и, как следствие, увеличивается риск отказов трубопроводов.

Специалист БелНИПИнефть Благодарова Т. А., заведующая центральной лабораторией аналитического исследования представила доклад, в котором рассмотрены вопросы о наиболее широко используемом и достаточно эффективном методе коррозионного мониторинга: это применение гравиметрических образцов-свидетелей коррозии (купонов коррозии), а также о транспортируемой продукции, содержащей агрессивные компоненты и скорости коррозии.

Как известно, специалисты БМЗ активно сотрудничают с высшими учебными заведениями Беларуси. Так, совместно с сотрудниками Белорусского национального технического университета была проведена работа по анализу путей повышения климатической хладостойкости конструкционных низколегированных сталей производства ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК». Результаты работы представил Константинов В. М., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение в машиностроении».

Также Константинов В. М. выступил с докладом на тему «Применение отходов горячего цинкования на ОАО «Речицкий метизный завод» и ГП «Конус» для термодиффузионного цинкования стальных деталей».

Важной особенностью в ходе работы круглого стола стал продуктивный диалог специалистов по вопросам эксплуатации трубопроводов нефтяных месторождений. Участники смогли обсудить все проблемы и ознакомиться с докладами лучших специалистов.

В работе круглого стола «Энергосбережение в металлургии» под руководством начальника бюро по энергосбережению Горевго Александра Валерьевича приняли участие Трусова И. А., заведующая кафедрой «Металлургические технологии» Белорусского национального технического университета, Ровин Л. Е., доцент кафедры «Металлургия и литейное производство» Гомельского государственного тех-

нического университета им. П. О. Сухого, сотрудники ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», УП «БМЗ-Экосервис».

На круглом столе представлены доклады специалистов БМЗ по следующим темам: Сугойды А. Л. «Снижение удельных расходов топливно-энергетических ресурсов на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», Котов И. В. «Повышение энергоэффективности в производстве тепловой энергии. Реконструкция контуров охлаждающей воды. Проблемы и перспективы развития», Востриков С. С. «Достижения и перспективы развития сталеплавильного производства», Зазян А. С. «Интенсификация процессов выплавки стали в ДСП -1».

В рамках работы круглого стола состоялось активное обсуждение заслушанных докладов, прозвучали актуальные предложения по перспективам развития сталеплавильного производства и повышению энергоэффективности.

Обмен мнениями между участниками и приглашенными гостями конференции обозначил возможные варианты модернизации и технического перевооружения производства, а также перспективы сотрудничества с научными организациями Республики Беларусь.

*Материалы подготовлены специалистами
ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»*

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО В СОВРЕМЕННЫХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ РАЗРАБОТКАХ

Прошедшая 21–22 октября 2015 г. конференция на базе ОАО «БМЗ» собрала в г. Жлобине ведущих ученых и специалистов как в области литейного производства и металлургии, так и смежных отраслей и направлений из многих стран. Среди делегатов можно было встретить представителей Беларуси, России, Украины, Германии, Австрии, Чехии, Польши, Италии.

Формат конференции, объединяющий широкий круг смежных отраслей (металлургия, литейное производство, обработка металлов давлением и др.), представляется весьма удачным – позволяющим познакомиться с достижениями и разработками коллег из других научных и технических направлений и поделиться собственными разработками и имеющимися нерешенными вопросами. Ведь известно, что наиболее плодотворными с точки зрения создания новых технологий и технических решений являются работы на стыке научных и технических направлений. Обмен мнениями в такой среде позволяет, если не решить имеющиеся вопросы, то хотя бы взглянуть на них в другой плоскости и рассмотреть нестандартные варианты решений.

Работа секции «Литейное производство» под руководством академика НАН Беларуси Е. И. Маруковича проходила в творческой, дружественной атмосфере. Чисто научные, фундаментальной направленности доклады чередовались с работами прикладного характера. Ко многим из них проявлялся неподдельный интерес, завязывались живые товарищеские дискуссии, которые позволяли разобраться во многих вопросах не только дискуссиями, но и получить полезную информацию всем присутствующим на секции. К слову, работа секции, которая собралась в актовом зале заводоуправления ОАО «БМЗ», проходила при практически полном зале.

Современные разработки в области литейного машиностроения были представлены в докладах ОАО «БЕЛНИИЛИТ» (Садох М. А., широкий спектр научно-технических продуктов в области технологий и оборудования для литейного производства), Инжиниринговой компании «Чандл» (Чандл П. (Австрия), безопасные автоматические формовочные линии DISA), ООО «ТермоТехно» (Маленичев И. А. (Россия), современное оборудование для контроля химического состава материалов).

Вопросы литейного материаловедения представлены в докладах ФТИ НАН Беларуси (Анисович А. Г.), ОИМ НАН Беларуси (Сандомирский С. Г.).

Проблемы формирования в кокиль отливок из специальных износостойких чугунов рассмотрены в докладе ИТМ НАН Беларуси (Короткин Г. П.).

Среди докладов, относящихся к решению прикладных вопросов действующих литейных производств, можно отнести доклады УП «Технолит» (Ровин С. Л.) и ГГТУ им. П. О. Сухого (Ровин Л. Е.), посвященные тематике модернизации ваграночного парка и рециклингу техногенных отходов.

Опыт реконструкции литейного цеха с внедрением технологии литья по газифицируемым моделям был представлен в докладе ОАО «Завод «Легмаш» (Рожанский В. М.).

В целом ход конференции, ее представительность и окончательные итоги подтвердили потребность в ней, как со стороны предприятий, так и со стороны специалистов. Кроме того, можно говорить о рациональности ее проведения в расширенном формате с рассмотрением широкого спектра вопросов из смежных направлений металлургии, литейного производства и материаловедения.

М. А. Садоха, ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

Юбилеем,

Болеслав Мечеславович НЕМЕНЕНОК

(к 65-летию со дня рождения)



5 ноября 2015 года исполнилось 65 лет со дня рождения заведующему кафедрой «Металлургия литейных сплавов» БНТУ, доктору технических наук, профессору Болеславу Мечеславовичу Немененку.

Б. М. Немененок работает на кафедре «Металлургия литейных сплавов» БНТУ с 1974 г. после окончания БПИ и службы в вооруженных силах.

В 1979 г. Б. М. Немененок защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Литейное производство» и с 1980 г. начал педагогическую деятельность на кафедре «Литейное производство черных и цветных металлов» БНТУ.

В 1999 г. Б. М. Немененок защитил докторскую диссертацию и с этого же года возглавил кафедру «Металлургия литейных сплавов».

Б. М. Немененок является научным консультантом научно-исследовательской лаборатории, входит в состав экспертных советов по анализу проектов НИР в области металлургии и ресурсосбережения. В течение 15 лет он был ученым секретарем совета по защите диссертаций по металлургическим специальностям. Сейчас Б. М. Немененок является научным консультантом докторанта, научным руководителем аспиранта и трех магистрантов.

Б. М. Неменок – автор более 200 научных работ, в том числе трех монографий, 38 патентов на изобретения. Он успешно сочетает учебную и научно-исследовательскую работу с учебно-методической.

Заслуги Б. М. Немененка отмечены пятью почетными грамотами БНТУ, нагрудным знаком «Отличник образования Республики Беларусь», почетной грамотой Национальной академии наук Беларуси.

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

От всей души желаем юбиляру крепкого здоровья, благополучия и долгих лет плодотворной творческой деятельности.

*Редакция журнала «Литье и металлургия»
Ассоциация литейщиков и металлургов*



РЕСПУБЛИКАНСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА, ПРЕДЛАГАЕТ СПЕЦИАЛИСТАМ ОЗНАКОМИТЬСЯ С НОВЫМИ ИЗДАНИЯМИ

Металлургическая промышленность

1. Балакин, Юрий Александрович. Термодинамика начала процессов гомогенной и гетерогенной кристаллизации при внешнем модифицирующем воздействии на расплавы металлов / Ю. А. Балакин, С. Н. Жеребцов, М. И. Гладков // Электromеталлургия. – 2015. – № 2. – С. 15–20. – (Теория металлургических процессов). – Библиогр.: с. 20 (18 назв.).

Рассмотрена термодинамика гомогенной и гетерогенной кристаллизации при внешнем модифицирующем воздействии на расплавы металлов. Проведен поиск экстремумов характеристических функций, входящих в термодинамические модели разных вариантов влияния модификатора на кристаллизацию расплавов. Получены оригинальные выражения параметров указанных выше процессов. Сравнение параметров показало, что модификатор изменяет параметры состояния процесса кристаллизации, его ход и результат. Структура литого металла становится более мелкозернистой, что повышает качество слитков и отливок.

2. Влияние микролегирования и температуры выплавки на свойства сплавов ЧС70 и ЧС88 в жидком и твердом состояниях / А. Г. Тягунов [и др.] // Электromеталлургия. – 2015. – № 6. – С. 15–19. – (Теория металлургических процессов). – Библиогр.: с. 19 (6 назв.).

В результате комплексного исследования физических свойств жидких жаропрочных никелевых сплавов определены температурные интервалы структурных превращений, связанные с переводом расплава в гомогенное и микрооднородное состояние. Установлено влияние микролегирования на температуры перехода расплава. Установлена взаимосвязь между состоянием расплава, процессом кристаллизации, структурой и свойствами твердого металла.

3. Получение железоксидного пигмента из пыли металлургического производства для использования в строительстве / Е. Н. Федосеева [и др.] // Металлург. – 2015. – № 5. – С. 31–35. – (Энерго- и ресурсосбережение). – Библиогр.: с. 35 (10 назв.).

Предложена нетрудоемкая технология получения красного железоксидного пигмента из пылевидных железосодержащих отходов металлургической промышленности. Проведен анализ сырьевой базы и рентабельности его производства. Исследованы химические и красящие свойства пигмента, а также представлены некоторые свойства силикатного кирпича и бетонов, окрашенных этим пигментом.

4. Разработка нового способа термического упрочнения для решения экологических задач металлургического производства / Ю. Г. Ярошенко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – № 4. – С. 221–225. – (Ресурсосбережение в черной металлургии). – Библиогр.: с. 224 (9 назв.).

Охлаждение в объеме масла тел сложной формы с разномассивными элементами является пожароопасным, дорогостоящим и неуправляемым процессом с точки зрения отвода тепла от разномассивных элементов. Одним из таких изделий несимметричной конфигурации, для которых применяется такой вид термической обработки, является рельсовая накладка. В ОАО «ВНИИМТ» впервые предложена экологичная технология, а также разработано устройство водяного регулируемого охлаждения рельсовых накладок. Благодаря использованию воды в качестве охлаждающего агента полностью исключается образование вредных выбросов в атмосферу, отсутствует необходимость в постоянных затратах на покупку масла, его замену и утилизацию. Стендовые эксперименты на опытно-промышленном агрегате определили условия получения уровня механических свойств накладок, удовлетворяющие требованиям нормативной документации. Прямолинейность готового изделия обеспечивается раздельной подачей воды на каждый коллектор каждой секции устройства. Представленные результаты стендовых экспериментов послужили основой выбора режимов работы промышленного устройства при освоении рассматриваемой технологии в условиях производства, которая может с успехом заменить традиционную – закалку в объеме масла.

5. Сизяков, Виктор Михайлович. Активизация инновационной деятельности при образовании кластера металлургических предприятий Красноярского края / В. М. Сизяков, А. А. Власов, В. Ю. Бажин // Металлург. – 2015. – № 5. – С. 11–14. – (Экономика. Менеджмент).

Обоснована кластеризация металлургических предприятий на примере металлургических предприятий Красноярского края. Рассмотрены способы активизации инновационной активности при интеграции науки и производства. Предложено объединение алюминиевых предприятий с созданием центра переработки и утилизации их эксплуатационных техногенных отходов.

6. Симонов, В. К. Низкотемпературная металлизация магнетитового концентрата путем интенсифицирующих воздействий / В. К. Симонов, А. М. Гришин // Электromеталлургия. – 2015. – № 4. – С. 22–24. – (Производство черных металлов). – Библиогр.: с. 24 (6 назв.).

Представлены результаты экспериментальных исследований низкотемпературной энергосберегающей металлизации тонкодисперсного магнетитового концентрата глубокого обогащения в псевдоожиженном слое. Реализация процесса в присутствии 1% (мас.) каталитических добавок и повышенном до 0,4 МПа давлении водорода позволила полностью металлизировать шихту при 873–923 К в течение менее получаса. Развита представления о механизме интенсифицирующего влияния примененного комплекса воздействий на реагирующую систему.

7. Химико-технологические особенности ресурсосберегающих процессов при утилизации твердых отходов металлургического производства / И. И. Шепелев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2015. – № 1. – С. 81–86. – (Экологические проблемы химии и химической технологии). – Библиогр.: с. 86 (5 назв.).

Вовлечение в производство глинозема и содопродуктов промышленных отходов ферротитанового производства и отходов шамотного футеровочного кирпича, характеризующихся повышенным содержанием оксида алюминия, обеспечивает извлечение из них ценных компонентов, при этом достигается повышение выхода товарных продуктов и экономия сырьевых компонентов, а также сокращение отвалов, что приводит к снижению вредного воздействия на окружающую среду. При использовании гипсоангидритовых отходов производства фтористого алюминия попутно повышается выход сульфата калия и снижается расход известняка.

Металлургические технологии

1. Аникин, А. Е. Термодинамическое моделирование взаимодействия техногенного микрокремнезема с буроугольным полукоксом / А. Е. Аникин, Г. В. Галевский, В. В. Руднева // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – № 4. – С. 230–234. – (Металлургические технологии). – Библиогр.: 9 назв.

Проведено термодинамическое моделирование высокотемпературных взаимодействий микрокремнезема и буроугольного полукокса. Расчет равновесных составов систем Si-O-C и Si-O-C-H проводился «константным» методом с использованием программы компьютерного моделирования высокотемпературных химических воздействий PLASMA. Установлено, что в обеих системах процесс карбидообразования является доминирующим.

2. Исследование с применением физического моделирования причин образования горячих трещин в сляках при непрерывной разливке трубной стали / Н. Г. Колбасников [и др.] // Электрометаллургия. – 2015. – № 6. – С. 27–33. – (Моделирование металлургических процессов). – Библиогр.: 9 назв.

С использованием физического моделирования горячей пластичности трубной стали определены температурные интервалы провала пластичности для различных условий охлаждения сляка на УНПС, установлены причины провалов горячей пластичности и указаны пути их устранения.

3. Канаев, А. Т. Особенности формирования градиентных структурно-фазовых состояний в бандажной стали при плазменном упрочнении / А. Т. Канаев, А. В. Богомолов, Е. Н. Решеткина // Сталь. 2015. – № 7. – С. 56–59. – (Металловедение и термическая обработка). – Библиогр.: 6 назв.

Проведены металлографические исследования структурно-фазовых состояний, формирующихся в сечении гребня бандажа при поверхностном плазменном упрочнении. Показано, что по глубине упрочнения отчетливо наблюдается образование нескольких структурных зон разной микротвердости, свидетельствующих о наличии градиентно-слоистой структуры, и при сверхбыстрых скоростях нагрева в ходе поверхностной плазменной закалки фазовые и структурные превращения смещаются в область высоких температур, сильно изменяя кинетику возникновения и роста зародышей новой фазы.

4. Лабораторные и практические исследования агломерационного процесса / Ю. Н. Иванович [и др.] // Металлургия. – 2015. – № 6. – С. 32–38. – (Наука. Техника. Производство).

Представлены материалы исследований влияния нефтекокса и борсодержащей добавки на технологические показатели процесса агломерации. Приведены опытно-промышленные результаты по определению оптимального фракционного состава твердого топлива – нефтекокса для повышения технологической эффективности его использования.

5. Моделирование процесса двухстадийной окислительной плавки лома серебряно-цинковых аккумуляторов, содержащих свинец / Л. С. Стрижко [и др.] // Технология металлов. – 2015. – № 8. – С. 12–18. – (Технология получения черных и цветных металлов). – Библиогр.: 3 назв.

Проведена математическая обработка экспериментальных данных окислительной плавки лома серебряно-цинковых аккумуляторов, содержащих свинец. Определены линейные зависимости, которые позволяют оценить влияние различных параметров на потери серебра в процессе окислительной двухстадийной плавки и качество получаемого металла.

6. Оптимизация термической обработки слитков высокопрочной корпусной стали, модифицированной редкоземельными металлами / В. Г. Миллюц [и др.] // Электрометаллургия. – 2015. – № 7. – С. 2–8. – (Производство черных металлов). – Библиогр.: 13 назв.

Предложена технология производства высокопрочной корпусной стали, включающая применение микрокристаллического модификатора с РЗМ и усовершенствованного режима предварительной термической обработки слитков. Технология обеспечивает высокую горячую деформируемость слитков и существенное сокращение цикла производства высокопрочной корпусной стали.

7. Панфилова, Л. М. Влияние структурных факторов и нитридных упрочняющих фаз на конструкционную прочность проката из сталей нового поколения / Л. М. Панфилова, Л. А. Смирнов // Металлург. – 2015. – № 5. – С. 49–53. – (Наука. Техника. Производство). – Библиогр.: 19 назв.

Рассмотрены структурные факторы и физические характеристики, определяющие конструкционную прочность высокопрочных микрелегированных сталей.

8. Управление структурой и свойствами хромистых белых чугунов путем их модифицирования / Ри Хосен [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – № 6. – С. 412–415. – (Металлургические технологии). – Библиогр.: 7 назв.

Изучена технология получения отливок лопастей дробебетных аппаратов. Произведены анализы загрязненности по неметаллическим включениям, исследованы термограммы и полимеры плотности чугуна с различными раскислителями при разных концентрациях. Показано, что для ускорения процесса формирования тригонального карбида и повышения эксплуатационных свойств хромистых чугунов необходимо модифицирование их комплексными модификаторами, не содержащими кремния.

ЛИТЫЕ ДЕТАЛИ ИЗ ИЗНОСОСТОЙКИХ ЧУГУНОВ

для узлов дробления центробежных мельниц разной производительности

Ускоритель



Узел дробления с ускорителем

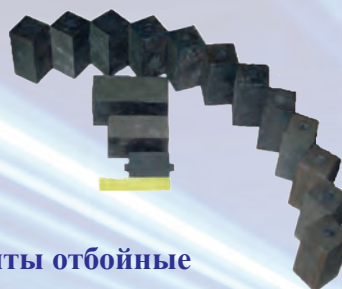
Отбойная плита



Центробежная
мельница



Подкладные листы



Плиты отбойные

Технические характеристики

Размеры плиты отбойной:

- ширина, мм.....	50...85
- высота, мм.....	50...85
- длина, мм.....	90...180
Твердость, HRC.....	60-64

Время работы деталей, изготовленных в ИТМ НАН Беларуси, **в 3,5-4 раза больше**, чем у существующих отечественных аналогов.

Область применения:

Горно-обогатительная и строительная промышленность.

- Используются вторичные местные материалы, при этом себестоимость изделий на 10-15% ниже аналогичных.
- Детали из чугунов ИЧХ18ВН и ИЧХ18ВМ поставляются на такие предприятия, как: ОАО «Полоцк-Стекловолокно», ОАО «Минский завод строительных материалов», УП «НПО Центр», ОАО «Гомельский ГОК», ЗАО «Урал-Омега», г. Магнитогорск, Российская Федерация.

ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЕ ЛИТЬЕ

Заготовки прокатных валков

Сталь Х12МФ.

Твердость после закалки..... не ниже 63 HRC

Диаметр заготовокот 100 до 300 мм

Длинадо 400 мм



Отливки ответственного назначения из нержавеющей сталей 08Х18Н10Т и 08Х17Н13М2Т

Звенья цепи ковшового элеватора, служащего для подъема соли с горизонтов добычи на поверхность земли. Работают в условиях агрессивных соляных сред.



Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси
Беларусь, 212030, г. Могилев, ул. Бялыницкого-Бирули, 11
Факс +375 222 28 01 49 Тел. +375 222 27 93 67



- Комплексные проекты по созданию новых и модернизации действующих литейных предприятий и цехов
- Технологии и оборудование для производства отливок из цветных и железоуглеродистых сплавов
- Смесеприготовительное оборудование
- Технологии и оборудование для производства песчаных стержней
- Формовочное оборудование
- Проектирование и изготовление сложно-профильной оснастки

Оборудование для производства отливок гильз цилиндров



Комплекс оборудования



Машина центробежная карусельная



Машина кокильная карусельная



Машина кокильная однопозиционная специальная



Комплекс кокильный

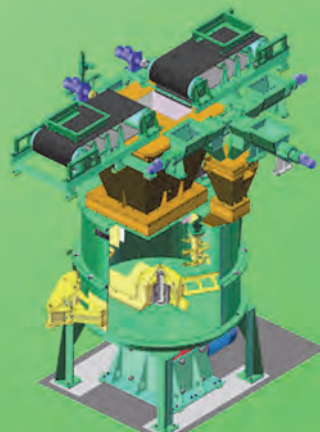
Оборудование для производства отливок в кокиль



Машина стержневая



Комплекс стержневой



Комплекс смесеприготовительный



Комплекс оборудования для изготовления форм и стержней из ХТС



Смесители для приготовления песчано-смоляных смесей

шнековый

скребковый

ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

РБ, 220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 28
Тел.: +375 17 341 0822 Факс: +375 17 340 0322
E-mail: niilit@mail.belpak.by; belniilit@gmail.com
www.belniilit.by



Мы производим

отливки из чугуна марок СЧ15-СЧ25
ГОСТ 1412-85 и ВЧ50 ГОСТ 7293-85
массой от 2 до 19000 кг по чертежам
заказчика. Освоены сложные виды литья для
станкостроения, машиностроения,
автомобилестроения, нефтегазовой и
металлургической промышленности,
метростроя, сельского хозяйства.



Республика Беларусь, 246647,
г. Гомель, ул. Барыкина, 240

Приемная: тел.: + (375 232) 46-44-11;

тел./факс: +(375 232)46-00-90

E-mail: office@glz-centrolit.by

Отдел продаж: тел.: +(375 232) 46-43-80:

т./ф. +(375 232) 46-07-60

E-mail: op@glz-centrolit.by

Отдел маркетинга: тел.: +(375 232) 46-43-79;

тел./факс: + (375 232) 46-05-45

E-mail: glz-centrolit@mail.ru, info@centrolit.com.

www.glz-centrolit.by

Стержневая машина мод. 4751Б1К2

Машина стержневая модели 4751Б1К2 предназначена для изготовления стержней из песчано-смоляных смесей с отверждением их в холодном стержневом ящике, имеющем вертикальный разъем, с последующей продувкой газообразным катализатором (третичный амин, метилформиат, CO_2 и др.).



Комплекс технологический КТ4751Б1К2



Технические характеристики	Параметры
Тип машины	Стержневая однопозиционная
Масса стержня, кг, не более	10
Объем пескодувного резервуара, л	15
Производительность, съёмов в час	60-80
Габаритные размеры стержневого ящика, мм, не более:	
длина	540
ширина	300
высота	320
Тип привода	пневматический
Расход сжатого воздуха, м³/ч	12
Давление воздуха в сети, МПа	0,55-0,63
Род тока питающей сети	переменный, частотой 50 Гц
Напряжение, В	380/220
Установленная мощность, кВт	5,0
Габаритные размеры машины (Д × Ш × В), мм	3885 × 2925 × 2675
Масса машины, кг	4800

Образцы получаемых стержней



Стержневая машина может комплектоваться периферийным оборудованием (смесеприготовление, газогенераторы, нейтрализация, бункерная эстакада) и стержневой оснасткой в составе технологического комплекса **КТ4751Б1К2**.

ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

РБ, 220118, г.Минск, ул.Машиностроителей, 28

Тел.: +375 17 341 0822 Факс: +375 17 340 0322

E-mail: niilit@mail.belpak.by; belniilit@gmail.com

www.belniilit.by

БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЗАГОТОВКИ СТАЛЬ-МЕДНЫЙ СПЛАВ

Биметаллические заготовки обладают физико-механическими характеристиками, присущими отливкам из медных сплавов, но имеют меньшую стоимость. Биметаллические заготовки используются для замены цельнобронзовых ходовых гаек и подшипников скольжения в оборудовании различного назначения.

Технические характеристики:

Основа – низкоуглеродистая сталь;

Наплавленный слой – медный сплав (оловянная, алюминиевая бронза, латуни);

Максимальный наружный диаметр – 200 мм;

Максимальная длина – 350 мм;

Минимальный внутренний диаметр наплавленного слоя – 25 мм;

Припуск на механическую обработку – 1,5 мм.



ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ИЗ АНТИФРИКЦИОННОГО СИЛУМИНА

Антифрикционный силумин – это инновационный перспективный материал, работающий в узлах трения различных машин и механизмов, вместо антифрикционных бронз и латуней. Технические свойства заготовок из антифрикционного силумина: твердость 110–160 НВ; временное сопротивление разрыву 300–450 МПа; относительное удлинение 1–5%; коэффициент трения скольжения со смазкой 0,17–0,21, при сухом трении 0,26–0,30; интенсивность изнашивания со смазкой $1,5\text{--}3,0 \text{ кг/м}^3 \cdot 10^{-7}$, без смазки – $2,5\text{--}5,0 \text{ кг/м}^3 \cdot 10^{-7}$. По результатам промышленных испытаний детали из антифрикционного силумина



по механическим свойствам и износостойкости превосходят в 2–6 раз аналогичные из бронз (БРАЖ9-4, БрОЦС5-5-5 и др.), но дешевле их в несколько раз. Заготовки из антифрикционного силумина поставляются более чем на 20 предприятий Республики Беларусь и России для изготовления направляющих втулок, подшипников скольжения, вкладышей, шестерен червячных колес, поршней гидроцилиндров и др.

ПОЛУЧЕНИЕ ЗАГОТОВОК НАПРАВЛЕННЫМ ЗАТВЕРДЕВАНИЕМ - ГАРАНТИЯ ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА И РЕСУРСА РАБОТЫ ДЕТАЛЕЙ

Разработанная технология литья позволяет получать полые заготовки формы тел вращения Ø 40–200 мм с толщиной стенки 10–35 мм из различных типов чугунов: с пластинчатым и шаровидным графитом, белого высокохромистого, аустенитного никелевого и др.

Детали, полученные на основе новой технологии, обладают значительно более высокими эксплуатационными характеристиками по сравнению с существующими. Например: диск тормозной из высокохромистого чугуна – повышение ресурса работы в 2–4 раза по сравнению с деталями из легированных конструкционных сталей; заготовки из никелевого аустенитного чугуна – немагнитные, ростоустойчивые при температуре до -60°C, высокий ресурс работы, хорошая обрабатываемость, отсутствие литейных дефектов; пуансоны и фильеры из специального чугуна – повышение ресурса работы пуансонов в 15–18 раз, фильер в десятки раз по сравнению с легированными конструкционными сталями; заготовки и червячные колеса из специального серого чугуна – повышение ресурса работы в 2–5 раз по сравнению с червячными колесами из бронзы БрА9Ж4 и БрО10НФ1; гильзы цилиндров из серого специального чугуна – повышение прочности в 1,16 и износостойкости в 1,47 раза по сравнению с серийными гильзами, в том числе иностранного производства.



**ИНСТИТУТ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛОВ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ**
Беларусь, 212030, г. Могилев, ул. Бялыницкого-Бирули, 11
Факс +375 222 28 01 49 Тел. +375 222 27 93 67
info@itm.by <http://www.itm.by>