

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 63 Номер 7 2020



• МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛЬНОГО ПОЛУПРОДУКТА В КОНВЕРТЕРАХ И ДСП ПОД МАГНЕЗИАЛЬНЫМИ ШЛАКАМИ

• ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА ГОРОДА НОВОКУЗНЕЦК В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

• МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ЖИДКОФАЗНОЕ БОРИРОВАНИЕ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ

• ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА КУСКОВ ХРУПКОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ДРОБЛЕНИИ В ОДНОВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКЕ С УПОРОМ НА ВАЛКЕ

• ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

СЕЛЕКТИВНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗА И ФОСФОРА ИЗ ООЛИТОВОЙ РУДЫ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 7, 2020

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 63

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Главный редактор: ЛЕОНТЬЕВ Л.И.
(Российская Академия Наук, г. Москва)

Заместитель главного редактора: ПРОТОПОПОВ Е.В.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Заместитель ответственного секретаря: БАЩЕНКО Л.П.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Члены редакционной коллегии:

АЛЕШИН Н.П. (Российская Академия Наук, г. Москва)
АСТАХОВ М.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
АШИХМИН Г.В. (ОАО «Институт Цветмет-обработка», г. Москва)
БАЙСАНОВ С.О. (Химико-металлургический институт им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан)
БЕЛОВ В.Д. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
БРОДОВ А.А., редактор раздела «**Экономическая эффективность металлургического производства**» (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва)
ВОЛЫНКИНА Е.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ГЛЕЗЕР А.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ГОРБАТЮК С.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ГРИГОРОВИЧ К.В., редактор раздела «**Металлургические технологии**» (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
ГРОМОВ В.Е. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ДМИТРИЕВ А.Н. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)
ДУБ А.В. (ЗАО «Наука и инновации», г. Москва)
ЖУЧКОВ В.И. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)
ЗИНГЕР Р.Ф. (Институт Фридриха-Александра, Германия)
ЗИНИГРАД М. (Институт Ариэля, Израиль)
ЗОЛОТУХИН В.И. (Тульский государственный университет, г. Тула)
КОЛМАКОВ А.Г. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

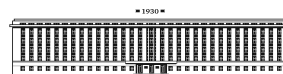
КОЛОКОЛЬЦЕВ В.М. (Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)
КОСТИНА М.В. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
КОСЫРЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)
КУРГАНОВА Ю.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)
КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЛИНН Х. (ООО «Линн Хай Терм», Германия)
ЛЫСАК В.И. (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)
МЕШАЛКИН В.П. (Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва)
МУЛЮКОВ Р.Р. (ФГБУН Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа)
МЫШЛЯЕВ Л.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
НИКУЛИН С.А. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
НУРУМГАЛИЕВ А.Х. (Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Караганда, Республика Казахстан)
ОСТРОВСКИЙ О.И. (Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия)
ПИЕТРЕЛЛИ ЛОРИС (Итальянское национальное агентство по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию, Рим, Италия)
ПОДГОРОДЕЦКИЙ Г.С., редактор раздела «**Ресурсосбережение в черной металлургии**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., редактор раздела «**Инновации в металлургическом и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах**» (Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)

РАШЕВ Ц.В., редактор раздела «**Стали особого назначения**» (Академия наук Болгарии, Болгария)
РУДСКОЙ А.И. (Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)
СИВАК Б.А. (АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва)
СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «**Экология и рациональное природопользование**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
СМИРНОВ Л.А. (ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург)
СОЛОДОВ С.В., редактор раздела «**Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
СПИРИН Н.А. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)
ТАНГ ГУОИ (Институт перспективных материалов университета Цинхуа, г. Шеньжень, Китай)
ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ФИЛОНОВ М.Р., редактор раздела «**Материаловедение**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЧУМАНОВ И.В. (Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск)
ШЕШУКОВ О.Ю. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)
ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)
ЮРЬЕВ А.Б. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ЮСУПОВ В.С. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати
Сибирским государственным индустриальным университетом

Адреса редакции:

119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Тел.: (495) 638-44-11, (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@misis.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Новокузнецк,
Кемеровская обл. – Кузбасс, ул. Кирова, зд. 42
Сибирский государственный индустриальный университет,
Тел.: (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» по решению ВАК входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» индексируется в международной базе данных Scopus.

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций ПИ № ФС77-35456

IZVESTIYA

VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

Editor-in-Chief: LEONTEV L.I.
(Russian Academy of Sciences, Moscow)

Deputy Editor-in-Chief: PROTOPOPOV E.V.
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

Deputy Coordinating Editor: BASHCHENKO L.P.
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

Editorial Board:

N.P. ALESHIN (Russian Academy of Sciences, Moscow)
G.V. ASHIKHMIN (JSC "Institute
Tsvetmetobrabotka", Moscow)

M.V. ASTAKHOV (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

S.O. BAISANOV (Abishev Chemical-Metallurgical
Institute, Karaganda, Republic of Kazakhstan)

V.D. BELOV (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

A.A. BRODOV, Editor of the section "**Economic efficiency of metallurgical production**" (IP Bardin Central
Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow)

I.V. CHUMANOV (South Ural State Research
University, Chelyabinsk)

A.N. DMITRIEV (Institute of Metallurgy, Ural
Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural Federal
University, Ekaterinburg)

A.V. DUB (JSC "Science and Innovations", Moscow)

M.R. FILONOV, Editor of the section "**Material science**" (National Research Technological University
"MISIS", Moscow)

A.M. GLEZER (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

S.M. GORBATYUK (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

K.V. GRIGOROVICH, Editor of the section "**Metallurgical Technologies**" (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

V.E. GROMOV (Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk)

A.G. KOLMAKOV (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

V.M. KOLOKOL'TSEV (Magnitogorsk State Technical
University, Magnitogorsk)

M.V. KOSTINA (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

K.L. KOSYREV (JSC "NPO "TSNIITMash", Moscow)

YU.A. KURGANOVA (Bauman Moscow State
Technical University, Moscow)

V.V. KURNOSOV (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

H. LINN (Linn High Therm GmbH, Hirschbach,
Germany)

V.I. LYSAK (Volgograd State Technical University,
Volgograd)

V.P. MESHALKIN (D.I. Mendeleev Russian Chemical-
Technological University, Moscow)

R.R. MULYUKOV (Institute of Metals Superplasticity
Problems of RAS, Ufa)

L.P. MYSHLYAEV (Siberian State Industrial
University, Novokuznetsk)

S.A. NIKULIN (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

A.KH. NURUMGALIEV (Karaganda State Industrial
University, Karaganda, Republic of Kazakhstan)

O.I. OSTROVSKI (University of New South Wales,
Sydney, Australia)

LORIS PIETRELLI (Italian National Agency for
New Technologies, Energy and Sustainable Economic
Development, Rome, Italy)

G.S. PODGORODETSKII, Editor of the section
"**Resources Saving in Ferrous Metallurgy**" (National
Research Technological University "MISIS", Moscow)

I.YU. PYSHMINTSEV, Editor of the section
"**Innovations in metallurgical industrial and
laboratory equipment, technologies and materials**"
(Russian Research Institute of the Pipe Industry,
Chelyabinsk)

TS.V. RASHEV, Editor of the section "**Superduty steel**"
(Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria)

A.I. RUDSKOI (Peter the Great Saint-Petersburg
Polytechnic University, Saint-Petersburg)

O.YU. SHESHUKOV (Ural Federal University,
Ekaterinburg)

L.M. SIMONYAN, Editor of the section "**Ecology
Rational Use of Natural Resources**" (National Research
Technological University "MISIS", Moscow)

R.F. SINGER (Friedrich-Alexander University, Germany)

B.A. SIVAK (VNIIMETMASH Holding Company,
Moscow)

L.A. SMIRNOV (OJSC "Ural Institute of Metals",
Ekaterinburg)

S.V. SOLODOV, Editor of the section "**Information
Technologies and Automatic Control in Ferrous
Metallurgy**" (National Research Technological University
"MISIS", Moscow)

M. SPEIDEL (Swiss Academy of Materials, Switzerland)

N.A. SPIRIN (Ural Federal University, Ekaterinburg)

TANG GUOI (Institute of Advanced Materials of
Tsinghua University, Shenzhen, China)

M.V. TEMLYANTSEV (Siberian State Industrial
University, Novokuznetsk)

E.P. VOLYNKINA (Siberian State Industrial
University, Novokuznetsk)

A.B. YUR'EV (Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk)

V.S. YUSUPOV (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

V.I. ZHUCHKOV (Institute of Metallurgy, Ural
Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural Federal
University, Ekaterinburg)

M. ZINIGRAD (Ariel University, Israel)

V.I. ZOLOTUKHIN (Tula State University, Tula)

Founders:



National Research Technological University "MISIS"



Siberian State Industrial University

This issue of the journal was prepared by
Siberian State Industrial University

Editorial Addresses:

119991, Moscow, Leninskii prosp., 4
National Research Technological University "MISIS",
Tel.: +7 (495) 638-44-11, +7 (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@sisu.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Novokuznetsk,
Kemerovo Region – Kuzbass, Kirova str., 42
Siberian State Industrial University,
Tel.: +7 (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsu.ru

Journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is included in the "List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, in which should be published major scientific results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences" by the decision of the Higher Attestation Commission.

The journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is indexed in Scopus.

Journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is registered
in Federal Service for Supervision in the Sphere of Mass Communications **PI number FS77-35456**

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Протопопов Е.В., Михайлова Л.Ю. Теоретические основы и технология выплавки стального полупродукта в конвертерах и ДСП под магнезиальными шлаками 491
- Чуманов В.И., Чуманов И.В. О возможности использования порошка оксида иттрия как упрочняющей фазы при центробежном литье коррозионностойких сталей 499
- Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н. Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Лабораторные исследования 504

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Савина И.Н., Водолеев А.С., Захарова М.А., Домнин К.И. Экологическая политика города Новокузнецк в условиях современных требований развития металлургической отрасли 512
- Шубина А.А., Журавлева Н.В., Коротков С.Г., Лазаревский П.П., Романенко Ю.Е. Оценка технологической пригодности полукокса как углеродистого восстановителя при производстве марганцевых и кремнистых сплавов 521
- Ляшенко В.И., Голик В.И., Дятчин В.З. Повышение экологической безопасности снижением техногенной нагрузки в горнодобывающих регионах 529

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Романов Д.А., Иванова О.В., Тересов А.Д. Жидкофазное борирование высокохромистой стали ... 539

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

- Лехов О.С., Михалев А.В. Напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации при получении сортовых заготовок из стали на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Сообщение 1 548
- Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Медведева К.С., Герике П.Б., Фастыковский А.Р. Экспериментальное исследование фракционного состава кусков хрупкого материала при дроблении в одновалковой дробилке с упором на валке 554

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Салихов С.П., Сулеймен Б., Рошин В.Е. Селективное восстановление железа и фосфора из оолитовой руды 560

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Заякин О.В., Ренёв Д.С. Температуры кристаллизации комплексных ферросплавов 568

- К 80-летию со дня рождения Виктора Николаевича Пустовойта .. 571

CONTENTS

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- A.A. Babenko, L.A. Smirnov, E.V. Protopopov, L.Yu. Mikhailova Smelting of steel semi-product in BOF and EAF under magnesian slags 491
- V.I. Chumanov, I.V. Chumanov Possibility of using yttrium oxide powder as a strengthening phase for centrifugal casting of corrosion-resistant steels 499
- N.A. Kozyrev, R.A. Shevchenko, A.A. Usol'tsev, A.N. Prudnikov Welding of differentially heat-strengthened rails. Laboratory studies 504

ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

- I.N. Savina, A.S. Vodoleev, M.A. Zakharova, K.I. Domnin Environmental policy of Novokuznetsk in the context of modern requirements for metallurgical industry development 512
- A.A. Shubina, N.V. Zhuravleva, S.G. Korotkov, P.P. Lazarevskii, Yu.E. Romanenko Technological suitability of semi-coke as a carbon reducer in production of manganese and silicon alloys 521
- V.I. Lyashenko, V.I. Golik, V.Z. Dyatchin Increasing environmental safety by reducing technogenic load in mining regions 529

MATERIAL SCIENCE

- Yu.F. Ivanov, V.E. Gromov, D.A. Romanov, O.V. Ivanova, A.D. Teresov Liquid-phase boriding of high-chromium steel 539

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

- O.S. Lekhov, A.V. Mikhalev Stress-strain state of metal in deformation zone during production of steel section billets on the unit of combined continuous casting and deformation. Report 1 548
- A.G. Nikitin, Yu.A. Epifantsev, K.S. Medvedeva, P.B. Gerike, A.R. Fastyskovskii Experimental study of fractional composition of pieces of brittle material during crushing in a single-roll crusher with block stop on the roll 554

PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

- S.P. Salikhov, B. Suleimen, V.E. Roshchin Selective reduction of iron and phosphorus from oolitic ore 560

SHORT REPORTS

- O.V. Zayakin, D.S. Renev Crystallization temperatures of complex ferroalloys 568

- To the 80th Anniversary of Viktor Nikolaevich Pustovoyt 571

УДК 621.745.45:669.187.25:669.582.2:669.721

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛЬНОГО ПОЛУПРОДУКТА В КОНВЕРТЕРАХ И ДСП ПОД МАГНЕЗИАЛЬНЫМИ ШЛАКАМИ*

Бабенко А.А.¹, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии
цветных металлов (babenko@gmail.com)

Смирнов Л.А.^{1,2}, академик РАН, д.т.н., главный научный сотрудник (sekretar@uim-stavan.ru)

Протопопов Е.В.³, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов (protopopov@sibsiu.ru)

Михайлова Л.Ю.¹, к.т.н., научный сотрудник (ferrosta1@bk.ru)

¹ Институт металлургии УрО РАН

(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

² ОАО «Уральский институт металлов»

(620062, Россия, Екатеринбург, ул. Гагарина, 14)

³ Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. В основу разработки рационального состава основных магнезиальных шлаков и технологических приемов их формирования по периодам продувки конвертерной ванны и периодам плавки в дуговой сталеплавильной печи положены результаты фундаментальных исследований физико-химических свойств шлаков. Реализация в конвертерном цехе ОАО «ЕВРАЗ НТМК» разработанного комплекса технологических приемов формирования в основное время продувки магнезиальных шлаков, обладающих низким агрессивным воздействием на футеровку конвертеров, с сохранением высоких рафинирующих свойств и износоустойчивого гарнисажа на базе магнезиальных конечных шлаков обеспечила рекордную стойкость футеровки конвертеров. Стойкость футеровки конвертеров превышает 7000 плавов, при этом сохраняются высокие технологические и технико-экономические показатели процесса. В работе по переделу низкомарганцовистых чугунов в 350-т большегрузных конвертерах АО «ЕВРАЗ ЗСМК» под магнезиальными шлаками изучены особенности шлакообразования и изменения химического состава шлака по периодам продувки конвертерной ванны. При переделе фосфористых чугунов в 300-т кислородных конвертерах на АО «АрселорМиттал Темиртау» разработан комплекс технологических приемов формирования магнезиальных шлаков рекомендованного химического состава по периодам продувки фосфористых чугунов и износоустойчивого гарнисажа на базе конечных магнезиальных шлаков умеренной основности. Реализация разработанных технологических приемов обеспечила стойкость футеровки кислородных конвертеров более 5000 плавов с сохранением высоких технологических и технико-экономических показателей фосфористого передела. В ЭСПЦ ПАО «Северский трубный завод» разработана технология формирования по периодам плавки ДСП-135 магнезиальных шлаков рационального состава. Внедрение технологии обеспечило рекордную стойкость огнеупорной футеровки печи более 1900 плавов за кампанию и высокий уровень технологических и технико-экономических показателей процесса.

Ключевые слова: конвертер, дуговая сталеплавильная печь, стойкость футеровки, магнезиальные шлаки, раздув шлака, вспенивание шлака, вязкость, химический состав, фазовый состав.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-491-498

ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация технологических операций в конвертерах и в современных дуговых сталеплавильных печах (ДСП) ужесточает требования к эксплуатации огнеупорной футеровки сталеплавильных агрегатов. Стоимость огнеупорной футеровки, затраты на ее монтаж и ремонт составляют значительную часть в себестоимости стали, поэтому увеличение ресурса службы футеровки агрегатов является актуальной задачей. Решение этой задачи направлено на повышение

производительности и улучшение тепловой работы сталеплавильных агрегатов, снижение себестоимости, улучшение качества металлопродукции.

В последние годы в сталеплавильном производстве широкое распространение получила технология выплавки стального полупродукта в кислородных конвертерах и ДСП под магнезиальными шлаками. Формирование магнезиальных шлаков в процессе рафинирования металлического расплава в конвертерах и формирование защитного покрытия (гарнисажа) на огнеупорной футеровке обеспечивают увеличение производительности сталеплавильных агрегатов и снижение энерго- и материалоемкости процесса за счет повышения стойкости огнеупорной футеровки [1 – 11]. Использование технологии выплавки стального полупродукта в ДСП под магнезиальными шлаками обес-

* В работе принимали участие С.А. Ремиго, В.В. Левчук, А.А. Добромиллов, Х.Ш. Кутдусова, К.Н. Демидов, Т.В. Борисова, А.В. Мурзин, М.В. Ушаков.

Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН.

печивает повышение эффективности использования электрической энергии и стойкости футеровки печи за счет раннего формирования устойчивой шлаковой пены и снижения агрессивности воздействия шлака на огнеупорную футеровку [11 – 17]. Например, по данным авторов работы [12] вспенивание шлака по периодам плавки в ДСП снижает расход электроэнергии на 5 – 10 %, а расход огнеупоров – на 25 – 65 %.

В настоящей работе приведены результаты разработки и внедрения технологии выплавки стального полупродукта под магнезиальными шлаками рационального состава, формируемыми по периодам продувки углеродистого полупродукта (ванадиевый передел), низкомарганцовистого и фосфористого чугунов в кислородных конвертерах и по периодам плавки в современных ДСП.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫПЛАВКИ СТАЛЬНОГО ПОЛУПРОДУКТА В КОНВЕРТЕРАХ И ДСП ПОД МАГНЕЗИАЛЬНЫМИ ШЛАКАМИ

Перспективным направлением повышения эффективности технологии выплавки стального полупродукта в кислородных конвертерах и современных ДСП является работа сталеплавильных агрегатов под магнезиальными шлаками [1 – 9, 11 – 14]. Однако практика показывает, что смещение химического состава магнезиальных шлаков в область пересыщения MgO зачастую сопровождается ухудшением рафинирующих свойств шлаков и, соответственно, технико-экономических показателей процесса [6, 7, 15]. Формирование магнезиальных шлаков рационального состава, обеспечивающего формирование устойчивой шлаковой пены, низкое агрессивное воздействие на огнеупорную футеровку с сохранением высоких рафинирующих свойств, является актуальной задачей, для решения которой был выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований [18 – 21]:

- численное моделирование влияния температуры и химического состава шлака на концентрацию насыщения оксидом магния;
- исследование термодинамики и макрокинетики процесса дефосфорации металла под магнезиальными шлаками с различной степенью насыщения оксидом магния;
- изучение вязкости магнезиальных шлаков в области насыщения MgO и ее роль в эффективности формирования устойчивой шлаковой пены;
- изучение влияния химического и фазового состава конечных магнезиальных шлаков на особенности формирования на поверхности огнеупорной футеровки защитного слоя (гарнисажа);
- анализ влияния химического состава шлаков окислительного периода плавки в ДСП на уровень вспенивания шлака и отдельные технико-экономические показатели процесса.

Результаты выполненных фундаментальных исследований были положены в основу разработки рационального состава магнезиальных шлаков и технологических приемов их формирования по периодам продувки конвертерной ванны и по периодам плавки в ДСП.

ВЫПЛАВКА СТАЛЬНОГО ВАНАДИЕВОГО ПОЛУПРОДУКТА В 160-Т КИСЛОРОДНЫХ КОНВЕРТЕРАХ ПОД МАГНЕЗИАЛЬНЫМИ ШЛАКАМИ

Выплавку стали в 160-т конвертерах ОАО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» (ОАО «ЕВРАЗ НТМК») осуществляют из углеродистого полупродукта при комбинированной продувке с верхней подачей кислорода интенсивностью 450 – 500 m^3/min и инертного газа через донные фурмы с расходом 0,2 – 1,7 m^3/min . Углеродистый полупродукт, получаемый в процессе деванадации чугуна, представляет собой железоуглеродистый расплав (температура 1340 – 1400 °C), содержащий 2,8 – 3,5 % C, менее 0,01 % Si; 0,01 – 0,04 % Mn; 0,02 – 0,08 % V; менее 0,01 % Ti; 0,04 – 0,10 % P; 0,02 – 0,04 % S (по массе).

Принятые на момент проведения исследований в конвертерном цехе комбината расход и режим присадки извести, обожженной кремнийсодержащей добавки (ОКД), марганцевого агломерата и магнезиальных материалов обеспечивали формирование на протяжении всего периода продувки ванны конвертера основных высокомагнезиальных шлаков в области значительного пересыщения MgO . Формирование таких шлаков сопровождалось снижением рафинирующих свойств и не обеспечивало стойкость футеровки конвертеров более 3500 плавов.

Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований [18] были использованы для разработки рационального состава магнезиальных шлаков и технологических приемов их формирования по периодам продувки конвертерной ванны. Для формирования шлаков с низким агрессивным воздействием на огнеупорную футеровку конвертеров и сохранения высоких рафинирующих свойств было рекомендовано в начальный период продувки в диапазоне температур расплава 1350 – 1400 °C и основности шлака 2,0 – 3,0 концентрацию оксида магния в шлаке поддерживать на уровне 6,0 – 7,8 %, в середине продувки – в диапазоне температур 1500 – 1550 °C и основности 3,0 – 4,0 на уровне 6,5 – 8,0 %, в конце продувки – в диапазоне температур 1650 – 1700 °C и основности 3,0 – 4,0 на уровне 8,0 – 9,5 %.

Результаты исследований вещественного состава конечных магнезиальных шлаков [18] показали, что одним из важнейших технологических параметров формирования на поверхности огнеупорной футеровки износостойчивого гарнисажа является основность

шлака. Магнезиальные шлаки основностью не более 3,8 – 4,0, сохраняя высокие рафинирующие свойства, обеспечивают рациональное соотношение высоко- и низкотемпературных ферритных фаз при высокой концентрации высокотемпературной силикатной фазы. Гарнисаж, сформированный на базе таких шлаков, характеризуется повышенной износостойкостью, достигающей не менее 2,0 плавов.

Разработанный комплекс технологических приемов формирования по периодам продувки конвертерной ванны магнезиальных шлаков рекомендованного состава предусматривает присадку в начале плавки совместно с известью, ОКД и марганцевым агломератом высокомагнезиальных флюсов в количестве 70 – 80 % от их общего расхода на плавку. При этом на протяжении основного времени продувки обеспечивается формирование шлаков, стремящихся к насыщению оксидом магния (6 – 8 % MgO), и присадку в заключительный период продувки высокомагнезиальных флюсов в количестве 20 – 30 % от общего расхода материала с одновременным повышением положения фурмы над уровнем ванны до 3,0 – 3,5 м и последующим плавным переходом в рабочее положение по истечении 85 – 90 % общего количества кислорода на плавку [18]. Указанные мероприятия обеспечивают формирование высокомагнезиальных шлаков при значительном пере- насыщении оксида магния MgO (10 – 14 %) и основности в пределах 3,8 – 4,0.

Реализация в конвертерном цехе ОАО «ЕВРАЗ НТМК» разработанного комплекса технологических приемов обеспечила формирование в основное время продувки магнезиальных шлаков, обладающих низкой агрессивностью воздействия на футеровку конвертеров и сохраняющих высокие рафинирующие свойства. Химический состав металла и шлака опытных плавов в соответствии с разработанным режимом формирования шлака приведен в таблице.

Формируемые на протяжении основного (0 – 70 %) периода продувки магнезиальные шлаки находятся в относительно гомогенной области, стремящейся к насыщению оксидом MgO, обеспечивают достаточно высокую степень дефосфорации металла, превышающую 70 %. Смещение конечных магнезиальных шлаков в область значительного перенасыщения оксида MgO при рассматриваемой температуре ванны не ухудшает степень дефосфорации металла, достигающую в среднем 78,4 %.

Соотношение скоростных возможностей рассматриваемых потоков фосфора в магнезиальном шлаке, формируемом в области, стремящейся к насыщению MgO и металлом, в 7,4 раза превышает единицу, что свидетельствует о лимитирующей роли внутридиффузионного фактора в процессе дефосфорации углеродистого полупродукта под магнезиальными шлаками [18]. Интенсификация массообменных процессов в условиях комбинированной продувки обеспечивает более высокие скорости окисления фосфора, что подтверждает лимитирующую роль внутридиффузионного звена.

Освоение разработанного комплекса технологических приемов [18] в совокупности с рядом технических решений (улучшение качества огнеупорных изделий, изменение схемы кладки и регламента эксплуатации футеровки) позволило достичь рекордной стойкости футеровки конвертеров, превышающей 7000 плавов, с сохранением высоких технологических и технико-экономических показателей процесса. Степень дефосфорации низкоуглеродистого металла под магнезиальными шлаками рационального состава достигла в среднем 79,3 % (против 70,5 % на плавках текущего производства). Отмечено сокращение расхода огнеупорного кирпича на футеровку конвертера на 0,07 кг/т стали, кирпича на «подварку» на 0,364 кг/т и ремонтной огнеупорной массы на 0,09 кг/т.

Химический состав металла и шлака опытных плавов в соответствии с разработанным режимом формирования шлака

Chemical composition of the metal and slag of experimental heats in accordance with the developed slag formation mode

Период продувки, %	MgO _ф , %	MgO _н , %	$\frac{MgO_{\phi}}{MgO_n}$	B, ед.	t _{Me} , °C	Содержание, % (по массе)				
						[C]	[P] _ф	[P] _р	$\frac{[P]_{\phi}}{[P]_n}$	ΔP, % отн.
0 – 30	8,3	8,0	1,03	2,0	1425	1,90	0,010	0,0021	4,8	68,7
31 – 70	7,0	7,3	0,96	2,9	1525	1,10	0,006	0,0025	2,4	81,3
71 – 100	14,5	7,9	1,83	3,9	1642	0,07	0,005	0,0035	1,4	84,4

П р и м е ч а н и е. MgO_ф – фактическая концентрация оксида магния в шлаке, %; MgO_н – концентрация насыщения оксида магния в шлаке, %; MgO_ф/MgO_н – степень насыщения шлака оксидом магния; B – основность, выраженная отношением CaO/SiO₂; t_{Me} – температура металла, °C; [C] – концентрация углерода в металле, %; [P] – фактическая концентрация фосфора в металле, %; [P]_р – равновесная концентрация фосфора в металле, %; $\frac{[P]_{\phi}}{[P]_p}$ – отношение фактической концентрации фосфора в металле [P]_ф к равновесному его содержанию [P]_р; ΔP – степень дефосфорации металла, %.

ПЕРЕДЕЛ НИЗКОМАРГАНЦОВИСТЫХ ЧУГУНОВ**В 350-Т БОЛЬШЕГРУЗНЫХ КОНВЕРТЕРАХ****ПОД МАГНЕЗИАЛЬНЫМИ ШЛАКАМИ**

Стойкость футеровки большегрузных конвертеров АО «ЕВРАЗ объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») при использовании флюса ожелезненного магнезиально-известкового (ФОМИ) для выплавки стали и нанесения огнеупорного покрытия (гарнисажа) составляет в среднем 4500 – 5000 плавов при расходе конвертерных огнеупоров 3,5 – 4,0 кг/т стали. При этом формирование огнеупорного покрытия на футеровку путем раздува конечного магнезиального шлака азотом не всегда обеспечивает получение устойчивых результатов.

В текущем производстве достаточно часто приходится использовать специальные технологические приемы для формирования шлакового гарнисажа высокой стойкости [19]. С этой целью, используя результаты опытно-промышленных плавов с дополнительными повалками конвертера, был выполнен анализ влияния режимов продувки ванны конвертера на особенности формирования магнезиальных шлаков. На опытных плавках формирование шлака обеспечивали за счет присадки извести, содержащей не менее 88,5 % CaO, алюминиевой выбойки, содержащей 50 % C, 35 % CaF₂ и 12 % Al₂O₃, и высокомагнезиального флюса ФОМИ, содержащего не менее 66 % MgO. Присадку флюса в конвертер в количестве 15 – 18 кг/т стали выполняли совместно с известью в завалку на металлический лом до его предварительного нагрева, в том числе для ускорения процесса шлакообразования.

Выполненный теоретический анализ фазовых превращений в шлаке по ходу продувки конвертерной ванны на основе диаграммы четырехкомпонентной оксидной системы CaO'–MgO'–FeO'–SiO₂' показал, что оксидные системы, соответствующие шлакам начала продувки, содержат большое количество SiO₂, как правило, кристаллизуются с образованием различных силикатов, вюститита и незначительного количества периклаза. В оксидных системах, соответствующих шлакам середины продувки, возрастает содержание периклаза. В заключительный период продувки магнезиальные шлаки кристаллизуются с образованием двухкальциевого силиката – (2CaO·SiO₂), извести и твердого раствора магнезиовюститита [19]. Количество извести в шлаке связано с величиной основности (CaO/SiO₂), а количество магнезиовюститита – с величиной основности и содержанием MgO и FeO в шлаке. Состав силикатов зависит от соотношения между содержаниями CaO, MgO и FeO_x. При возрастании количества магнезии в шлаке увеличиваются содержания мервинита (3CaO·MgO·2SiO₂) и монтчеллита (CaO·MgO·SiO₂). При увеличении окисленности шлака возрастает содержание кирштайнита – CaO·FeO·SiO₂.

Присадка высокомагнезиального флюса при подготовке шлака к раздуву азотом сопровождается в соответствии с расчетным соотношением равновесных фаз увеличением содержания извести и магнезиовюститита при уменьшении содержания двухкальциевого силиката. При этом происходит изменение состава магнезиовюститита: увеличивается содержание тугоплавкой составляющей (периклаза) и уменьшается содержание легкоплавкой составляющей (вюститита).

Отмечено, что в начальный период продувки при низкой основности шлака содержание MgO не оказывает влияния на насыщение шлака оксидом магния. При повышенном содержании MgO отмечается уменьшение основности, в результате разница между фактическим содержанием магнезии и ее концентрацией насыщения не изменяется. В середине продувки концентрация оксида MgO в окисленном шлаковом расплаве определяет характер воздействия шлака на огнеупорную футеровку агрегата. При повышенном содержании оксида магния в расплаве шлак находится вблизи области насыщения магнезией, а при понижении содержания MgO шлак оказывает коррозионное воздействие на футеровку. В заключительном периоде продувки содержание магнезии определяет степень пересыщения шлака оксидом MgO.

Проведен анализ микроструктуры гарнисажного слоя: значительно больше крупных тугоплавких кристаллов двухкальциевого силиката и периклазидов, которые вместе с нерастворившимися зернами периклаза и извести образуют каркасную структуру и формируют гарнисаж за счет затвердевания шлакового расплава на поверхности футеровки вследствие кристаллизации при отводе тепла через нее.

Повышение износоустойчивости защитного покрытия безусловно требует увеличения в шлаке количества крупных кристаллов кальциооливина. Для раннего формирования кристаллов последнего необходимо обеспечить за счет технологических приемов ускоренное растворение извести в начальный период продувки конвертерной ванны. Только после ошлакования расплавом основного количества извести (не ранее 4 – 5 минуты продувки) рекомендуется присаживать магнезиальные материалы. При этом необходимо поддерживать повышенную окисленность шлака для ускорения процесса растворения флюса и недопущения перекристаллизации периклаза.

ПЕРЕДЕЛ ФОСФОРИСТЫХ ЧУГУНОВ**В 300-Т КИСЛОРОДНЫХ КОНВЕРТЕРАХ****ПОД МАГНЕЗИАЛЬНЫМИ ШЛАКАМИ**

Конвертерный цех АО «АрселорМиттал Темиртау» перерабатывает фосфористые чугуны с широким диапазоном химического состава и температуры. В зависимости от содержания кремния, марганца и фосфора

в чугуне и требований, предъявляемых к качеству готового металла, в цехе используют четыре варианта технологии: одношлаковый процесс, процесс со скачиванием кислого шлака (20 – 30 % основного времени продувки), двухшлаковый процесс со скачиванием шлака по истечении 60 – 70 % времени продувки и трехшлаковый процесс со скачиванием кислого и промежуточного шлака [20].

Ранее используемый шлаковый режим конвертерной плавки независимо от варианта технологии обеспечивал в условиях фосфористого передела формирование конечных магнезиальных шлаков с достаточно высокими рафинирующими свойствами. Однако стойкость футеровки конвертеров не превышала 1700 – 1900 плавов.

Для условий передела фосфористых чугунов разработан рациональный по периодам продувки состав магнезиальных шлаков. В начале продувки в диапазоне температур 1350 – 1400 °С при основности шлака 1,5 – 2,0, содержащего примерно 20 % FeO, концентрацию MgO достаточно поддерживать на уровне 5,8 – 7,0 %; по истечении 60 – 70 % времени продувки при температуре 1500 – 1550 °С при основности шлака 2,0 – 2,5 и содержании FeO примерно 15 % – на уровне 6,3 – 7,7 %; на заключительном этапе продувки при температуре 1600 – 1650 °С, основности шлака 3,0 – 3,5 и содержании FeO примерно 30 % – на уровне 6,0 – 7,0 %.

Для формирования в основное время продувки магнезиальных шлаков указанного состава разработан дифференцированный режим присадки магнезиальных материалов, который включает оставление конечного высокомагнезиального шлака с присадкой в первой половине времени продувки извести и доломита. В дальнейшем после промежуточного скачивания шлака выполняется присадка высокомагнезиального флюса МГФ, содержащего 70 – 80 % MgO в заключительном периоде рафинирования при расходе 75 – 90 % от общего количества кислорода на плавку.

Результаты исследования фазового состава конечных магнезиальных шлаков, формируемых в процессе конвертирования фосфористых чугунов, показали, что магнезиальный шлак основностью 2,9 – 3,0 имеет ярко выраженную мелкокристаллическую структуру, представленную высокотемпературной фазой – силикофосфатом кальция в количестве 33 – 35 % в виде округлых, вытянутых частиц, окружающих высокотемпературную ферритную фазу ожеженного периклаза, который представлен отдельными частицами округлой корродированной формы с наличием на периферии реакционной каемки магнезиовюстита и магнезиоферрита. Мелкие частицы твердых растворов магнезиовюстита и магнезиоферрита наблюдаются во всем объеме матрицы. Суммарное содержание фаз магнезиовюстита и магнезиоферрита и ожеженного периклаза находится в пределах 27 – 29 %. Низкотемпературные ферритные фазы ферритов кальция и вюстита кальция

составляют 25 – 30 % и представлены в виде пленок, расположенных в высокотемпературной матрице. Формируемый на основе таких шлаков гарнисаж характеризуется повышенной износоустойчивостью в пределах не менее двух плавов.

Магнезиальные шлаки с повышенной до 3,5 основностью характеризуются значительно меньшим количеством высокотемпературных силикатных и ферритных фаз. Силикофосфат кальция в количестве 28 – 30 % представлен чередующимися, прерывистыми, округло-вытянутыми частицами. Все остальное пространство между частицами силикофосфата кальция заполнено серией твердых растворов феррита и вюстита кальция, концентрация которых достигает 38 – 41 %. Наличие высокой доли легкоплавких ферритных фаз, выполняющих роль цементирующей связки между высокотемпературными фазами, не обеспечивает высокой износоустойчивости формируемого гарнисажа, стойкость которого не превышает, как правило, одной плавки.

Внедрение разработанного комплекса технологических приемов формирования магнезиальных шлаков рекомендованного химического состава по периодам продувки фосфористых чугунов и износоустойчивостью гарнисажа на базе конечных магнезиальных шлаков умеренной основности обеспечило стойкость футеровки кислородных конвертеров более 5000 плавов с сохранением высоких технологических и технико-экономических показателей фосфористого передела.

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛЬНОГО

ПОЛУПРОДУКТА В СОВРЕМЕННЫХ ДСП-135

ПОД МАГНЕЗИАЛЬНЫМИ ШЛАКАМИ

В настоящее время в структуре сталеплавильного производства прослеживается устойчивая тенденция увеличения доли выплавки стали в ДСП, которая достигает более 30 %. Одной из основных тенденций улучшения технологических и технико-экономических показателей в электросталеплавильном производстве является работа современных ДСП под магнезиальными шлаками [10 – 17]. К важнейшим свойствам шлака, которые влияют на его «вспениваемость», относят химический состав, основность, вязкость, поверхностное натяжение и наличие взвешенных твердых частиц, которые могут являться центрами зарождения газовых пузырей и стабилизировать пену. Для определения оптимального для вспенивания состава шлака рекомендуют [11, 13, 14, 21] использовать изотермические сечения фазовых диаграмм, анализ которых позволяет считать перспективным формирование магнезиальных шлаков с химическим составом, соответствующим области с магнезиальным вюститом и ларнитом. Такие шлаки будут устойчиво пениться при вдувании углеродсодержащих материалов, а также будут полностью совместимыми с магнезиальными огнеупорами.

В ЭСПЦ ПАО «Северский трубный завод» выполнен комплекс экспериментальных исследований по изучению влияния уровня вспенивания шлака в ДСП-135 на отдельные технико-экономические показатели процесса [21].

Высоту слоя вспененного шлака в ДСП-135 определяют по углу наклона печи и расстоянию между порогом и открытой заслонкой рабочего окна, которые обеспечивают максимальное удержание в печи формируемого объема вспененного шлака.

Оценка влияния высоты слоя вспенивания шлака на технико-экономические показатели процесса выплавки стального полупродукта показала тенденцию к сокращению расхода электроэнергии и времени работы печи под током с увеличением высоты этого слоя. При высоте слоя вспененного шлака 300 – 380 мм процесс выплавки полупродукта в ДСП характеризуется повышенными расходом электроэнергии и временем работы печи под током. Расход электроэнергии на 100 % плавов составляет более 54 МВт·ч, а длительность работы печи под током превышает 39 мин. При высоте шлаковой пены 390 – 510 мм расход электроэнергии изменяется от 49,5 до 54,5 МВт·ч и на 94 % плавов не превышает 54 МВт·ч. При этом на 83 % плавов длительность работы печи под током не превышает 39 мин. Однако при более высоком слое шлаковой пены (более 510 мм) наблюдается тенденция к увеличению расхода электроэнергии и времени работы печи под током. Это обусловлено, по-видимому, тем, что при избыточной толщине слоя шлака происходит перекрытие электродов, что и приводит к срабатыванию максимальной токовой защиты печного трансформатора из-за увеличения концентрации проводящих частиц в шлаке, притягиваемых из пограничного слоя.

Результаты исследования влияния химического состава шлаков на эффективность его вспенивания показывают, что формирование шлаков основностью более 1,9, содержащих 24 – 36 % FeO и не менее 7,2 % MgO, приближающихся к области насыщения MgO, обеспечивает высокую вероятность достижения рекомендованного уровня вспенивания шлака в пределах 390 – 510 мм и, как следствие, пониженный расход электроэнергии (не более 54 МВт·ч) и длительность работы печи под током не более 39 мин.

Исследования вещественного состава шлаков по периодам плавки в ДСП-135 показали, что шлаки умеренной основности с повышенным до 31 % содержанием FeO, формируемые в области насыщения MgO, обладают низкой вязкостью и высокими рафинирующими свойствами, обеспечивают в течение всего периода плавки в ДСП сохранение рекомендованного уровня шлаковой пены за счет присутствия в жидком шлаке большого количества высокотемпературных соединений ларнита, магнезиовюстита и магнезиоферрита, которые являются центрами зарождения пузырей CO

и способствуют вспениванию шлака и формированию устойчивой шлаковой пены [21].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований были положены в основу разработки рационального состава магнезиальных шлаков по периодам плавки в ДСП, обеспечивающих формирование устойчивой шлаковой пены, сохранение высоких рафинирующих свойств, и обладающих низкой агрессивностью воздействия на футеровку печи. В качестве основных технологических приемов формирования таких шлаков было рекомендовано оставлять в печи высокомагнезиальные шлаки окислительного периода (технология работы печи на «болоте»), содержащих 7,5 – 8,5 % MgO, осуществлять в период плавления лома присадку в печь извести, содержащей не менее 92 % CaO, совместно с антрацитом, содержащим 92 – 94 % углерода и в окислительный период при расходе электроэнергии на уровне 75 – 88 % за плавку присадку в два приема высокомагнезиального флюса «Магма», содержащего 70 – 80 % MgO, в количестве 6,5 – 10,0 кг/т стали [21].

Внедрение разработанных технологических режимов формирования магнезиальных шлаков по периодам плавки обеспечило рекордную стойкость огнеупорной футеровки печи более 1900 плавов за кампанию и высокий уровень технологических и технико-экономических показателей процесса. Продолжительность работы печи под током сократилась в среднем на 1,5 мин, удельный расход электроэнергии уменьшился в среднем на 11 кВт·ч/т стали. Отмечено сокращение расхода извести в среднем на 6,7 кг/т стали, углеродсодержащих материалов для вспенивания шлака на 3,9 кг/т стали, расхода огнеупорных материалов на футеровку в среднем на 4,6 кг/т стали, торкрет-массы на ремонт шлакового пояса на 0,7 кг/т стали и заправочных материалов на восстановление откосов на 3,4 кг/т стали. При этом формируемые шлаки сохраняют высокие рафинирующие свойства.

Выводы

Результаты фундаментальных исследований физико-химических свойств основных магнезиальных шлаков были положены в основу разработки рационального их состава и технологических приемов формирования по периодам продувки конвертерной ванны и периодам плавки в ДСП.

Реализация в конвертерном цехе ОАО «ЕВРАЗ НТМК» разработанного комплекса технологических приемов формирования в основное время продувки магнезиальных шлаков, обладающих низкой агрессивностью воздействия на футеровку конвертеров с сохранением высоких рафинирующих свойств и износоустойчивого гарнисажа на базе магнезиальных конечных шлаков обеспечила рекордную стойкость футеровки конвертеров, превышающую 7000 плавов, с со-

хранением высоких технологических и технико-экономических показателей процесса.

В работе по переделу низкомарганцовистых чугунов в 350-т большегрузных конвертерах АО «ЕВРАЗ ЗСМК» под магнезиальными шлаками изучены особенности шлакообразования и изменения химического состава шлака по периодам конвертерной плавки.

При переделе фосфористых чугунов в 300-т кислородных конвертерах на АО «АрселорМиттал Темиртау» разработан комплекс технологических приемов формирования магнезиальных шлаков рекомендованного химического состава по периодам продувки фосфористых чугунов и износоустойчивостью гарнисажа на базе конечных магнезиальных шлаков умеренной основности, реализация которых обеспечила стойкость футеровки кислородных конвертеров более 5000 плавов с сохранением высоких технологических и технико-экономических показателей фосфористого передела.

В ЭСПЦ ПАО «Северский трубный завод» разработана технология формирования по периодам плавки ДСП-135 магнезиальных шлаков рационального состава, внедрение которой обеспечило рекордную стойкость огнеупорной футеровки печи более 1900 плавов за кампанию и высокий уровень технологических и технико-экономических показателей процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конвертерное производство стали: состояние, доминирующие тенденции, прогнозы / Е.В. Протопопов, С.Н. Кузнецов, С.В. Фейлер и др. – В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XX Международной научно-практической конференции*. В 2 ч. Ч. 2 / Под ред. Е.В. Протопопова. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2017. С. 4 – 9.
2. Калиш Д., Синельников В.О., Кузлин К. Исследования физико-химических свойств шлака при его разбрызгивании на футеровку кислородного конвертера // *Новые огнеупоры*. 2017. № 3. С. 78 – 83.
3. Leonard R.J., Herron R.H. Dolomite additions required to saturate BOF slags with MgO // *Open Hearth Proceedings*. 1977. Vol. 60. P. 127 – 133.
4. Пантейков С.П. Анализ мирового развития и современное состояние технологий ошлакования футеровки кислородных конвертеров // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2013. № 6. С. 65 – 78.
5. Klages G., Schulz E. Entwicklung der konverter haltbarkeit in den Stalwerken der Thyssen Stahl AG nach Einfuehrung des TBM-Verfahrens // *Thyssen Tech. Ber.* 1984. Vol. 16. No. 2. P. 103 – 108.
6. Sian C., Wenyan Y., Congjie Z. Slag splashing for bao steel's 300-metric ton BOF and crystallographic structure of its slag // *Iron and Steelmaker*. 2000. No. 7. P. 39 – 41.
7. Deo B., Halder J., Snoeijer B., Overbosch A., Boom R. Effect of MgO and Al₂O₃ variations in oxygen steelmaking (BOF) slag in slag morphology and phosphorus distribution // *Ironmaking and steelmaking*. 2005. Vol. 32. No. 1. P. 54 – 60.
8. Martino M., Fenu M., Anfosso A. Refractory lining for oxygen converters: recent experiences in this field. – In: *Proceedings of 5th European Steelmaking Conference*, 26-28 June, 2006, Aachen, Germany. – Dusseldorf: Steel Institute VDEh, 2006. P. 229 – 233.
9. Mills K.C., Su Y., Fox A.B., Li Z., Thackray R.P., Tsai H.T. A review of slag splashing // *ISIJ International*. 2005. Vol. 45. No. 5. P. 619 – 633.
10. Хорошавин Л.Б., Перепелицын В.А., Кононов В.А. Магнезиальные огнеупоры. Справ. изд. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 576 с.
11. Шалимов А.Г. Формирование вспененных шлаков в дуговой сталеплавильной печи // *Электрометаллургия*. 2013. № 9. С. 8 – 13.
12. Luz A.P., Avila T.A., Bonadia P., Pandolfelli V.C. Slag foaming: fundamentals, experimental evaluation and application in the steel-making industry // *Refractories Worldforum*. 2011. Vol. 3. No. 2. P. 91 – 98.
13. Кожухов А.А., Федина В.В., Меркер Э.Э. Исследование процесса вспенивания сталеплавильного шлака и его влияния на тепловую работу дуговой сталеплавильной печи // *Металлург*. 2012. № 3. С. 42 – 44.
14. Sanford D., Garside B., Schonewille C., Mill T. EAF refractory performance at pacific steel // *Iron and Steel Technology*. 2004. Vol. 1. No. 8. P. 48 – 55.
15. Обст К.Х., Штрадтман Ю., Редер М. Воздействие на растворение извести добавками природных и синтетических флюсов // *Черные металлы*. 1978. № 16. С. 834 – 841.
16. Ito K., Fruehan R.J. Study on the foaming of CaO-SiO₂-FeO slags: Part I. Foaming parameters and experimental results // *Metallurgical Transactions*. 1989. Vol. 20 B. No. 4. P. 509 – 514.
17. González O.J.P. et al. Effect of Arc Length on Fluid Flow and Mixing Phenomena in AC electric arc furnaces // *ISIJ International*. 2010. Vol. 50. No. 1. P. 1 – 8.
18. Бабенко А.А., Фомичев М.С., Кривых Л.Ю. и др. Выплавка стали в 160-т конвертерах из углеродистого полупродукта под магнезиальными шлаками // *Сталь*. 2010. № 8. С. 35 – 38.
19. Амелин А.В., Протопопов Е.В., Калиногорский А.Н., Фейлер С.В. Формирование гарнисажа магнезиальных шлаков на футеровку большегрузных конвертеров // *Сталь*. 2014. № 7. С. 22 – 25.
20. Бабенко А.А., Смирнов Л.А. Теория и технология передела фосфористых чугунов в кислородных конвертерах. – Новосибирск: Академиздат, 2018. – 243 с.
21. Ушаков М.В., Бабенко А.А., Мурзин А.В., Кузякин В.Г., Шардинов Р.Р. Теоретические и технологические особенности выплавки полупродукта в ДСП под магнезиальными шлаками. – В кн.: *Сборник трудов XV международного конгресса сталеплавильщиков и производителей металла*. – Москва-Тула: ООО «РПК ПринтАП», 2018. С. 142 – 148.

Поступила в редакцию 15 апреля 2020 г.

После доработки 16 июня 2020 г.

Принята к публикации 16 июня 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 7, pp. 491–498.

SMELTING OF STEEL SEMI-PRODUCT IN BOF AND EAF UNDER MAGNESIAN SLAGS

A.A. Babenko¹, L.A. Smirnov^{1,2}, E.V. Protopopov³,
L. Yu. Mikhailova¹

¹ Institute of Metallurgy, UB RAS, Ekaterinburg, Russia

² JSC “Ural Institute of Metals”, Ekaterinburg, Russia

³ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo
Region – Kuzbass, Russia

Abstract. Basics for the development of a rational composition of the main magnesian slags and technological methods for their formation accord-

ing to the periods of BOF bath blowing and the periods of smelting in EAF are the results of fundamental studies of the slags physico-chemical properties. Implementation in the converter shop of OJSC “EVRAZ NTMK” of a developed set of technological methods of magnesian slags formation in the main period of blowing and a wear-resistant skull on the basis of magnesian final slags ensured record durability of converter linings. These slags have low aggressive effect on the lining of converters, while maintaining high refining properties. The durability of the converters’ lining exceeds 7000 heats, while maintaining high technological and technical-economic indicators of the process. During heats of low manganese cast irons in 350-metric ton heavy converters of JSC “EVRAZ ZSMK” under magnesian slags, the features of slag formation and changes in chemical composition of the slag were studied by the periods of the BOF bath blowing. During the process stage of phosphorous cast irons in 300-metric ton BOF at JSC “ArcelorMittal Temirtau”, a set of technological methods was developed for the formation of magnesian slags of the recommended chemical composition by the periods of phosphorus cast irons blowing and wear-resistant skulls based on final magnesian slags of moderate basicity. The implementation of the developed technological methods ensured the lining stability of BOF of more than 5 000 heats while maintaining high technological, technical and economic indicators of phosphorous process stage. In the EAF shop of PJSC “Seversky Pipe Plant” a technology for the formation of magnesian slags of rational composition was developed over the smelting periods in EAF-135. Introduction of the technology ensured the record resistance of the refractory lining of the furnace up to 1900 heats per campaign and high level of technological and technical-economic indicators of the process.

Keywords: BOF, EAF, lining resistance, magnesian slags, slag blowing, slag foaming, viscosity, chemical composition, phase composition.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-491-498

REFERENCES

1. Protopopov E.V., Kuznetsov S.N., Feiler S.V. etc. Production of converter steel: state, dominant trends, forecasts. In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo. Trudy XX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. V 2. ch. Ch. 2* [Metallurgy: Technology, Innovations, Quality. Proceedings of the Int. Sci. – Pract. Conf. In 2 parts. Part 2]. Protopopov E.V. ed. Novokuznetsk: SibGIU, 2017, pp. 4–9. (In Russ.).
2. Kalish D., Sinel'nikov V.O., Kuglin K. Investigations of the physico-chemical properties of slag sprayed onto BOF lining. *Novye ognepuory*. 2017, no. 3, pp. 78–83. (In Russ.).
3. Leonard R.J., Herron R.H. Dolomite additions required to saturate BOF slags with MgO. *Open Hearth Proceedings*. 1977, vol. 60, pp. 127–133.
4. Panteikov S.P. Analysis of world development and current state of the technology of slagging of BOF lining. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2013, no. 6, pp. 65–78. (In Russ.).
5. Klages G., Schulz E. Entwicklung der Konverter haltbarkeit in den Stalwerken der Thyssen Stahl AG nach Einfuehrung des TBM-Verfahrens. *Thyssen Tech. Ber.* 1984, vol. 16, no. 2, pp. 103–108. (In Germ.).
6. Sian C., Wenyuan Y., Congjie Z. Slag splashing for Baosteel's 300-metric ton BOF and crystallographic structure of its slag. *Iron and Steelmaker*. 2000, no. 7, pp. 39–41.
7. Deo B., Halder J., Snoeijer B., Overbosch A., Boom R. Effect of MgO and Al₂O₃ variations in oxygen steelmaking (BOF) slag in slag morphology and phosphorus distribution. *Ironmaking and Steelmaking*. 2005, vol. 32, no. 1, pp. 54–60.
8. Martino M., Fenu M., Anfoso A. Refractory lining for oxygen converters: recent experiences in this field. In: *Proceedings of 5th European Steelmaking Conf., 26-28 June, 2006, Aachen, Germany*. Dusseldorf: Steel Institute VDEh, 2006, pp. 229–233.
9. Mills K.C., Su Y., Fox A.B., Li Z., Thackray R.P., Tsai H.T. A review of slag splashing. *ISIJ International*. 2005, vol. 45, no. 5, pp. 619–633.
10. Khoroshavin L.B., Perepelitsyn V.A., Kononov V.A. *Magnezial'nye ognepuory. Sprav. izd.* [Magnesian refractories. Reference book]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2001, 576 p. (In Russ.).
11. Shalimov A.G. Formation of foamed slag in EAF. *Elektrometallurgiya*. 2013, no. 9, pp. 8–13. (In Russ.).
12. Luz A.P., Avila T.A., Bonadia P., Pandolfelli V.C. Slag foaming: fundamentals, experimental evaluation and application in the steelmaking industry. *Refractories Worldforum*. 2011, vol. 3, no. 2, pp. 91–98.
13. Kozhukhov A.A., Fedina V.V., Merker E.E. Study of the foaming of steelmaking slag and its effect on the thermal performance of an electric-arc furnace. *Metallurgist*. 2012, vol. 56, no. 3-4, pp. 169–172.
14. Sanford D., Garside B., Schonewille C., Mill T. EAF refractory performance at pacific steel. *Iron and Steel Technology*. 2004, vol. 1, no. 8, pp. 48–55.
15. Obst K.Kh., Shtradtman Yu., Reder M. Effect of addition of natural and synthetic fluxes on lime dissolution. *Chernye metally*. 1978, no. 6, pp. 834–841. (In Russ.).
16. Ito K., Fruehan R.J. Study on the foaming of CaO-SiO₂-FeO slags: Part I. Foaming parameters and experimental results. *Metallurgical Transactions*. 1989, vol. 20 B, no. 4, pp. 509–514.
17. González O.J.P. etc. Effect of arc length on fluid flow and mixing phenomena in AC electric arc furnaces. *ISIJ International*. 2010, vol. 50, no. 1, pp. 1–8.
18. Babenko A.A., Fomichev M.S., Krivikh L.Yu. etc. Smelting steel from semiprocessed carbon hot metal under magnesia slag in 160-t converters Steel smelting from carbon semi-product in 160 t converters under magnesian slags. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 8, pp. 733–736.
19. Amelin A.V., Protopopov E.V., Kalinogorskii A.N., Feiler S.V. Formation of magnesian slag skull on lining of heavy converters. *Stal'*. 2014, no. 7, pp. 22–25. (In Russ.).
20. Babenko A.A., Smirnov L.A. *Teoriya i tekhnologiya peredela fosforistykh chugunov v kislorodnykh konverterakh* [Theory and technology of smelting phosphorous cast irons in BOF]. Novosibirsk: Akademizdat, 2018, 243 p. (In Russ.).
21. Ushakov M.V., Babenko A.A., Murzin A.V., Kuzyakin V.G., Shartdinov R.R. Theoretical and technological features of smelting semi-product in EAF under magnesian slag. In: *Sbornik trudov XV mezhdunarodnogo kongressa staleplavil'shchikov i proizvoditelei metalla* [Proceedings of the 15th Int. Congress of Steelmakers and Metal Producers]. Moscow – Tula: RPK PrintAP, 2018, pp. 142–148. (In Russ.).

Acknowledgements. The authors are grateful to S.A. Remigo, V.V. Levchuk, A.A. Dobromilov, H.S. Kutdusova, K.N. Demidov, T.V. Borisova, A.V. Murzin, M.V. Ushakov for the participation in the study.

Funding. The work was performed according to the State order to the Institute of Metallurgy of the Ural Branch of RAS.

Information about the authors:

Babenko A.A., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Nonferrous Metals (babenko251@gmail.com)

L.A. Smirnov, Academician, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher (sekreter@uim-stavan.ru)

E.V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy (protopopov@sibsiu.ru)

L.Yu. Mikhailova, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate (ferrosta1@bk.ru)

Received April 15, 2020

Revised June 16, 2020

Accepted June 16, 2020

УДК 669.14:621.74.042

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОРОШКА ОКСИДА ИТТРИЯ КАК УПРОЧНЯЮЩЕЙ ФАЗЫ ПРИ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ЛИТЬЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ*

Чуманов В.И., к.т.н., старший научный сотрудник кафедры «Техника и технологии
производства материалов» (chumanovvi@susu.ru)

Чуманов И.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Техника и технологии
производства материалов» (chumanoviv@susu.ru)

Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте
(456217, Россия, Челябинская обл., Златоуст, ул. Тургенева 16)

Аннотация. Представлен анализ необходимости работ по совершенствованию составов имеющихся конструкционных материалов ответственного назначения в направлении создания металломатричных материалов, в которых объединена высокопластичная металлическая основа и тугоплавкие высокопрочные высокомодульные наполнители. Для сплавов на основе железной матрицы предпочтительными являются дисперсные частицы оксида иттрия (Y_2O_3) из-за их стабильности при температурах пирометаллургических процессов и инертности в отношении компонентов сплава. Рассмотрена технология получения новых материалов за счет введения дисперсных частиц в жидкий расплав при разливке с использованием машины центробежного литья для получения полый (трубной) заготовки. Показана возможность повышения механических и эксплуатационных свойств металломатричных материалов в сравнении с мономатериалом. Приведены результаты термодинамического моделирования высокотемпературных процессов, происходящих в системе оксид иттрия – металлическая матрица (расплав). Моделирование проведено с использованием программного комплекса FactSage. В качестве моделирующего состава матричного материала использовали состав, соответствующий стали марки 12X18H10T. Расчеты выполнены из соотношения 1 г добавки оксида иттрия на 100 г матричного металлического расплава. Из результатов моделирования можно сделать вывод, что введенный дисперсный порошок оксида иттрия не взаимодействует с компонентами сплава, не диссоциирует и не претерпевает аллотропических превращений. Показана целесообразность проведения экспериментов по получению отливок центробежного литья с применением оксида иттрия в качестве упрочняющей фазы с целью возможного повышения радиационной стойкости. Обозначены направления разработки наиболее эффективной технологии создания металлических материалов на основе железной матрицы, дисперсно-упрочненной оксидом иттрия.

Ключевые слова: расплав, упрочняющая фаза, центробежное литье, оксид иттрия, коррозионностойкие стали.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-499-503

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач, стоящих перед металлургией и машиностроением, является разработка и внедрение новых металлосберегающих технологий, которые могли бы служить основой получения новых металлических материалов с улучшенными функциональными свойствами. В этом плане несомненно большой интерес представляют литейные технологии, которые благодаря простоте реализации и возможности получения изделий близких к конечной продукции позволяют существенно снизить затраты на последующую металлообработку [1, 2].

В последние годы актуальность приобретают работы по созданию принципиально новых материалов, в которых искусственно объединены высокопластичные металлические матрицы и тугоплавкие высокопрочные высокомодульные наполнители [3 – 5]. При таком со-

четании фаз достигается значительное повышение несущих способностей улучшенного таким образом материала: высокая износостойкость и задиростойкость, стойкость против абразивного изнашивания, а также воздействию различных видов излучения. Армирующие наполнители с резко отличной от основной матрицы твердостью не только повышают износостойкость металлических материалов, но и играют роль поддерживающих опор, могут существенно снизить потери на трение и расширить диапазон нагружения [6]. Для ряда сталей [7] движение дислокаций тормозится введением в металлическую матрицу дисперсных термодинамически стабильных неметаллических (керамических) частиц, а, как известно, движение дислокаций аналогично движению вакансий. По данным работы [8] в железной и никелевой матрице наиболее стабильными являются частицы оксида иттрия (Y_2O_3).

Получение мелкодисперсной оксидной фазы в металле традиционными методами, а главное ее равномерное распределение не представляется возможным. При традиционной схеме жидкий металл – слиток при введении иттрия в жидкий расплав с содержанием

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках федеральной целевой программы по соглашению № 05.608.21.0276 от 04.12.2019 г. (уникальный идентификатор RFMEFI60819X0276).

кислорода 0,08 – 0,10 % включения оксида Y_2O_3 будут образовываться в жидком металле и иметь размеры от нескольких до десятков микрометров, что является неприемлемым. Не решают эту проблему и традиционные технологии порошковой металлургии, когда оксидные дисперсоиды смешиваются с порошками металлов и полученная смесь компактируется и спекается. При этом сохраняется исходный размер оксидных частиц и те ограничения, которые несет в себе порошковая металлургия (трудность изготовления заготовок больших размеров, большое количество используемого порошка при его высокой стоимости, использование специального оборудования с контролируемой атмосферой и др.) [9 – 11].

ТЕХНОЛОГИИ С ВВЕДЕНИЕМ ОКСИДА ИТТРИЯ

В настоящее время проблема решается только с переходом на технологию механического легирования (МЛ) [12]. Технология предполагает, что смесь порошков различных металлов подвергается совместному высокоэнергетическому помолу с преобладающим механизмом трения. В процессе такого помола происходит измельчение частиц порошка (вплоть до нанокластерного размера) и взаимная твердофазная диффузия металлов друг в друга. В нанокластерах термодинамически наиболее выгодным соединением становится твердый раствор, в который переходят имеющиеся в металле соединения типа интерметаллидов, силицидов и карбидов [13]. При последующем нагреве компактированных порошков эти соединения выпадают из раствора в виде наноразмерных частиц (преципитатов).

В работе [14] было установлено, что при МЛ в твердом металле может растворяться и такой термодинамически прочный оксид, как Y_2O_3 , с последующим выделением его нанокластерных преципитатов. При этом возможно укрупнение (коалесценция) нанопреципитатов в результате растворения мелких частиц и роста более крупных, что в конечном итоге сводит на нет все достоинства технологии МЛ.

Опробована технология повышения механических свойств металлических материалов за счет введения дисперсных частиц в жидкий расплав при разливке с использованием машины центробежного литья [15 – 17]. Эта технология, при достаточной простоте ее реализации, позволяет получать стабильные результаты с использованием карбида титана, карбида вольфрама, карбида кремния, а также используя дисперсные частицы различной плотности получать градиентные материалы. Оксид иттрия обладает плотностью 5,046 г/см³, близкой к плотности металлических материалов на основе железа. Следовательно, при реализации технологической схемы, представленной в работе [15], оксид иттрия должен находиться на внешней (рабочей) стороне цилиндрической отливки. При небольшой толщине

стенки заготовки возможно его распределение и на внутренней поверхности.

Усилить эффект от введения дисперсных частиц возможно при использовании дополнительной внутренней механической раскатки, т.е. термомеханического упрочнения. Подобная обработка позволит получить более высокие значения механических свойств (более 300 МПа при температуре 970 К), более высокую радиационную стойкость к нейтронному облучению, более высокую сопротивляемость коррозии по отношению к теплоносителям при повышенных температурах. Это подтверждают работы [18, 19] по проведению глубокой пластической деформации: в ходе экспериментальных исследований получены прутки из стали марки 08X18H10T с размером зерна 300 – 600 нм, при этом механические свойства и микротвердость стали увеличиваются более чем в два раза по сравнению с исходными значениями.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

СТАБИЛЬНОСТИ ОКСИДА ИТТРИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ РАСПЛАВЕ

С целью разработки наиболее эффективной технологии создания металлических материалов на основе железной матрицы дисперсно-упрочненной оксидом иттрия необходимо создание сквозных технологических схем и инновационных технологий, включающих в себя как литейные технологии с введением упрочняющей фазы, так и термомеханическое упрочнение. Для этого необходимо экспериментально изучить влияние различных параметров (температуры, концентрации, скорости разливки и вращения печи, усилия раскатки, режимы термической обработки и др.) на ход процесса и его результаты. Для термодинамического моделирования высокотемпературных процессов, происходящих в системе оксид иттрия – металлическая матрица (расплав), и температур рекристаллизации целесообразно использовать программный комплекс FactSage [20, 21]. Программное обеспечение FactSage 7.0 обозначает возможные направления процессов, протекающих при реализации разрабатываемых в ходе исследований технологических процессов.

Для моделирования использовали материал следующего состава: 0,1 % С; 1,5 % Мn; 0,5 % Si; 18,0 % Cr; 10,0 % Ni; 0,5 % Ti; 69,25 % Fe. Добавляли 1 г оксида Y_2O_3 на 100 г металлического расплава. Результаты моделирования равновесных фазовых составов металла с добавкой оксида иттрия в зависимости от температуры и моделирования неравновесной кристаллизации (модель Шейла-Гулливера) металла с добавкой оксида иттрия представлены на рис. 1, 2 (где $\lg x$ – десятичный логарифм от концентрации фазы). Расчеты проводили с учетом возможности существования фаз переменного состава в виде твердых и жидких растворов, а также с учетом отклонения условий кристаллизации от идеальности.

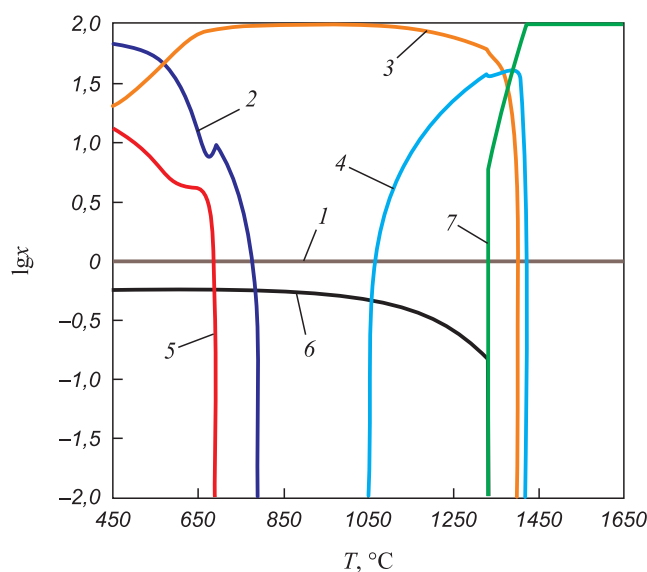


Рис. 1. Результаты моделирования равновесного фазового состава стали марки 12X18H10T с добавкой 1 г оксида иттрия на 100 г расплава в зависимости от температуры:
1 – Y_2O_3 ; 2 – α -Fe; 3 – γ -Fe; 4 – δ -Fe; 5 – сигма;
6 – твердый раствор на основе TiC; 7 – металлический расплав

Fig. 1. Results of modeling the equilibrium phase composition of 12Cr18Ni10Ti steel with an addition of 1 g of yttrium oxide per 100 g of melt depending on temperature:
1 – Y_2O_3 ; 2 – α -Fe; 3 – γ -Fe; 4 – δ -Fe; 5 – sigma;
6 – TiC-based solid solution; 7 – metal melt

В построении зависимости изменения фазового состава сплава (рис. 1) и неравновесной кристаллизации от температуры основной акцент делали на оксидной

фазе сплава. Моделирование проводили для температур, при которых осуществляется центробежная отливка заготовок, что позволяет с большей или меньшей точностью предполагать фазовый состав изучаемого сплава. Такое обстоятельство позволяет прогнозировать поведение дисперсных оксидов.

Представлены различные фазы системы, характерные для стали марки 12X18H10T в зависимости от температуры. Линиями обозначены границы существования фаз. Наибольший практический интерес представляет центральная часть графика (через диаграмму проходит линия, характеризующая массу оксида иттрия в системе). Исследуемая фаза почти не взаимодействует с компонентами сплава, не диссоциирует и не претерпевает аллотропических превращений.

На рис. 2 представлены результаты расчета модели неравновесной кристаллизации (модели Шейла-Гулливера) для исходного расплава без добавок оксида иттрия и с добавкой эталонным составом. Линия, соответствующая определенной фазе, в месте пересечения с осью температуры отмечает точку начала кристаллизации фазы. Сравнительный анализ позволяет сделать вывод, что оксид иттрия присутствует в расплаве в виде кристаллической фазы. При этом увеличивается содержание α -Fe (ОЦК фазы) в сравнении с моделью для расплава без присадки оксида иттрия.

Выводы

Анализ моделирования показал, что в процессе получения металломатричных материалов методом цент-

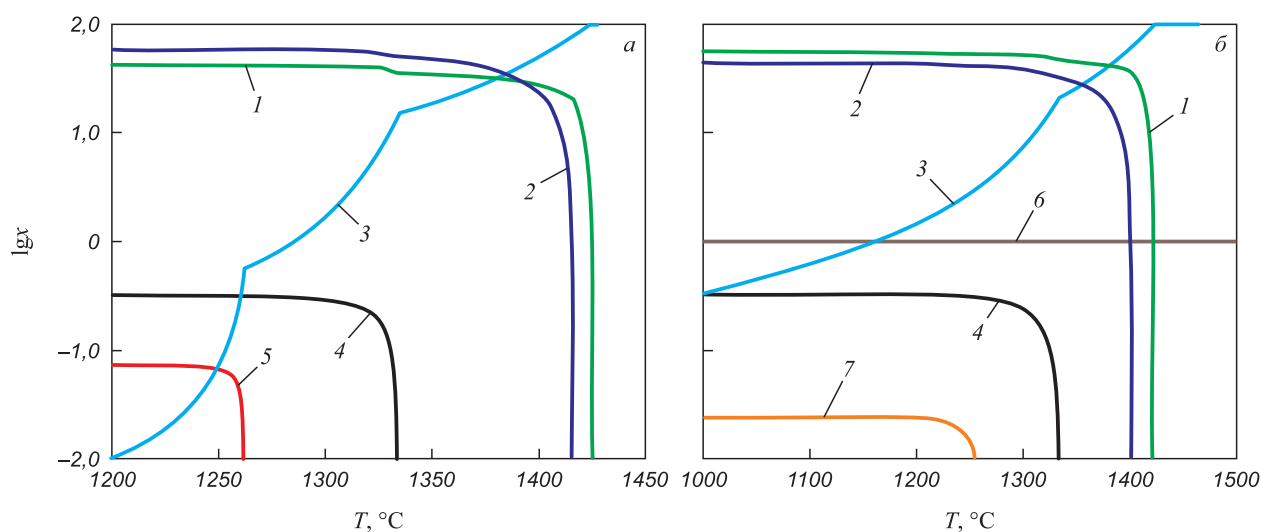


Рис. 2. Результаты моделирования неравновесной кристаллизации фазового состава стали марки 12X18H10T в зависимости от температуры (модель Шейла-Гулливера):

a – исходный расплав; *б* – металл с добавкой 1 г оксида иттрия на 100 г расплава;
1 – α -Fe; 2 – γ -Fe; 3 – металлически расплав; 4 – твердый раствор на основе TiC; 5 – $Me_{23}C$; 6 – Y_2O_3 ; 7 – Cr_4C

Fig. 2. Results of modeling of nonequilibrium crystallization of the phase composition of 12Kh18N10T steel depending on temperature (Scheil-Gulliver model):

a – initial melt; *б* – metal with an addition of 1 g of yttrium oxide per 100 g of melt;
1 – α -Fe; 2 – γ -Fe; 3 – metal melt; 4 – TiC-based solid solution; 5 – $Me_{23}C$; 6 – Y_2O_3 ; 7 – Cr_4C

робежного литья не происходит взаимодействия оксида иттрия с металлическим расплавом. Не установлено диссоциации соединения при условиях протекания рассматриваемых процессов. Можно сделать заключение о целесообразности проведения экспериментов по получению отливок центробежного литья с применением оксида иттрия как упрочняющей фазы с целью возможного повышения радиационной стойкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вальтер А.И., Протопопов А.А. Основы литейного производства. – М.: Инфра-Инженерия, 2019. – 333 с.
2. Одарченко И.Б., Некрасов Г.Б. Основы технологии литейного производства. Плавка, заливка металла, кокильное литье. – М.: Высшая школа, 2013. – 225 с.
3. Комшуков В.П., Черепанов А.Н., Протопопов Е.В. и др. Исследование влияния модифицирования металла нанопорошковыми материалами на качество сортовой непрерывнолитой заготовки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 8. С. 57 – 63.
4. Al-Mangour B., Grzesiak D., Yang J.-M. In-situ formation of novel TiC-particle-reinforced 316L stainless steel bulk-form composites by selective laser melting // Journal of Alloys and Compounds. 2017. Vol. 706. P. 409 – 418.
5. Иванов И.И., Демидик А.Н. Ферритные дисперсно-упрочненные стали горячей зоны реакторов на быстрых нейтронах // Вопросы атомной науки и техники. 2001. № 4. С. 65 – 68.
6. Singla S., Grewal J.S., Kang A.S. Wear behavior of weld overlays on excavator bucket teeth // Procedia Materials Science. 2014. Vol. 5. P. 256 – 266.
7. Портной Н.И., Бабич Б.И., Светлов И.Л. Композиционные материалы на никелевой основе. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.
8. Белянчиков Л.Н. Рациональная технология получения коррозионно-стойкой ферритной стали с нанокластерным оксидным упрочнением для атомной энергетики // Электрометаллургия. 2011. № 9. С. 9 – 16.
9. Порошковая металлургия и напыление покрытий / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
10. Анциферов В.Н., Перельман В.Е. Механика процессов пресования порошковых и композиционных материалов. – М.: ИД «Грааль», 2001. – 631 с.
11. Harris I.R., Williams A.J. Grain boundaries: Their Character, Characterisation and Influence on Properties. – London: IOM Communications Ltd., 2001. – 328 p.
12. Benjamin J.S., Mercer P.D. Dispersion strengthened superalloys mechanical alloying // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 1970. Vol. 1. No. 10. P. 2943 – 2951.
13. Badmos A.V., Bhadeshia H.K.D.H. The evolution of solutions: thermodynamic analysis of mechanical alloying // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 1997. Vol. 28A. P. 2189 – 2194.
14. Olier P., Mabaplate J., Mathon M.H. etc. Structural and chemical characterisations of ODS ferritic steels produced by mechanical extrusion. – In: Proceedings Powder Metallurgy World Congress and Exhibition, 10-14 October 2010, Florence, Italia, 2010. P. 151 – 158.
15. Пат. 2443505 РФ. Способ получения стальной трубной заготовки / Чуманов В.И., Аникеев А.Н., Чуманов И.В.; заявл. 06.10.2010; опубл. 27.02.2012. Бюл. № 6.
16. Chumanov I.V., Chumanov V.I., Anikeev A.N. Preparation of precipitation-strengthened hollow billets for rotary dispersers // Metallurgist. 2011. Vol. 55. No. 5-6. P. 439 – 443.
17. Chumanov I.V., Kareva N.T., Chumanov V.I. etc. Study and Analysis of the Structural Constituents of Billets Hardened by Fine-Grained Particles and Formed by Centrifugal Casting // Russian Metallurgy (Metally). 2012. Vol. 2012. No. 6. P. 540 – 543.
18. Найзабеков А.Б., Панин Е.А., Лежнев С.Н. и др. Исследование влияния радиально-сдвиговой прокатки на микроструктуру и механические свойства нержавеющей стали марки 08X18H10T. – В кн.: Современные инновации в области науки, технологий и интеграции знаний. Сб. материалов юбилейной международной научно-практической конференции. № 7. – Рудный: Изд-во Рудненского индустриального института, 2019. С. 197 – 204.
19. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Arbuz A.S. etc. Computer modeling of radial-shear rolling of austenitic stainless steel AISI-321 // Machines. Technologies. Materials. 2018. Vol. 12. No. 12. P. 497 – 500.
20. Bale C.W., Belisle E., Chartrand P. etc. FactSage thermochemical software and databases – recent developments // Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. 2009. Vol. 33. P. 295 – 311.
21. Bale C.W., Bélisle E., Chartrand P., Decterov S.A. etc. FactSage thermochemical software and databases, 2010 – 2016 // Calphad – Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. 2016. Vol. 55. P. 35 – 53.

Поступила в редакцию 21 января 2020 г.
После доработки 28 января 2020 г.
Принята к публикации 3 марта 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. No. 7, pp. 499–503.

POSSIBILITY OF USING YTTRIUM OXIDE POWDER AS A STRENGTHENING PHASE FOR CENTRIFUGAL CASTING OF CORROSION-RESISTANT STEELS

V.I. Chumanov, I.V. Chumanov

Zlatoust branch of the South Ural State University, Zlatoust, Chelyabinsk Region, Russia

Abstract. The authors have made an analysis of necessity to improve the composition of the existing structural materials for critical purposes in the direction of creating metal matrix materials, which combine a highly plastic metal base and refractory high-strength high-modulus fillers. For iron matrix alloys, dispersed yttrium oxide (Y_2O_3) particles are preferred because of their stability at pyrometallurgical process temperatures and inertness to alloy components. The technology of obtaining new materials by introducing dispersed particles into a liquid melt during casting using a centrifugal casting machine to obtain a hollow

(pipe) billet is considered. The possibility of increasing the mechanical and operational properties of metal matrix materials in comparison with monomaterial is shown. The article describes results of the thermodynamic modeling of high-temperature processes occurring in the yttrium oxide – metal matrix (melt) system. Modeling was carried out using the FactSage software package. A composition corresponding to 12Cr18Ni10Ti steel was used as the modeling composition of the matrix material. The calculations were made according to the ratio of 1 g of yttrium oxide additive per 100 g of matrix metal melt. From the simulation results it is possible to conclude that the introduced dispersed yttrium oxide powder does not interact with the alloy components, does not dissociate, and does not undergo allotropic transformations. The expediency of conducting experiments on the production of centrifugal castings using yttrium oxide as a hardening phase with the

aim of a possible increase in radiation resistance is shown. Directions are indicated for developing the most effective technology for creating metallic materials based on an iron matrix dispersed-hardened by yttrium oxide.

Keywords: melt, hardening phase, mechanical alloying, centrifugal casting, yttrium oxide, corrosion resistant steels.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-499-503

REFERENCES

1. Val'ter A.I., Protopopov A.A. *Osnovy liteinogo proizvodstva* [Basics of foundry technology]. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2019, 333 p. (In Russ.).
2. Odarchenko I.B., Nekrasov G.B. *Osnovy tekhnologii liteinogo proizvodstva. Plavka, zalivka metalla, kokil'noe lit'e* [Basics of foundry technology. Melting, metal casting, chill casting]. Moscow: Vysshaya shkola, 2013, 225 p. (In Russ.).
3. Komshukov V.P., Cherepanov A.N., Protopopov E.V. etc. Influence study of metal modification with nanopowder materials on continuously cast rod billet quality. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 8, pp. 57–63. (In Russ.).
4. Al-Mangour B., Grzesiak D., Yang J.-M. In-situ formation of novel TiC-particle-reinforced 316L stainless steel bulk-form composites by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017, vol. 706, pp. 409–418.
5. Ivanov I.I., Demidik A.N. Ferritic dispersion hardened steels of the hot zone of fast nuclear reactors. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki*. 2001, no. 4, pp. 65–68. (In Russ.).
6. Singla S., Grewal J.S., Kang A.S. Wear behavior of weld overlays on excavator bucket teeth. *Procedia Materials Science*. 2014, vol. 5, pp. 256–266.
7. Portnoi N.I., Babich B.I., Svetlov I.L. *Kompozitsionnye materialy na nikel'noi osnove* [Nickel-based composite materials]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 264 p. (In Russ.).
8. Belyanchikov L.N. Rational technology for producing corrosion-resistant ferritic steel with nanocluster oxide hardening for nuclear energy. *Elektrometallurgiya*. 2011, no. 9, pp. 9–16. (In Russ.).
9. Antsiferov V.N., Bobrov G.V., Druzhinin L.K. etc. *Poroshkovaya metallurgiya i napylenie pokrytii* [Powder metallurgy and coating spraying]. Moscow, 1987, 792 p. (In Russ.).
10. Antsiferov V.N., Perel'man V.E. *Mekhanika protsessov pressovaniya poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of the processes of pressing powder and composite materials]. Moscow: ID Graal', 2001, 631 p. (In Russ.).
11. Harris I.R., Williams A.J. *Grain boundaries: Their Character, Characterisation and Influence on Properties*. London: IOM Communications Ltd., 2001, 328 p.
12. Benjamin J.S., Mercer P.D. Dispersion strengthened superalloys mechanical alloying. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 1970, vol. 1, no. 10, pp. 2943–2951.
13. Badmos A.V., Bhadeshia H.K.D.H. The evolution of solutions: thermodynamic analysis of mechanical alloying. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 1997, vol. 28A, pp. 2189–2194.
14. Olier P., Mabaplate J., Mathon M.H. etc. Structural and chemical characterisations of ODS ferritic steels produced by mechanical extrusion. In: *Proceedings Powder Metallurgy World Congress and Exhibition, 10-14 October 2010, Florence, Italia*, 2010, pp. 151–158.
15. Chumanov V.I., Anikeev A.N., Chumanov I.V. *Sposob polucheniya stal'noi trubnoi zagotovki* [Method of obtaining a steel pipe billet]. Patent RF no. 2443505. *Byulleten' izobretenii*. 2012, no. 6. (In Russ.).
16. Chumanov I.V., Chumanov V.I., Anikeev A.N. Preparation of precipitation-strengthened hollow billets for rotary dispersers. *Metallurgist*. 2011, vol. 55, no. 5-6, pp. 439–443.
17. Chumanov I.V., Kareva N.T., Chumanov V.I. etc. Study and analysis of the structural constituents of billets hardened by fine-grained particles and formed by centrifugal casting. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012, vol. 2012, no. 6, pp. 540–543.
18. Naizabekov A.B., Panin E.A., Lezhnev S.N. etc. Study of the effect of radial-shear rolling on microstructure and mechanical properties of 08Cr18Ni10Ti stainless steel. In: *Sovremennyye innovatsii v oblasti nauki, tekhnologii i integratsii znaniy. Sb. materialov yubileinoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, no. 7* [Modern Innovations in Science, Technology and Knowledge Integration. Proceedings of the Anniversary Int. Sci. – Pract. Conf., no. 7]. Rudnyi: Izd-vo Rudnenskogo industrial'nogo instituta, 2019, pp. 197–204. (In Russ.).
19. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Arbuz A.S. etc. Computer modeling of radial-shear rolling of austenitic stainless steel AISI-321. *Machines. Technologies. Materials*. 2018, vol. 12, no. 12, pp. 497–500.
20. Bale C.W., Belisle E., Chartrand P. etc. FactSage thermochemical software and databases – recent developments. *Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*. 2009, vol. 33, pp. 295–311.
21. Bale C.W., Belisle E., Chartrand P., Decterov S.A. etc. FactSage thermochemical software and databases, 2010 – 2016. *Calphad – Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*. 2016. vol. 55, pp. 35–53.

Funding. The work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education in the framework of the federal target program under agreement No. 05.608.21.0276 of December 4, 2019 (unique identifier RFMEFI60819X0276).

Information about the authors:

I.V. Chumanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Technique and Technology of Materials Production” (chumanoviv@susu.ru)

V.I. Chumanov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Chair “Technique and Technology of Materials Production” (chumanovvi@susu.ru)

Received January 21, 2020

Revised January 28, 2020

Accepted March 2, 2020

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СВАРКИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ТЕРМОУПРОЧНЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ*

Козырев Н.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой материаловедения, литейного и сварочного производства (kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru)

Шевченко Р.А., ассистент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства (shefn1200@mail.ru)

Усольцев А.А., к.т.н., доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства (a.us@rambler.ru)

Прудников А.Н., д.т.н., профессор кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства (a.prudnikov@mail.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. В лабораторных условиях на образцах рельсовой стали изучено влияние режимов сварки с последующей изотермической выдержкой на качественные показатели сварного стыка. Сварку образцов осуществляли путем пропускания импульсов переменного электрического тока после сварки. Сварку проводили на машине для контактной стыковой сварки МС-2008М с внесением ряда изменений в управляющие воздействия. Для измерения температуры металла в зоне термического влияния (ЗТВ) использовали хромель-алюмелевые термопары. Сбор и обработку данных от термопар осуществляли с помощью измерительного комплекса «Tempol». Температуру металла сварного шва (где нет возможности установить термопару) измеряли с помощью тепловизора HotFind-D. Представлены результаты эксперимента и физико-механические свойства образцов: твердость НВ, протяженность ЗТВ, предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение, относительное сужение, наличие неметаллических включений в металле шва. Проведен расчет отклонений твердости (понижение-повышение, суммарное отклонение) на поверхности сварного соединения образцов относительно требований, установленных ГОСТ Р 51685 – 2013. Предложен способ контактной стыковой сварки, который позволяет получать сварное соединение изделий из рельсовой стали с равномерным распределением твердости и малой зоной термического влияния. Определена зависимость микротвердости от объемной доли структурных составляющих. Построены модели влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на понижение твердости металла сварного соединения относительно твердости основного металла и на протяженность зоны термического влияния. Предлагаемый способ позволяет регулировать структуру металла сварного соединения рельсов, не прибегая к дополнительной локальной термической обработке.

Ключевые слова: рельсы, контактная сварка, термическая обработка, ток, импульс, режим сварки, твердость, зона термического влияния.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-504-511

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе в лабораторных условиях проведены исследования по изучению влияния режимов сварки с последующей изотермической выдержкой образцов из рельсовой стали, проводимой путем пропускания импульсов переменного электрического тока после сварки, на качественные показатели сварного стыка.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сварку образцов проводили на машине для контактной стыковой сварки МС-2008 с внесением ряда изме-

нений в управляющие воздействия (рис. 1) [1]. Модернизированная машина для контактной стыковой сварки оплавлением содержит: корпус 1; установленные на корпусе подвижный 2 и неподвижный 3 зажимы, которые соединены с устройствами зажатия свариваемых деталей 4 (на схеме не показано) и закреплены на основаниях зажимов; механический привод оплавления и осадки 5, соединенный с подвижным зажимом 2; систему охлаждения 6; сварочный трансформатор 7; переключатель 8 ступеней напряжения сварочного трансформатора 7; релейную панель 9; пульт управления (на схеме не показан); блок концевых выключателей 10; контактор включения сварочного тока 11; электродвигатель 12 привода оплавления и осадки, который через концевой выключатель, предназначенный для подачи сигнала на контроллер 13 о начале этапа термообработки и расположенный в блоке концевых выключателей 10, соединен с контроллером 13. Контроллер 13

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420003 п. а «Развитие физико-химических и технологических основ создания принципиально нового способа сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов».

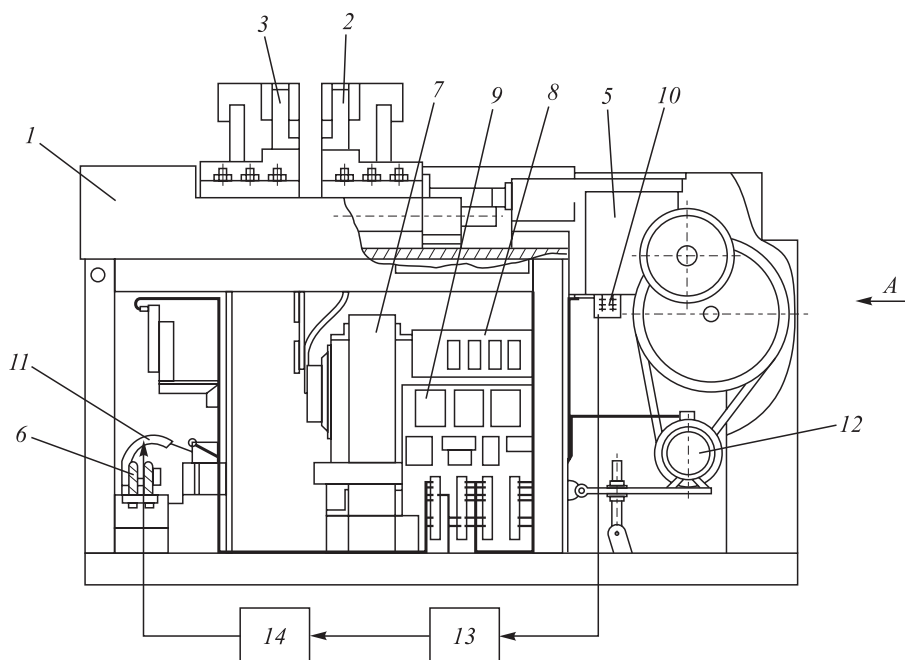


Рис. 1. Схема модернизированной машины МС-2008 для контактной стыковой сварки

Fig. 1. Scheme of upgraded MS-2008 unit for flash-butt welding

соединен со сварочным трансформатором 7 с помощью симистора 14. При помощи контактного реле (на схеме не показано), установленного на релейной панели 9, симистор 14 соединен с контактором включения сварочного тока 11.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для получения информации о термическом влиянии на структуру металла разработана методика измерения температур в зоне термического влияния (ЗТВ) во время сварки. При этом проводили измерение силы сварочного тока и температуры образцов с целью дальнейшей корректировки режимов. Схема взаимодействия используемого оборудования приведена на рис. 2. Для измерения температуры металла в ЗТВ использовали хромель-алюмелевые термопары. Сбор и обработку данных, полученных от термопар, проводили с помощью измерительного комплекса «Tempol». Температуру металла сварного шва, где нет возможности установить термопару, измеряли с помощью тепловизора HotFind-D.

Для построения математических моделей влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на понижение твердости металла сварного соединения относительно твердости основного металла и модели влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на протяженность зоны термического влияния использовали планируемый эксперимент, позволяющий построить качественные математические модели и сократить количество экспериментов. Исследование проведено

с использованием полного факторного эксперимента $N = 2 \cdot 3^k$ [2]. Исследуемыми параметрами управляемого охлаждения являются: X_1 – время охлаждения после осадки (характеризуется скоростью охлаждения (степень переохлаждения аустенита) и температурой T_1 , до которой происходит охлаждение); X_2 – время подогрева (характеризуется температурой T_2 , до которой происходит нагрев); X_3 – время охлаждения после подогрева (характеризуется температурой T_1 , до которой происходит охлаждение); X_4 – количество импульсов подогрева (характеризуется инкубационным периодом превращения аустенита в перлит). Математическую обработку экспериментальных данных проводили по известным методикам, изложенным в работах [3 – 7].

Вырезку образцов размером $90 \times 30 \times 10$ мм с известным химическим составом осуществляли из головки рельсового профиля. После сварки на модернизированной машине МС-2008 при различных режимах согласно исследуемой матрицы проводили снятие грата и изме-



Рис. 2. Блок-схема взаимодействия оборудования

Fig. 2. Block diagram of equipment interaction

рение твердости с помощью твердомера УЗИТ-3. Далее каждый образец разрезали перпендикулярно сварному шву на два электроэрозионным способом на электроэрозионном проволоочно-вырезном станке с ЧПУ струйного типа ДК7732 М11. Из одного образца вытачивали по ГОСТ 1497 – 84 цилиндрические образцы типа III № 6 с расчетной длиной рабочей части 30 мм. Второй образец готовили для металлографического анализа на неметаллические включения и микроструктуру сварного соединения. Исследования проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле при диапазоне увеличений 100 – 1000 крат после травления в спиртовом растворе азотной кислоты. Микротвердость измеряли с помощью микротвердомера HVS-1000.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В табл. 1 представлены результаты эксперимента и полученные физико-механические свойства образцов (твердость HB, протяженность ЗТВ, мм; предел текучести σ_T , Н/мм²; временное сопротивление σ_B , Н/мм²; относительное удлинение δ_5 , %; относительное сужение ψ , %; наличие неметаллических включений в металле шва). Проведен расчет отклонений твердости на поверхности сварного соединения образцов относительно требований, установленных ГОСТ Р 51685 – 2013: понижение твердости $\Delta_{\min} = \left(\frac{350\text{HB} - \text{HB}_{\min}}{350\text{HB}} \right) \cdot 100 \%$ и повышение твердости $\Delta_{\max} = \left(\frac{\text{HB}_{\max} - 350\text{HB}}{350\text{HB}} \right) \cdot 100 \%$, суммарное отклонение твердости $\Delta = \Delta_{\min} + \Delta_{\max}, \%$.

Во всех сварных соединениях наблюдаются характерные зоны [8 – 19]. Изучение макроструктуры сварных соединений лабораторных образцов (химический состав приведен в работе [20]) выявило наличие не-

скольких зон, образованных в результате действия тепла сварки и кратковременного подогрева, используемого для управляемого охлаждения. Выделяются четыре участка с различными структурами металла.

1 – шов. Микроструктура представляет крупнозернистый сорбитообразный перлит. Образование закалочных структур практически на всех образцах отсутствует, даже при скорости охлаждения, при которой характерно образование мартенсита для таких сталей. Это обусловлено снижением содержания углерода в металле сварного шва, в момент оплавления при взаимодействии жидкого металла с атмосферой происходит его окисление.

2 – участок неполного расплавления. Структура образцов 2 – 4, 9 состоит из крупнозернистого сорбитообразного перлита. При исследовании образцов 1, 6, 8 отмечено наличие крупнозернистой структуры (2 – 3 номер шкалы ГОСТ 5639 – 82) с преобладанием мартенситной составляющей, характерной для перегретого металла. В образцах 5, 7 преобладает структура крупнозернистого сорбитообразного перлита и небольшие участки мартенсита размером от 20 до 80 мкм.

3 – участок нормализации. В процессе нагрева протекает фазовое превращение перлита в аустенит и его гомогенизация. Структура образцов 1 – 7, 9 представляет собой мелкодисперсный перлит. В образце 8 практически отсутствует такой участок вследствие высокой скорости охлаждения, не соответствующей скоростям охлаждения при нормализации.

4 – участок сфероидизации перлита. В процессе нагрева протекает фазовое превращение перлита в аустенит, но вследствие недостаточной температуры и малого времени гомогенизации аустенита не происходит. При последующем охлаждении происходит коагуляция цементита на участках оставшегося нерастворенного карбида и укрупнение зерен цементита – сфероидизация.

Т а б л и ц а 1

Результаты эксперимента

Table 1. Experiment results

Образец	HB _{min}	HB _{max}	$\Delta_{\min}, \%$	$\Delta_{\max}, \%$	$\Delta, \%$	Протяженность ЗТВ, мм	σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	$\delta_5, \%$	$\psi, \%$	Наличие неметаллических включений
1	290	414	17,40	18,29	35,69	10,0	660	990	3,2	4,4	+
2	297	364	15,20	3,90	19,10	6,5	650	750	1,7	4,7	+
3	322	370	8,00	5,81	13,81	6,0	530	570	1,2	3,6	+
4	326	385	6,85	10,00	17,43	5,0	720	870	0,4	4,3	+
5	279	364	20,23	4,00	24,23	16,0	800	810	1,2	4,3	+
6	280	391	20,00	11,71	31,71	16,0	770	980	1,5	4,9	+
7	264	404	24,48	15,33	39,81	20,0	880	1080	2,8	5,7	–
8	319	601	8,76	71,83	80,59	26,0	970	1010	1,2	5,0	–
9	281	378	19,71	8,00	27,71	17,0	–	465	0,8	3,8	+

Во всех образцах присутствует такой участок, однако размеры различны в зависимости от режима управляемого охлаждения.

На рис. 3 показано распределение твердости и неметаллических включений в образце 1.

На рис. 4 для образца 1 приведено распределение микротвердости и объемной доли структурных составляющих. При увеличении объемной доли зернистого перлита происходит снижение микротвердости. При увеличении количества закалочных структур происхо-

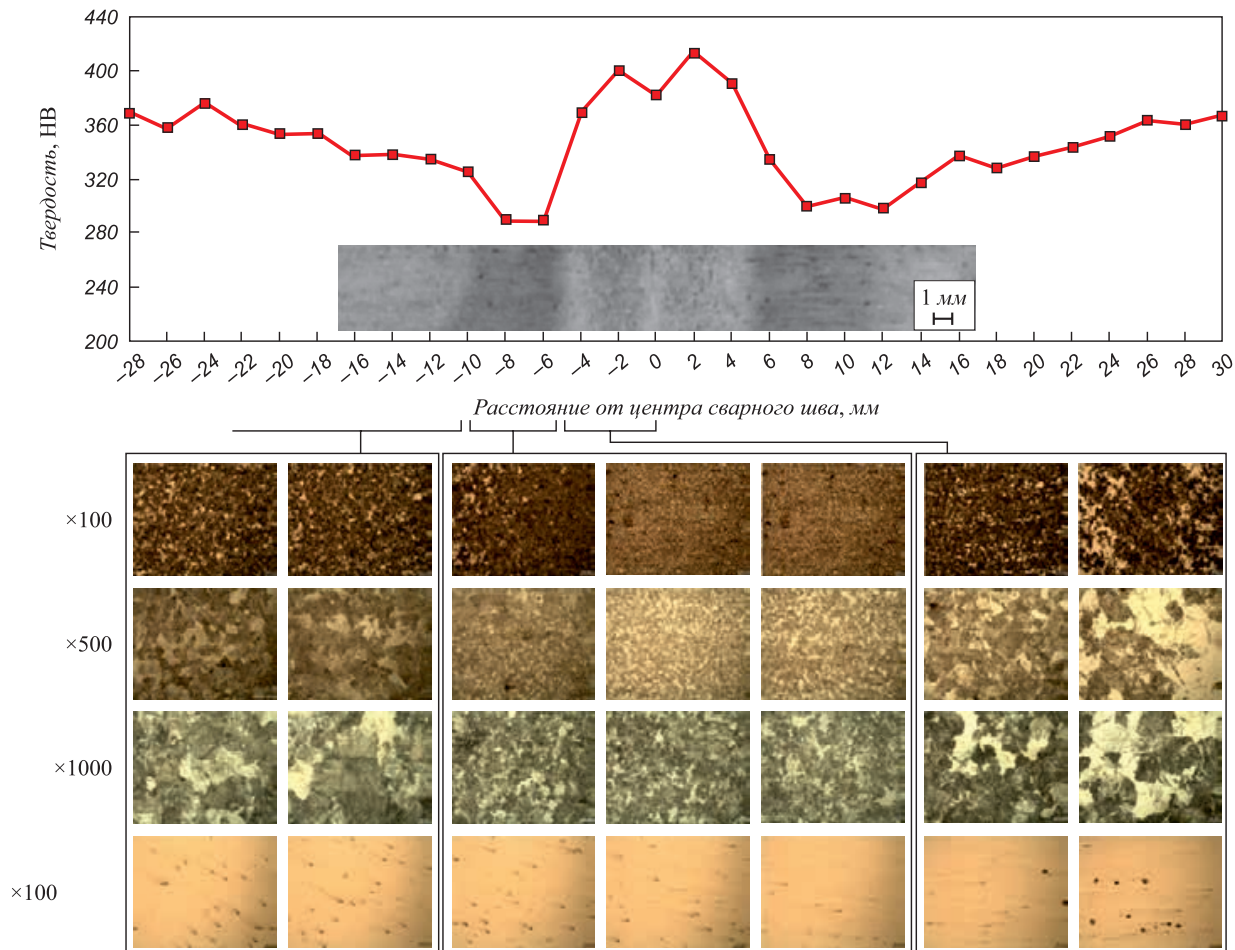


Рис. 3. Распределение твердости, неметаллических включений и структуры в сварном соединении образца 1

Fig. 3. Distribution of hardness, non-metallic inclusions and structure in welded joint of the sample 1

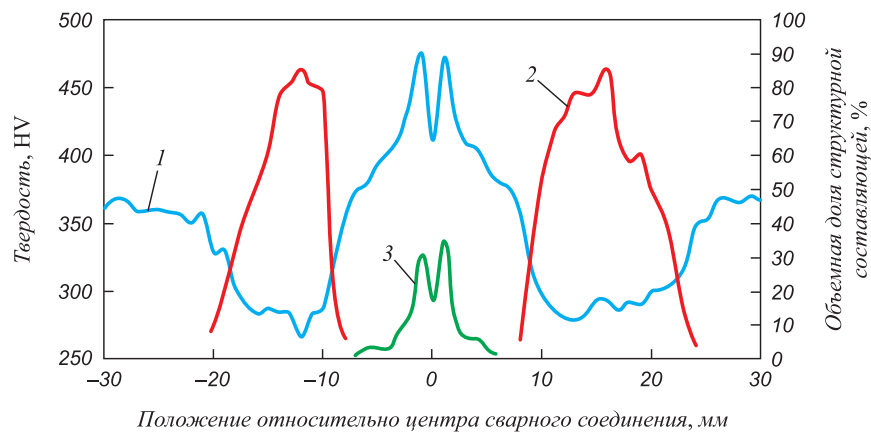


Рис. 4. Распределение микротвердости и объемной доли структурных составляющих в сварном соединении образца 1: 1 – микротвердость; 2 – объемная доля зернистого перлита; 3 – объемная доля мартенсита

Fig. 4. Distribution of microhardness and volume fraction of structural components in welded joint of the sample 1: 1 – microhardness; 2 – volume fraction of granular perlite; 3 – volume fraction of martensite

дит увеличение твердости. На рис. 5 приведено сравнение значений размеров участка сфероидизации (зернистого) перлита, полученных с помощью известных значений мгновенного распределения температурных полей в зоне термического влияния и критических точек Ac_m и Ac_1 , и фактической объемной доли зернистого перлита. Корреляция R изменения размера таких участков, полученных разными способами, составляет 0,98. При этом значения размеров, полученные расчетным путем, отличаются от фактических. Это связано с тем, что значения Ac_m и Ac_1 критических точек, полученные с помощью термодинамического моделирования, определяются для сплава в отожженном состоянии, что отличается от условий процесса сварки. Тем не менее, критические точки достаточно хорошо прогнозируются расчетами.

Влияние параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на понижение твердости ме-

талла сварного соединения относительно твердости основного металла (рис. 6, а) выражается зависимостью:

$$HB_{\min} = 284 + 2,00X_1 - 67,50X_2 - 1,37X_3 + 5,17X_4;$$

$$R^2 = 0,44.$$

В табл. 2 представлен анализ адекватности полученной регрессионной модели.

Влияние параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на протяженность L зоны термического влияния (рис. 6, б) выражается зависимостью:

$$L = -5,7 + 0,17X_1 + 37,92X_2 - 0,43X_3 + 2,33X_4;$$

$$R^2 = 0,98.$$

В табл. 3 представлен анализ адекватности полученной регрессионной модели.

Выводы

В лабораторных условиях опробован способ контактной стыковой сварки, позволяющий получать сварное соединение изделий из рельсовой стали с равномерным распределением твердости и малой зоной термического влияния. Определена зависимость микротвердости от объемной доли структурных составляющих. При увеличении объемной доли зернистого перлита происходит снижение микротвердости. При увеличении количества закалочных структур происходит увеличение твердости. Построены модели влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на твердость металла сварного соединения относительно твердости основного металла и модель влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на протяженность зоны термического влияния. Предлагае-

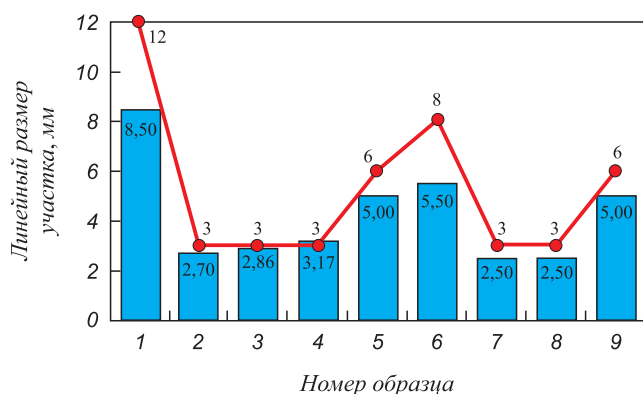


Рис. 5. Сравнение расчетных (■) и фактических (—) размеров участков сфероидизации перлита

Fig. 5. Comparison of calculated (■) and actual (—) sizes of perlite spheroidization sites

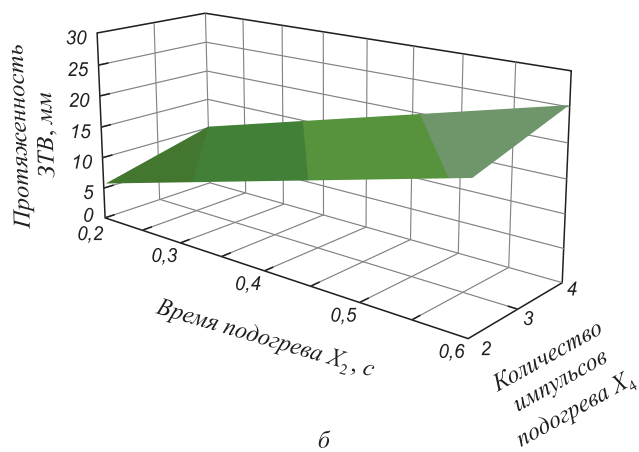
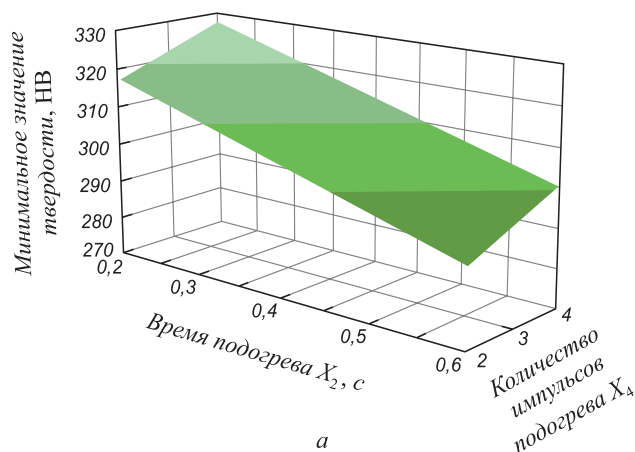


Рис. 6. Зависимость минимальной твердости металла сварного соединения (а) и протяженности ЗТВ (б) от времени подогрева X_2 и количества импульсов подогрев X_4 при $X_1 = 25$ с и $X_3 = 10$ с

Fig. 6. Dependence of the minimum hardness of welded metal (а) and HAZ length (б) on heating time X_2 and the number of heating pulses X_4 at $X_1 = 25$ s and $X_3 = 10$ s

Анализ адекватности регрессионной модели влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на понижение твердости металла сварного соединения

Table 2. Adequacy analysis of the regression model of influence of pulse contact post-welding heating on the decrease in hardness of the welded joint metal

Показатель	Значение показателя			
Коэффициент регрессии	b_1	b_2	b_3	b_4
Значения коэффициентов регрессии	2,00	-67,50	-1,37	5,17
Критерий Стюдента (t_ϕ)	0,60	1,41	0,71	0,53
Табличное значение критерия Стюдента ($t_{\text{табл}}$)	2,776			
Стандартная ошибка коэффициента регрессии (Sb_i)	3,32	47,85	1,91	9,57
Остаточная дисперсия (S_e^2)	71,69			
Остаточное стандартное отклонение (S_e)	8,47			
Средний квадрат отклонений модели от среднего (S_r^2)	983			
Критерий значимости регрессии (критерий Фишера F_ϕ)	13,71			
Табличное значение критерия Фишера ($F_{\text{табл}}$ при $\alpha = 0,05$)	6,36			

Анализ адекватности регрессионной модели влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на протяженность зоны термического влияния

Table 3. Adequacy analysis of regression model of the influence of pulse contact post-welding heating on the length of thermal influence zone

Показатель	Значение показателя			
Коэффициент регрессии	b_1	b_2	b_3	b_4
Значения коэффициентов регрессии	0,17	37,92	-0,43	2,33
Критерий Стюдента (t_ϕ)	1	1,16	0,48	0,42
Табличное значение критерия Стюдента ($t_{\text{табл}}$)	2,776			
Стандартная ошибка коэффициента регрессии (Sb_i)	0,17	2,42	0,10	0,48
Остаточная дисперсия (S_e^2)	1,41			
Остаточное стандартное отклонение (S_e)	1,79			
Средний квадрат отклонений модели от среднего (S_r^2)	103,22			
Критерий значимости регрессии (критерий Фишера F_ϕ)	73,40			
Табличное значение критерия Фишера ($F_{\text{табл}}$)	6,39			

мый способ позволяет проводить регулирование структуры сварного соединения рельсов без дополнительной локальной термической обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2683668 РФ, МПК В23 11/04. Машина для контактной стыковой сварки / Протопопов Е.В., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Кратко С.Н., Хомичева В.Е. // Заявл. 25.12.2017; опубл. 01.04.2019. Бюл. № 10.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.
4. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Высшая школа, 1979. – 400 с.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 1999. – 576 с.
6. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 464 с.
7. Костин В.Н., Тишина Н.А. Статистические методы и модели: учеб. пособие. – Оренбург: изд. ОГУ, 2004. – 138 с.
8. Myers J., Geiger G.H., Poirier D.R. Structure and properties of thermite welds in rails // Welding Journal. 1982. Vol. 61. No. 8. P. 258 – 268.
9. Теория сварочных процессов: учеб. для вузов по спец. «Оборудование и технология сварочного производства» / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; под ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с.
10. Теория сварочных процессов: учеб. изд. / В.М. Неровный, А.В. Коновалов, Б.Ф. Якушин и др.; под ред. В.М. Неровного. – М.: МГТУ им. Баумана, 2016. – 702 с.

11. Weingrill L., Krutzler J., Enzinger N. Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails // *Materials Science Forum*. 2017. Vol. 879. P. 2088 – 2093.
12. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding // *Welding International*. 2014. Vol. 28. No. 7. P. 510 – 520.
13. Mitsuru F., Hiroaki N., Kiyoshi N. Rail flash-butt welding technology // *JFE Technical Report*. 2015. No. 20. P. 159 – 163.
14. Saita K., Karimine K., Ueda M., Iwano K., Yamamoto T., Hiroguchi K. Trends in rail welding technologies and our future approach // *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*. 2013. No. 105. P. 84 – 92.
15. Dahl B., Mogard B., Gretoft B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding // *Svetsaren*. 1995. Vol. 50. No. 2. P. 10 – 14.
16. Takimoto T. Latest welding technology for long rail and its reliability // *Tetsu-to-Hagane*. 1984. Vol. 70. No. 10. P. 40 – 45.
17. Tachikawa H., Uneta T., Nishimoto H. Steel welding technologies for civil construction applications // *Nippon Steel Technical Report*. 2000. Vol. 82. No. 7. P. 35 – 41.
18. Okumura M., Karimine K., Uchino K., Yurioka N. Development of field fusion welding technology for rail-roadrails // *Nippon Steel Technical Report*. 1995. Vol. 65. No. 4. P. 41 – 49.
19. Altemühl B. Welding tramway rails in Bucharest // *Svetsaren*. 2002. Vol. 52. No. 2. P. 32 – 35.
20. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н., Башенко Л.П. Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Моделирование процессов, протекающих при сварке и локальной термической обработке // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 2. С. 93 – 101.

Поступила в редакцию 24 декабря 2019 г.

После доработки 24 января 2020 г.

Принята к публикации 31 января 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. No. 7, pp. 504–511.

WELDING OF DIFFERENTIALLY HEAT-STRENGTHENED RAILS. LABORATORY STUDIES

N.A. Kozyrev, R.A. Shevchenko, A.A. Usol'tsev, A.N. Prudnikov

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, Russia

Abstract. In laboratory conditions, influence of modes of welding with subsequent isothermal holding on quality parameters of welded joint was studied on rail steel samples. Samples were welded with pulses of alternating electric current after welding. Welding was carried out on MS-2008M resistance butt welding machine with a number of alterations of control actions. To measure temperature of the metal in heat affected zone (HAZ), chromel-alumel thermocouples were used. Collection and processing of data from thermocouples was carried out using TEMPOL measuring complex. Temperature of the weld (where it is not possible to install a thermocouple) was measured using HotFind-D thermal imager. Experimental results and physicomachanical properties of the samples are presented: HB hardness, HAZ length, yield strength, tensile strength, ultimate elongation, contraction ratio, and presence of non-metallic inclusions in weld metal. Deviations of hardness were calculated in comparison with the requirements established by GOST R 51685 – 2013 state standard on the surface of samples' welded joints: decrease-increase and total deviation of hardness. Method of resistant butt welding is proposed, which makes it possible to obtain welded joint of items produced of rail steel with a uniform distribution of hardness and small zone of thermal influence. Dependence of microhardness on volume fraction of structural components was determined. Models of impact of pulsed contact post-welding heating parameters on lowering hardness of weld metal compared to the base metal and on the extent of heat-affected zone were constructed. The proposed method allows us to adjust structure of metal welded joints of rails without additional local heat treatment.

Keywords: rails, resistance welding, heat treatment, current, impulse, welding mode, hardness, heat affected zone.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-504-511

REFERENCES

1. Protopopov E.V., Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Krat'ko S.N., Khomicheva V.E. *Mashina dlya kontaktnoi stykovoi svarki* [Unit for resistance butt welding]. Patent RF no. 2683668 RF, MPK B23 11/04. *Byulleten' izobretenii*. 2019, no. 10. (In Russ.).
2. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii* [Planning an experiment to find optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976, 279 p. (In Russ.).
3. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* [Theory of probability and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola, 2003, 479 p. (In Russ.).
4. Gmurman V.E. *Rukovodstvo k resheniyu zadach po teorii veroyatnostei i matematicheskoi statistike* [Manual to solving problems in probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1979, 400 p. (In Russ.).
5. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostei* [Probability theory]. Moscow: Vysshaya shkola, 1999, 576 p. (In Russ.).
6. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostei i ee inzhenernye prilozheniya* [Probability theory and its engineering applications]. Moscow: Akademiya, 2003, 464 p. (In Russ.).
7. Kostin V.N., Tishina N.A. *Statisticheskie metody i modeli: ucheb. posobie* [Statistical methods and models: Manual]. Orenburg: izd. OGU, 2004, 138 p. (In Russ.).
8. Myers J., Geiger G.H., Poirier D.R. Structure and properties of thermite welds in rails. *Welding Journal*. 1982, vol. 61, no. 8, pp. 258–268.
9. Volchenko V.N., Yampol'skii V.M., Vinokurov V.A. etc. *Teoriya svarochnykh protsessov: ucheb. dlya vuzov po spets. "Oborudovanie i tekhnologiya svarochnogo proizvodstva"* [Theory of welding processes: University textbook for students majoring in welding equipment and technology]. Frolov V.V. ed. Moscow: Vysshaya shkola, 1988, 559 p. (In Russ.).
10. Nerovnyi V.M., Kononov A.V., Yakushin B.F. etc. *Teoriya svarochnykh protsessov: ucheb. izd.* [Theory of welding processes: Textbook]. Nerovnyi V.M. ed. Moscow: MGTU im. Bauman, 2016, 702 p. (In Russ.).
11. Weingrill L., Krutzler J., Enzinger N. Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails. *Materials Science Forum*. 2017, vol. 879, pp. 2088–2093.
12. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding. *Welding International*. 2014, vol. 28, no. 7, pp. 510–520.
13. Mitsuru F., Hiroaki N., Kiyoshi N. Rail flash-butt welding technology. *JFE Technical Report*. 2015, no. 20, pp. 159–163.
14. Saita K., Karimine K., Ueda M., Iwano K., Yamamoto T., Hiroguchi K. Trends in rail welding technologies and our future approach.

- Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*. 2013, no. 105, pp. 84–92.
15. Dahl B., Mogard B., Gretoft B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding. *Svetsaren*. 1995, vol. 50, no. 2, pp. 10–14.
 16. Takimoto T. Latest welding technology for long rail and its reliability. *Tetsu-to-Hagane*. 1984, vol. 70, no. 10, pp. 40–45.
 17. Tachikawa H., Uneta T., Nishimoto H. Steel welding technologies for civil construction applications. *Nippon Steel Technical Report*. 2000, vol. 82, no. 7, pp. 35–41.
 18. Okumura M., Karimine K., Uchino K., Yurioka N. Development of field fusion welding technology for rail-roadrails. *Nippon Steel Technical Report*. 1995, vol. 65, no. 4, pp. 41–49.
 19. Altemühl B. Welding tramway rails in Bucharest. *Svetsaren*. 2002, vol. 52, no. 2, pp. 32–35.
 20. Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Usol'tsev A.A., Prudnikov A.N., Bashchenko L.P. Welding of differentially heat-strengthened rails. Modeling of processes during welding and local thermal processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 2, pp. 93–101. (In Russ.).
- Funding.** The work was financially supported by the RFBR and the Kemerovo Region in the framework of scientific project No. 20-48-420003 p_a “Physicochemical and technological fundamentals of development of essentially new method of welding of differentially heat-strengthened rails”.
- Information about the authors:**
- N.A. Kozyrev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Materials, Foundry and Welding Production” (kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru)
- R.A. Shevchenko**, Assistant of the Chair “Materials, Foundry and Welding Production” (shefn1200@mail.ru)
- A.A. Usol'tsev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Materials, Foundry and Welding Production” (a.us_@rambler.ru)
- A.N. Prudnikov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Materials, Foundry and Welding Production” (a.prudnikov@mail.ru)
- Received December 24, 2019
Revised January 24, 2020
Accepted January 31, 2020

УДК 911.3:577.4

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА ГОРОДА НОВОКУЗНЕЦК В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Савина И.Н.^{1,2}, *председатель, старший преподаватель кафедры теплоэнергетики
и экологии (kopr_nvsk@list.ru)*

Водолеев А.С.², *д.с.-х.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии (botanik-egf@yandex.ru)*

Захарова М.А.², *аспирант кафедры металлургии черных металлов (marina-shentsova@mail.ru)*

Домнин К.И.², *аспирант кафедры теплоэнергетики и экологии (domnin_k_i@mail.ru)*

¹ Комитет охраны окружающей среды и природных ресурсов Администрации г. Новокузнецка
(654005, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, пр. Металлургов, 44, каб. 215)

² Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Проведен анализ загрязнения атмосферы города Новокузнецк за пять лет по загрязняющим веществам, источникам загрязнения, видам экономической деятельности, административным районам. Наибольшая доля в массе выбросов в воздух города приходится на CO (61,8 %), SO₂ (17,4 %), твердые вещества (11,3 %), NO₂ (5,9 %), CH₄ (1,8 %). Показана динамика валовых выбросов по годам. Запланированная реализация утвержденных мероприятий национального проекта «Экология» даст возможность уменьшить к 2024 году загрязнения атмосферного воздуха в городе более чем на 20 %, что соответствует федеральному проекту «Чистый воздух». В свете запланированного производственными предприятиями города подготовлены природоохранные программы, с проведением контроля в ходе их исполнения специалистами в области охраны окружающей среды при администрации города и при участии общественного контроля. Проведены различные мероприятия: введены в эксплуатацию автоматические стационарные посты для отслеживания в реальном времени загрязнения воздуха, приобретена передвижная лаборатория для проведения замеров городского воздуха. Для улучшения обращения с отходами в городе реализуются проекты по раздельному сбору. В городе существует и развивается экологический актив, чьи идеи и проекты находят всеобщее понимание и формируют экологическое мировоззрение у общественности города. За период с 2014 по 2018 гг. показаны тенденции изменения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу города Новокузнецк, даны уточнения и объяснения наблюдаемых тенденций изменений количества выбросов.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, федеральный проект «Чистый воздух», национальный проект «Экология», валовые выбросы, металлургическое производство, добыча полезных ископаемых.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-512-520

ВВЕДЕНИЕ

Проблема образования отходов и загрязнения атмосферного воздуха городов, особенно густонаселенных или являющихся промышленными центрами, является весьма актуальной во всем мире [1 – 10]. Ведется постоянный мониторинг состояния окружающей городской среды, собираются данные о видах и количестве загрязняющих веществ и отходах, делаются многолетние прогнозы. На основе собранных данных и наилучших доступных технологий вырабатывается и проводится муниципальная, региональная и национальная экологическая политика.

В Российской Федерации в промышленных городах также существует проблема с образованием отходов и загрязнением атмосферного воздуха [11 – 20]. Одним из самых крупных промышленных центров Южного Кузбасса является город Новокузнецк с его промышленными предприятиями и, в первую очередь, металлургическими. Этот город всегда занимал высо-

кие строчки в рейтинге российских городов с самой неблагоприятной экологической обстановкой. В 2020 г. Новокузнецк назван в Послании Президента РФ Федеральному собранию среди 12 городов России (Братск, Красноярск, Липецк, Магнитогорск, Медногорск, Нижний Тагил, Новокузнецк, Норильск, Омск, Челябинск, Череповец, Чита) с наиболее неблагоприятной экологической обстановкой.

Снижение количества загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу, является в настоящее время основной экологической задачей в Новокузнецке. Достигнуть снижения загрязнения атмосферного воздуха более чем на 20 %, а это ключевой показатель федерального проекта «Чистый воздух», позволит своевременная реализация утвержденных мероприятий национального проекта «Экология».

Промышленные предприятия Новокузнецка участвуют в нацпроекте «Экология» путем разработки природоохранных программ. Фактическая реализация этих программ контролируется специалистами городской

администрации, проводится организованный общественный контроль [20].

В Новокузнецке уже поступили пять автоматических постов по определению в онлайн-режиме загрязнения воздуха. Службой Гидромета проводится их установка и оснащение измерительным оборудованием. Всего запланирована установка 8 постов.

В 2020 году готовится к вводу в эксплуатацию мобильный пункт лаборатории для замеров воздуха города [20].

Для повышения доли переработки твердых коммунальных отходов (ТКО) в Новокузнецке осуществляются проекты по раздельному сбору ТКО «Экомобиль», гражданский проект «Зеленый курс», «Собиратор», «Умный город», по установке контейнеров в частном секторе. В результате реализации проектов для переработки собрано более 15 т вторичного сырья [20].

Необходимо отметить, что за последнее десятилетие переработка отходов возросла с 30 тыс. до 4 млн т/год, а производство продукции из отходов увеличилось с 12 тыс. до 3 млн т/год. Государственные и частные инвестиции в отходоперерабатывающую отрасль составили более 1 млрд 500 млн руб. Переработано и обезврежено около 11 млн т отходов, в том числе 9 млн 500 тыс. т накопленных отходов от предшествующей производственной деятельности [20].

Для формирования экологического мировоззрения и культуры жителей Новокузнецка проводятся экологические акции, которые дают возможность реализовывать природоохранные экологические мероприятия: «Живи лес», «Эковолонтер», «Сделаем», «Зеленая весна», «Чистая среда НК».

В 2019 г. в различных проектах участвовали более 200 организаций и предприятий города, более 50 тыс. человек.

Были достигнуты следующие результаты:

- вывезено более 1 тыс. т мусора;
- очищено 7 км берегов рек и водных объектов города;
- высажено более 15 тыс. деревьев и кустарников.

С каждым годом многочисленнее становится экологический актив города, жители активнее участвуют в экопроектах, а также реализуют свои идеи. Именно это принесло победу Новокузнецку: город стал Эколидером среди городов Кузбасса [20].

На воспитание ответственного отношения к окружающей среде, развитие экосознания с детства направлен проект «Эконаставник»: инициативные новокузнечане проводят экологические уроки в образовательных учреждениях города. Всего к участию в проекте присоединились 15 инициативных жителей города, которые провели тематические открытые уроки более чем в 30 школах города [20].

В октябре 2019 г. в Новокузнецке состоялся III Сибирский экологический форум, на котором рассмат-

ривались приоритетные вопросы в области охраны окружающей среды в Кузбассе, в том числе вопросы создания системы мониторинга атмосферного воздуха, исследования в области углехимии и переработки угля, передовых технологий по переработке отходов, совершенствования законодательства в области охраны окружающей среды. В форуме приняли участие более 2500 человек, свои технологии и разработки представили более 60 компаний, ориентированных на развитие экологии. Итогом форума стала резолюция, объединившая инициативы и предложения участников, которые впоследствии направлены в профильные ведомства и организации [20].

В рамках проекта «Народный бюджет Новокузнецка» мероприятия по расчистке рек, в том числе реки Аба, получили наибольшую поддержку жителей и стали лидером голосования в блоке Экология [20].

На сегодняшний день в рамках государственной программы РФ «Воспроизводство и использование природных ресурсов» расчищено 10 км реки, что позволит улучшить экологическую ситуацию и снизить негативную нагрузку на этот водный объект [20].

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ГОРОДЕ НОВОКУЗНЕЦК

Всего в городе зарегистрировано более 2500 стационарных источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, в том числе около 2000 организованных источников выбросов [20].

Обобщенные данные о валовых выбросах загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников за пять лет представлены в табл. 1.

В 2018 году в атмосферу города Новокузнецк было выброшено 295,8 тыс. т загрязняющих веществ 70 наименований.

По сравнению с 2017 годом валовое количество выбросов загрязняющих веществ в городской воздух в 2018 году снизилось на 17 500 т.

Уменьшение объема загрязняющих веществ связано со снижением выбросов на АО «Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»), вклад которого в общем объеме составляет более 80 % [20].

Основную долю в общей массе городских выбросов в атмосферу составляют CO (61,8 %), SO₂ (17,4 %), твердые вещества (11,3 %), NO₂ (5,9 %), CH₄ (1,8 %). На долю остальных веществ приходится 1,9 % [20].

Количество загрязняющих веществ в общей массе выбросов показано на рис. 1 [20].

Изменение общих валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу города Новокузнецк по годам показано на рис. 2 [20].

Предприятия ОАО «НКМК», ОАО «ЗСМК», ОАО «МНЛС» включены с 2011 года в состав АО «ЕВРАЗ ЗСМК». В 2012 году из состава АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Т а б л и ц а 1

Валовые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу города Новокузнецк

Table 1. Gross emissions of pollutants into the atmosphere of Novokuznetsk

Наименование загрязняющего вещества	Количество выбросов, тыс. т/год				
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
Всего:	274,7	263,2	265,8	313,3	295,8
Твердые:	31,8	31,5	35,5	38,9	33,5
Саж	1,5	1,7	1,7	1,6	1,5
Бенз(а)пирен	0,000093	0,000090	0,000100	0,00500	0,000090
Газообразные и жидкие, из них:					
Диоксид азота	14,6	16,1	17,1	17,6	17,6
Диоксид серы	34,7	35,4	45,0	53,9	51,4
Углерода оксид	173,7	168,98	160,3	196,4	182,9
Фтористый водород	0,48	0,48	0,44	0,43	0,42
Сероводород	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10
Изопропиловый спирт	0,012	0,0011	0,004	0,001	0,001
Фенол	0,164	0,177	0,167	0,156	0,164
Формальдегид	0,0060	0,0007	0,0015	0,0020	0,0100
Цианистый водород	0,68	0,70	0,69	0,66	0,66
Аммиак	0,30	0,31	0,29	0,27	0,30
Метан	14,43	5,69	1,02	1,60	5,20
Прочие газообразные и жидкие	3,70	3,75	3,51	3,35	3,54

вышла ТЭЦ, расположенная в Центральном районе города Новокузнецк, с образованием юридического лица ООО «Центральная ТЭЦ» [20].

В 2018 году на предприятии АО «ЕВРАЗ ЗСМК» наблюдается уменьшение выбросов в атмосферу на 18 173 т по сравнению с 2017 годом. Снижение выбро-

сов произошло за счет наладки теплотехнических режимов работы печей обжига извести, использования железорудного сырья с меньшим содержанием серы, модернизации электрофильтра за котлоагрегатом № 7 Западно-Сибирской ТЭЦ, а также снижения производства кокса, агломерата, чугуна и стали [20].

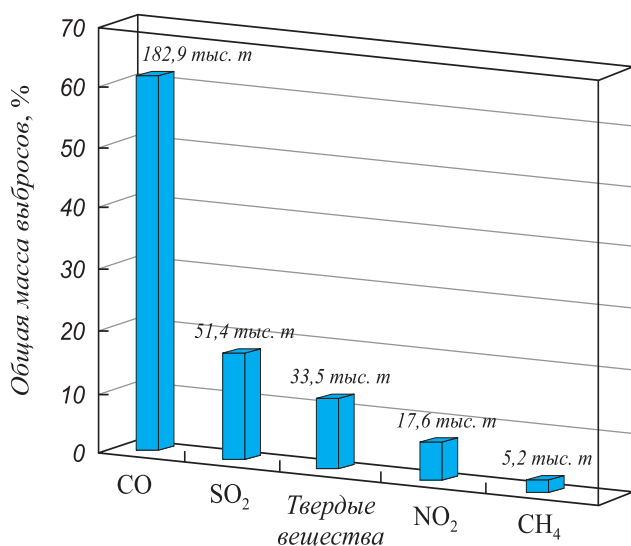


Рис. 1. Количество загрязняющих веществ в общей массе выбросов

Fig. 1. Main share of pollutants in the total mass of emissions

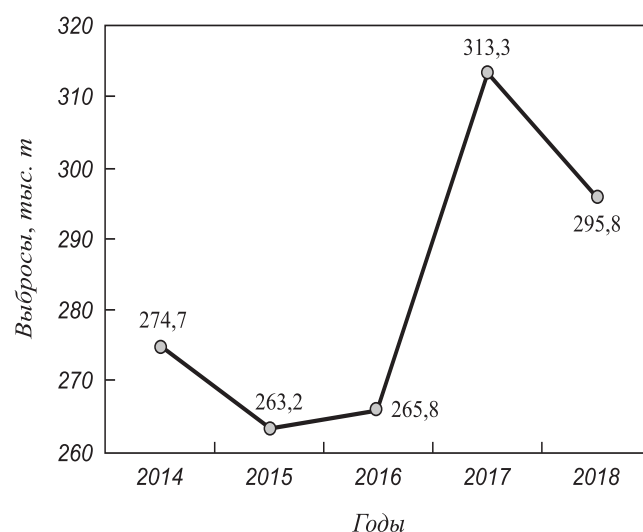


Рис. 2. Изменение общих валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу города Новокузнецк по годам

Fig. 2. Change in total gross emissions of pollutants into the atmosphere of Novokuznetsk by years

В 2018 году ООО «Центральная ТЭЦ» осуществляло производственную деятельность как теплоснабжающая организация (по 03.07.2018 г. включительно, до момента передачи имущественного комплекса ООО «Центральная ТЭЦ» в аренду МКП «Центральная ТЭЦ») [20].

В 2018 году на АО «Кузнецкие ферросплавы» валовые выбросы загрязняющих веществ увеличились по сравнению с 2017 годом на 619,3 т. Это обусловлено тем, что введенные в эксплуатацию в 2017 году после длительного простоя закрытые ферросплавные печи № 12 и 13 работали на протяжении всего 2018 года [20].

Увеличение общих валовых выбросов от ОАО «ЦОФ «Кузнецкая» составляет 196,4 т и произошло в связи с усовершенствованием методики расчета, нормирования и контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Незначительное (2,8 т) увеличение выбросов загрязняющих веществ на предприятии АО «Органика» связано с тем, что максимально возможные показатели концентрации ПДК_{р.з.} значительно превышают показатели инструментальных замеров, выполненных в 2016 г. Значения выбросов HCl и SO₂ выросли в связи с применением утвержденных ПДВ с эжекционно-вентиляционных систем в производствах азалептина и тиаприда [20].

Уменьшение количества выбросов вредных веществ в атмосферу от АО «Завод Универсал» в 2018 году на 13,2 т связано с повышением эффективности существующих очистных установок [20].

В 2018 году на АО «Кузнецкая ТЭЦ» количество выбросов в атмосферу увеличилось на 619,3 т, что связано с увеличением содержания серы и зольности в топливе [20].

В 2018 году суммарные выбросы в атмосферу АО «РУСАЛ Новокузнецкий алюминиевый завод», по сравнению с предыдущим годом уменьшились на 60,1 т, что связано с переводом корпусов 11, 12 на технологию «Экологический Содерберг», внедрением в корпусах 9, 10 технологии обожженного анода с переводом на электролизеры РА-167 [20].

С 02.07.2018 проведена реорганизация АО «Евраз-руда», Абагурская фабрика филиала «Евразруда-филиал АО «ЕВРАЗ ЗСМК» образована на базе Абагурского филиала АО «Евразруда» по форме присоединения к АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Незначительное увеличение выбросов на 91,3 т связано с изменением качества топлива.

В связи с тем, что предприятие ООО «Шахта «Абашевская» находится на консервации горных выработок (в соответствии с проектом 2014 г.), выбросы по сравнению с уровнем 2017 года изменились незначительно [20].

Уменьшение выбросов вредных веществ на 43,7 т от производственной деятельности ООО «Вторресурс-Пе-

реработка» связано со снижением производства фракционного щебня [20].

Для сравнения в табл. 2 приведены валовые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от крупных предприятий города за пять лет.

В 2018 г. на предприятиях города уловлено 2 073 700 т вредных веществ, что составляет 87,5 % от объема отходящих выбросов. Наиболее высокая степень улавливания отмечена на угледобывающих предприятиях (98,9 %), в электроэнергетике (95 %), металлургическом производстве (83 %). Низкая степень улавливания вредных веществ наблюдается на предприятиях транспорта и связи (38 %), при производстве прочих неметаллических минеральных продуктов (37,7 %) [20].

Вклад крупных промышленных предприятий в общегородские валовые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу в 2018 году показан на рис. 3 [20].

Сведения о валовых выбросах загрязняющих веществ в атмосферу, их очистке и утилизации по видам экономической деятельности представлены в табл. 3.

На уменьшение общего валового выброса загрязняющих веществ в атмосферу города повлияло снижение производства продукции на предприятиях, использование более качественного сырья и модернизация предприятий [20].

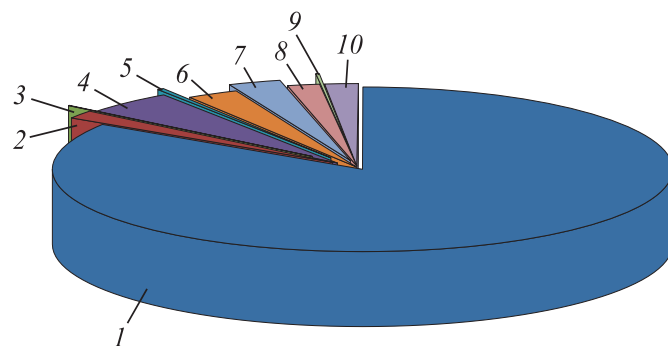


Рис. 3. Вклад крупных промышленных предприятий города Новокузнецк в общегородские валовые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу в 2018 году:

- 1 – АО «ЕВРАЗ ЗСМК» – 84,2 %;
 2 – Абагурский филиал АО «Евразруда» – 1,29 %;
 3 – ООО «Шахта Абашевская» – 0,012 %; 4 – АО «РУСАЛ Новокузнецк» – 4,9 %; 5 – ООО «Центральная ТЭЦ» – 0,2%;
 6 – АО «Кузнецкие ферросплавы» – 2,9 %; 7 – АО «Кузнецкая ТЭЦ» – 2,8 %; 8 – МП Новокузнецкого городского округа «Сибирская сбытовая компания» – 1,7 %; 9 – ООО «Западно-Сибирский электрометаллургический завод» – 0,14 %; 10 – прочие – 1,858 %

Fig. 3. Contribution of large industrial enterprises of Novokuznetsk to city gross emissions of pollutants into the atmosphere in 2018:

- 1 – JSC “EVRAZ ZSMK” – 84,2 %;
 2 – Abagursky branch of JSC “Evrazruda” – 1,29 %;
 3 – LLC “Abashevskaya Mine” – 0,012 %; 4 – JSC “RUSAL Novokuznetsk” – 4,9 %; 5 – LLC “Central CHP” – 0,2%;
 6 – JSC “Kuznetsk Ferroalloys” – 2,9 %; 7 – JSC “Kuznetsk CHP” – 2,8 %; 8 – Municipal Enterprise of the Novokuznetsk city district “Siberian Sales Company” – 1,7 %; 9 – LLC “West Siberian Electrometallurgical Plant” – 0,14 %; 10 – others – 1,858 %

Т а б л и ц а 2

Валовые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от крупных промышленных предприятий города

Table 2. Changes in gross emissions of pollutants into the atmosphere from large industrial enterprises

Наименование предприятия	Количество выбросов, т/год				
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	210 464,9	212 274,8	220 785,6	267 136,2	248 963,2
Площадка строительного проката – Заводской район	207 544,0	209 285,5	217 272,7	264 201,2	246 417,4
Площадка железнодорожного проката – Центральный район	2920,9	2989,3	3512,9	2935,0	2518,4
ООО «Вторресурс-Переработка»	357,9	305,6	264,7	309,7	266,0
ООО «Центральная ТЭЦ»	2433,2	1247,6	730,3	692,4	692,5
Абагурская фабрика филиала «Евразруда-филиал АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	4824,5	4155,8	4577,9	3724,2	3815,5
ООО «Шахта «Абашевская»	14 469,0	5236,0	147,6	19,1	35,5
АО «РУСАЛ Новокузнецкий алюминиевый завод»	15 605,4	15 886,9	14 624,6	14 577,7	14 517,6
ООО «Западно-Сибирский электрометаллургический завод»	413,5	438,3	367,0	373,0	414,0
АО «Кузнечские ферросплавы»	9144,4	8425,3	6389,5	7113,6	8686,7
ООО «СибЭнерго» (МП Новокузнецкого городского округа «Сибирская Сбытовая Компания»)	5667,7	5439,1	5906,5	5429,497	5050,1
АО «Кузнечская ТЭЦ»	7756,4	7177,6	8453,6	7562,4	8181,7
ОАО «ЦОФ «Кузнечская»	556,1	384,5	444,7	413,1	609,5
АО «ЦОФ «Абашевская»	244,5	250,0	283,0	279,2	289,6
АО «Завод Универсал»	222,7	191,5	267,1	242,0	228,8
АО «Органика»	10,6	12,0	9,7	13,0	15,8

Т а б л и ц а 3

Сведения о валовых выбросах загрязняющих веществ в атмосферу, их очистке и утилизации по видам экономической деятельности

Table 3. Gross emissions of pollutants into the atmosphere, their cleaning and disposal by type of economic activity

Вид экономической деятельности	Коли- чество пред- приятий	Объем загрязняющих веществ, тыс. т в год				Факти- чески уловлено. %
		отходящих	фактически уловлено и обезврежено		Выбро- шено в атмосферу	
			всего	из них утилизировано		
Металлургическое производство	8	1607,786	1334,932	1322,784	272,854	83,0
Добыча топливно-энергетических полезных ископаемых	5	429,080	424,331	421,948	4,749	98,9
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	6	234,818	223,877	2,770	10,941	95,0
Производство прочих неметалли- ческих минеральных продуктов	5	0,277	0,113	0,113	0,164	37,7
Химическая промышленность	1	0,032	0,016		0,016	50,0
Производство машин и обору- дования	8	0,561	0,283	0,278	0,278	47,2
Транспорт и связь	7	0,133	0,038	0,008	0,095	38,0
Строительство	11	0,315	0,168	0,168	0,147	56,0
Другие	19	96,492	89,936	89,936	6,556	93,2
Всего по городу	70	2369,494	2073,694	1837,969	295,8	87,5

Т а б л и ц а 4

Сведения о валовых выбросах, их очистке и утилизации в 2018 году на крупных предприятиях

Table 4. Gross emissions of large enterprises, their cleaning and disposal in 2018

Предприятие	Количество загрязняющих веществ, тыс. т в год			Фактически уловлено, %	
	отходящих	фактически уловлено и обезврежено			
		всего	из них утилизировано		
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	1522,388	1273,425	1273,092	248,963	83,6
ООО «Шахта «Абашевская»	0,035			0,035	0
Абагурская фабрика филиала «Евразруда – филиал АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	7,789	3,974	2,478	3,815	50,9
АО «РУСАЛ Новокузнецкий алюминиевый завод»	26,598	12,081	5,735	14,517	45,4
АО «Кузнецкая ТЭЦ»	109,808	101,626		8,182	92,6
АО «Кузнецкие ферросплавы»	52,604	43,917	43,917	8,687	83,5
МП Новокузнецкого городского округа «Сибирская Сбытовая Компания»	7,820	2,770	2,770	5,050	35,5
АО «Завод Универсал»	0,466	0,238	0,238	0,228	47,6
АО «Органика»	0,032	0,016		0,016	50,0
ОАО «ЦОФ «Кузнецкая»	420,080	419,470	419,470	0,610	99,8
АО «ЦОФ «Абашевская»	1,176	0,887		0,289	73,9
ООО «Центральная ТЭЦ»	0,891	0,199		0,692	22,1

Информация о валовых выбросах крупных предприятий, их очистке и утилизации за 2018 г. представлена в табл. 4.

Величина выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от промышленных предприятий различной экономической деятельности и доля их вклада в общий объем загрязнения атмосферы в целом по городу в 2018 году представлены в табл. 5.

На основании анализа территориального распределения источников загрязнения проведена оценка техногенной нагрузки на окружающую среду по районам города [20].

Воздух в Заводском районе города Новокузнецк загрязняется 17 промышленными предприятиями, в наибольшей степени ОАО «ЦОФ «Кузнецкая» и АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (площадка строительного проката).

Основные загрязняющие вещества в воздухе Заводского района города Новокузнецк представлены ниже (через косую приведены данные по выбросам в районе и в городе):

Загрязняющие вещества	Доля выбросов, %
Оксид углерода CO	66/86
Оксид серы SO ₂	17/85

Воздух в Центральном районе города Новокузнецк загрязняется 21 промышленным предприятием, в наибольшей степени влияют Абагурская фабрика филиала

«Евразруда – филиал АО «ЕВРАЗ ЗСМК», АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (площадка железнодорожного проката), также следует отметить ООО «Западно-Сибирский электрометаллургический завод» и ООО «Вторресурс-Переработка».

Т а б л и ц а 5

Валовые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу с разбивкой по видам экономической деятельности в 2018 году

Table 5. Gross emissions of pollutants into the atmosphere aggregated by type of economic activity in 2018

Вид экономической деятельности	Валовый выброс, тыс. т/год	Доля вклада, %
Металлургическое производство	272,854	92,24
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	10,941	3,70
Добыча топливно-энергетических полезных ископаемых	4,749	1,60
Добыча полезных ископаемых, кроме топливно-энергетических	3,984	1,35
Производство прочих неметаллических минеральных продуктов	0,164	0,06
Другие	3,108	1,05
Итого	295,800	100,00

Основные загрязняющие вещества в воздухе Центрального района представлены ниже:

Т а б л и ц а 6

Загрязняющие вещества	Доля выброса, %
Твердые вещества:	20,4
сажа	6,7
зола углей	12,8
Оксид углерода CO	51,4
Оксид серы SO ₂	10,9

В Кузнецком районе расположены площадки различных промышленных предприятий, среди них крупнейшими являются АО «Кузнецкая ТЭЦ», АО «РУСАЛ Новокузнецкий алюминиевый завод», АО «Завод Универсал», АО «Кузнецкие ферросплавы», АО «Органика». Выбросы в воздух Кузнецкого района фтористых соединений (фтороводород и др.) составляют 81,7 % всех выбросов по городу Новокузнецк. Кроме того, предприятия цветной металлургии выбрасывают оксид углерода и бенз(а)пирен. Выбросы АО «РУСАЛ Новокузнецкий Алюминиевый завод» (от всех выбросов по Новокузнецку): сернистый ангидрид – 11,36 %, оксид углерода – 5,5 %,

Воздух Орджоникидзевского района загрязняется 6 предприятиями, крупнейшими из которых являются МП Новокузнецкого городского округа «Сибирская Сбытовая Компания» и АО «ЦОФ «Абашевская». Основные выбросы – это оксид углерода (2,7 % от всех городских выбросов), зола от сжигания угля, сажа.

Воздух Куйбышевского района города Новокузнецк в наибольшей степени загрязняется 13 предприятиями, среди которых АО «Новокузнецкий хладокомбинат», муниципальные котельные, предприятия автотранспорта и железнодорожного транспорта. Основные загрязняющие вещества в воздухе Куйбышевского района представлены ниже:

Загрязняющие вещества	Доля выброса, %
Оксид углерода CO	51,8
Зола углей	8,6
Сажа	8,9
Оксид серы SO ₂	10,5
Оксид азота NO ₂	5,2

Валовые выбросы по районам города в 2018 году представлены в табл. 6.

Выводы

За период 2014 – 2018 гг. в среднем можно отметить некоторое увеличение валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу города Новокузнецк в связи с увеличением выпуска продукции промышленными предприятиями и усовершенствованием методик оп-

Распределение валовых выбросов по районам города в 2018 году

Table 6. Distribution of gross emissions by city districts in 2018

Район	Валовый выброс, тыс. т/год	Доля вклада, %
Заводской	249,917	84,50
Кузнецкий	31,700	10,72
Центральный	8,130	2,75
Орджоникидзевский	5,450	1,80
Куйбышевский	0,600	0,20
Ильинский	0,003	0,001
Всего по городу	295,800	100,00

ределения их количества, при этом намечается тенденция к снижению за счет внедрения новых технологических решений и модернизации производства, что способствует достижению целевого значения ключевого показателя федерального проекта «Чистый воздух».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nikolić D., Djordje Nikolić, Milošević N., Mihajlović Ivan, Živković Ž., Tasić V., Kovačević R., Petrović N. Multi-criteria analysis of air pollution with SO₂ and PM₁₀ in urban area around the copper smelter in Bor, Serbia // Water, Air, and Soil Pollution. 2010. Vol. 206. No. 1-4. P. 369 – 383.
2. Cyrus J., Heinrich J., Richter K., Wölke G., Wichmann H.-E. Sources and concentrations of indoor nitrogen dioxide in Hamburg (West Germany) and Erfurt (East Germany) // Science of the Total Environment. 2000. Vol. 250. No. 1-3. P. 51 – 62.
3. Agrawal A., Sahu K.K., Pandey B.D. Solid waste management in non-ferrous industries in India // Resources, Conservation and Recycling. 2004. Vol. 42. No. 2. P. 99 – 120.
4. De Miranda R.M., Andrade M.F., Fornaro A., Astolfo R., de Andre P.A., Saldiva P. Urban air pollution: a representative survey of PM_{2,5} mass concentrations in six Brazilian cities // Air Quality, Atmosphere & Health. 2012. Vol. 5. No. 1. P. 63 – 77.
5. Streets D.G., Waldhoff S.T. Present and future emissions of air pollutants in China: SO₂, NO_x, and CO // Atmospheric Environment. 2000. Vol. 34. No. 3. P. 363 – 374.
6. Mohiuddin K., Strezov V., Nelson P.F., Stelcer E. Characterization of trace metals in atmospheric particles in the vicinity of iron and steelmaking industries in Australia // Atmospheric Environment. 2014. Vol. 83. P. 72 – 79.
7. Pokorná P., Hovorka J., Klán M., Hopke P.K. Source apportionment of size resolved particulate matter at a European air pollution hot spot // Science of the Total Environment. 2015. Vol. 502. No. 1. P. 172 – 183.
8. Pastuszka J., Hlawiczka S., Willeke K. Particulate pollution levels in Katowice, a highly industrialized Polish city // Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere. 1993. Vol. 27. No. 1. P. 59 – 65.
9. Culver B. D., Walsh T. E. Some aspects of systems engineering for waste management in California // Archives of Environmental Health: An Int. Journal. 1968. Vol. 17. No. 3. P. 377 – 382.
10. Harashima Y., Morita T. A comparative study on environmental policy development processes in the three East Asian countries:

- Japan, Korea, and China // *Environmental Economics and Policy Studies*. 1998. Vol. 1. No. 1. P. 39 – 67.
11. Клюев Н.Н., Яковенко Л.М. «Грязные» города России: факторы, определяющие загрязнение атмосферного воздуха // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26. № 2. С. 237 – 250.
 12. Звягинцева А.В. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха городов России на основе определения вероятности неблагоприятных событий // *Научные ведомости Белгородского государственного университета*. Серия: Экономика. Информатика. 2016. Т. 39. № 16 (237). С. 107 – 114.
 13. Битюкова В.Р. Экологический рейтинг городов России // *Экология и промышленность России*. 2015. Т. 19. № 3. С. 34 – 39.
 14. Безуглая Э.Ю., Воробьева И.А., Ивлева Т.П. Химическая активность атмосферы на территории России // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2009. № 559. С. 121 – 133.
 15. Голубничий А.А., Литюк Т.С., Тюкалов П.А. Динамика загрязнения атмосферного воздуха города Черногорска // *Universum: химия и биология*. 2014. № 2 (3). С. 7 – 15.
 16. Битюкова В.Р., Касимов Н.С., Власов Д.В. Экологический портрет российских городов // *Экология и промышленность России*. 2011. № 4. С. 6 – 18.
 17. Гусева О.И. Антропогенное загрязнение городов Алтайского края. – В кн.: *Материалы Международной конференции «Биоразнообразие, проблемы экологии Горного Алтая и сопредельных регионов»*. – Горно-Алтайск, 2008. С. 34 – 37.
 18. Ильченко И.А. Исследование первичного и вторичного загрязнения воздуха промышленных городов и путей его снижения // *Изв. вуз. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. 2009. № 6. С. 79 – 83.
 19. Цыбина А.В., Дьяков М.С., Вайсман Я.И. Опыт создания современных автоматизированных систем мониторинга атмосферного воздуха на территории промышленно развитых городов России // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2015. № 1. С. 65 – 89.
 20. Сайт Комитета охраны окружающей среды и природных ресурсов Администрации города Новокузнецка – Информация о состоянии окружающей среды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://eko-nk.ru/informaciyaosostoyaniokruzhayushey_sredy/ (дата обращения: 06.02.2020).

Поступила в редакцию 21 января 2020 г.

После доработки 2 марта 2020 г.

Принята к публикации 10 марта 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 7, pp. 512–520.

ENVIRONMENTAL POLICY OF NOVOKUZNetsk IN THE CONTEXT OF MODERN REQUIREMENTS FOR METALLURGICAL INDUSTRY DEVELOPMENT

I.N. Savina¹, A.S. Vodoleev², M.A. Zakharova²,
K.I. Domnin²

¹ Committee for Environmental Protection and Natural Resources of the Administration of Novokuznetsk, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, Russia

² Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, Russia

Abstract. Analysis of air pollution by pollutants, sources of pollution, types of economic activity, and administrative areas in the city of Novokuznetsk over 5 years was carried out. The largest share in the city air emissions is accounted for: CO – 61.8 %; SO₂ – 17.4 %; solids – 11.3 %; NO₂ – 5.9 %; CH₄ – 1.8 %. Dynamics of gross emissions by years is shown. Planned implementation of the approved measures of the national project Ecology will make it possible to reduce air pollution in the city by more than 20 % by 2024, which corresponds to the federal project Clean Air. According to planes of the city industrial enterprises, environmental programs have been prepared, with monitoring by environmental specialists from the city administration and public control. Various measures were taken: automatic stationary posts were put into operation to monitor air pollution in real time; mobile laboratory was acquired to measure urban air. To improve waste management in the city, separate collection projects were implemented. Environmental assets exist and develop in the city, which ideas and projects find common understanding and form ecological attitude of the urban community. Trends in gross emissions of pollutants into the atmosphere of Novokuznetsk are shown for the period of 2014 – 2018; refinements and explanations of the observed trends are given.

Keywords: air pollution, the federal project Clean Air, the national project Ecology, gross emissions, metallurgical production, mining.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-512-520

REFERENCES

1. Nikolić D., Djordje Nikolić, Milošević N., Mihajlović I., Živković Ž., Tasić V., Kovačević R., Petrović N. Multi-criteria analysis

of air pollution with SO₂ and PM₁₀ in urban area around the copper smelter in Bor, Serbia. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2010, vol. 206, no. 1-4, pp. 369–383.

2. Cyrus J., Heinrich J., Richter K., Wölke G., Wichmann H.-E. Sources and concentrations of indoor nitrogen dioxide in Hamburg (West Germany) and Erfurt (East Germany). *Science of the Total Environment*. 2000, vol. 250, no. 1-3, pp. 51–62.
3. Agrawal A., Sahu K.K., Pandey B.D. Solid waste management in non-ferrous industries in India. *Resources, Conservation and Recycling*. 2004, vol. 42, no. 2, pp. 99–120.
4. De Miranda R.M., Andrade M.F., Fornaro A., Astolfo R., de Andre P.A., Saldiva P. Urban air pollution: a representative survey of PM_{2.5} mass concentrations in six Brazilian cities. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2012, vol. 5, no. 1, pp. 63–77.
5. Streets D.G., Waldhoff S.T. Present and future emissions of air pollutants in China: SO₂, NO_x, and CO. *Atmospheric Environment*. 2000, vol. 34, no. 3, pp. 363–374.
6. Mohiuddin K., Strezov V., Nelson P.F., Stelcer E. Characterization of trace metals in atmospheric particles in the vicinity of iron and steelmaking industries in Australia. *Atmospheric Environment*. 2014, vol. 83, pp. 72–79.
7. Pokorná P., Hovorka J., Klán M., Hopke P.K. Source apportionment of size resolved particulate matter at a European air pollution hot spot. *Science of the Total Environment*. 2015, vol. 502, no. 1, pp. 172–183.
8. Pastuszka J., Hlawiczka S., Willeke K. Particulate pollution levels in Katowice, a highly industrialized Polish city. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*. 1993, vol. 27, no. 1, pp. 59–65.
9. Culver B. D., Walsh T. E. Some aspects of systems engineering for waste management in California. *Archives of Environmental Health: An Int. Journal*. 1968, vol. 17, no. 3, pp. 377–382.
10. Harashima Y., Morita T. A comparative study on environmental policy development processes in the three East Asian countries: Japan, Korea, and China. *Environmental Economics and Policy Studies*. 1998, vol. 1, no. 1, pp. 39–67.
11. Klyuev N.N., Yakovenko L.M. “Dirty” cities of Russia: factors determining atmospheric air pollution. *Vestnik Rossiiskogo*

- universiteta družby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti.* 2018, vol. 26, no. 2, pp. 237–250. (In Russ.).
12. Zvyagintseva A.V. Modeling air pollution in Russian cities based on determining probability of adverse events. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika.* 2016, vol. 39, no. 16 (237), pp. 107–114. (In Russ.).
13. Bitukova V.R. Ecological rating of Russian cities. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii.* 2015, vol. 19, no. 3, pp. 34–39. (In Russ.).
14. Bezuglaya E.Yu., Vorob'eva I.A., Ivleva T.P. Chemical activity of atmosphere in Russia. *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A.I. Voeikova.* 2009, no. 559, pp. 121–133. (In Russ.).
15. Golubnichii A.A., Lityuk T.S., Tyukalov P.A. Dynamics of air pollution in Chernogorsk. *Universum: khimiya i biologiya.* 2014, no. 2 (3), pp. 7–15. (In Russ.).
16. Bitukova V.R., Kasimov N.S., Vlasov D.V. Ecological portrait of Russian cities. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii.* 2011, no. 4, pp. 6–18. (In Russ.).
17. Guseva O.I. Anthropogenic pollution in cities of the Altai Territory. In: *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii "Bioraznoobrazie, problemy ekologii Gornogo Altaya i sopredel'nykh regionov"* [Materials of the Int. Conf. "Biodiversity, Ecological Problems of the Altai Mountains and Neighboring Regions"]. Gorno-Altaysk, 2008, pp. 34–37. (In Russ.).
18. Il'chenko I.A. The study of primary and secondary air pollution in industrial cities and ways of its reduction. *Izv. vuz. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki.* 2009, no. 6, pp. 79–83. (In Russ.).
19. Tsybina A.V., D'yakov M.S., Vaisman Ya.I. Experience in creating modern automated atmospheric air monitoring systems in the industrial cities of Russia. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika.* 2015, no. 1, pp. 65–89. (In Russ.).
20. *Sait Komiteta okhrany okruzhayushchei sredy i prirodnikh resursov Administratsii goroda Novokuznetska – Informatsiya o sostoyanii okruzhayushchei sredy* [Website of the Committee for Environment Protection and Natural Resources of the Novokuznetsk City Administration – Information on the state of environment]. Available at URL: <https://eko-nk.ru/informaciyaosostoyaniiookruzhayushcheymsredy/> (Accessed 06.02.2020). (In Russ.).

Information about the authors:

I.N. Savina, Chairman of the Committee for Environmental Protection and Natural Resources of the Administration of Novokuznetsk, Senior Lecturer of the Chair "Thermal Power and Ecology" (kopr_nvkl@list.ru)
A.S. Vodoleev, Dr. Sci. (Agr.), Professor of the Chair "Thermal Power and Ecology" (botanik-egf@yandex.ru)
M.A. Zakharova, Postgraduate of the Chair of Ferrous Metallurgy (marina-shentsova@mail.ru)
K.I. Domnin, Postgraduate of the Chair "Thermal Power and Ecology" (domnin_k_i@mail.ru)

Received January 21, 2020

Revised March 2, 2020

Accepted March 10, 2020

УДК 662.742.1

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИГОДНОСТИ ПОЛУКОКСА КАК УГЛЕРОДИСТОГО ВОССТАНОВИТЕЛЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МАРГАНЦЕВЫХ И КРЕМНИСТЫХ СПЛАВОВ

Шубина А.А.¹, инженер отдела хроматографии, экологии
и нефтепродуктов (osokina.alina@inbox.ru)

Журавлева Н.В.^{1,2}, д.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии,
генеральный директор (zhuravleva_nv@zsis.ru)

Коротков С.Г.², к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии (kafedra-TEE@yandex.ru)

Лазаревский П.П.³, к.т.н., главный специалист технологического
отдела (lazarevskiy_pp@sgmk-group.ru)

Романенко Ю.Е.³, к.т.н., ведущий специалист технологического
отдела (romanenko_ye@sgmk-group.ru)

¹АО «Западно-Сибирский испытательный центр»

(654006, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Орджоникидзе, 9)

²Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

³ООО «Регионстрой»

(654041, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кутузова, 37а)

Аннотация. Представлены результаты апробации применения полукокса в качестве углеродистого восстановителя при производстве марганцевых и кремнистых сплавов. Установлена принципиальная возможность использования полукокса в составе углеродной части шихты в качестве базового восстановителя для производства ферросиликомарганца. Отмечено, что новый восстановитель в чистом виде работает хуже, чем в смеси с углем. Показано, что наибольший синергетический эффект при производстве ферросиликомарганца достигнут при работе полукокса вместе с углем, при этом достигнуты максимальная производительность печи 43 т/сутки, максимальный коэффициент извлечения 87,9 %, минимальное удельное образование пыли 49 кг/т сплава. Выявлено, что при производстве ферросилиция использование нового восстановителя не дало существенного положительного эффекта, в том числе из-за его низкой структурной прочности. Отмечено, что на производительность печи влияют структура и вид восстановителя: при использовании в шихте восстановителя с более высокой реакционной способностью возможно получение более высоких производственных показателей печи. При производстве ферросилиция изменение удельного пылеобразования тесно связано с уровнем суточного производства и удельным расходом электроэнергии и может служить индикатором работы печи. Производительность печи при прочих равных условиях определяется величиной вводимой полезной мощности. При избытке углерода в шихте увеличение полезной мощности приводит к незначительному увеличению производительности печи, но при этом существенно увеличивается расход электроэнергии и удельное пылеобразование. Влияние технологических факторов на технико-экономические показатели плавки определяется степенью посадки электродов в печи.

Ключевые слова: полукокс, твердый углеродистый восстановитель, ферросилиций, ферросиликомарганец, ферросплавное производство, технологические свойства, реакционная способность, применение в металлургии.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-521-528

ВВЕДЕНИЕ

Производство ферросплавов является одним из важнейших элементов металлургического производства Кузбасса. Однако в настоящее время наблюдается острая нехватка основного восстановителя, применяемого в металлургических процессах, – кокса из дефицитных спекающихся каменных углей. В связи с этим ведутся активные поиски новых перспективных углеродистых материалов, которые способны полностью или частично заменить каменноугольный кокс в различных металлургических процессах, в том числе в производстве ферросплавов [1 – 5].

Углеродистый материал, применяемый в качестве твердого восстановителя при выплавке кремния, а также ферросплавов высокочистых сортов, должен обладать развитой пористой структурой, высокой реакционной способностью и электросопротивлением, достаточной механической прочностью и минимальной зольностью. Опыт промышленного производства металлургического кремния различных марок показывает, что такими свойствами обладают древесный уголь, нефтяной кокс, некоторые сорта малозольного каменного угля, древесная щепа. Однако стоит отметить, что требованиям, предъявляемым к твердому восстановителю, полностью не удовлетворяет ни один из назван-

ных материалов. Только использование их в различных комбинациях позволяет создать благоприятные условия для эффективного протекания процессов восстановления в электропечи [6 – 19].

По качественным показателям и величине запасов добываемого угля Кузнецкий бассейн является наиболее перспективной угольной базой страны. Особое место в Кузнецком угольном бассейне занимают длиннопламенные угли. Их малая зольность, возможность добычи открытым способом, мощность пластов, чистота по сере и фосфору, близость бассейна к промышленным предприятиям послужили причиной изыскания экономически выгодных способов переработки их в сырье с получением специальных видов кокса [20 – 22].

Целью настоящей работы является оценка технологической пригодности полукокса в качестве углеродистого восстановителя при производстве марганцевых и кремнистых сплавов.

В качестве исходного сырья использовали длиннопламенные угли месторождений Кузбасса. Исследованы следующие образцы углей: 1 – уголь с ООО «Разрез «Талдинский-Западный»; 2 – уголь с ООО «Разрез им. В.И. Черемнова»; 3 – уголь с АО «Разрез «Инской». В настоящей работе представлены результаты апробации полученного полукокса как углеродистого восстановителя при производстве марганцевых и кремнистых сплавов.

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛУКОКСА

Опытно-промышленная партия (около 200 т) полукокса была получена на опытной установке в Новосибирске. По технологической схеме производства полукокса обогащенный уголь загружается в электрокальцинатор, где происходит предварительный разогрев сырого материала до 700 °С и последующий резистивный нагрев до 900 – 1200 °С путем пропускания тока между верхним и нижним электродами непосредственно через плотный слой угля. Характеристики полученного полукокса: содержание серы 0,18 %, влаги 7,15 %, золы 4,47 %, углерода 96,3 % (по массе); содержание летучих 2,97 %; реакционная способность (CRI) 183,4; удельное электрическое сопротивление 4,404 мОм·м.

При проведении опытной кампании были поставлены следующие цели: определить эффективность применения нового полукокса как восстановителя по сравнению с принятой технологией производства ферросиликомарганца и ферросилиция на предприятии ООО «Западно-Сибирский электрометаллургический завод» (ООО «ЗСЭМЗ»); определить оптимальный состав восстановительной смеси; проанализировать технико-экономические показатели, полученные в ходе работы с применением нового полукокса для производства ферросиликомарганца и ферросилиция на ООО «ЗСЭМЗ».

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЛАВКИ ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦА С ПРИМЕНЕНИЕМ НОВОГО ВОССТАНОВИТЕЛЯ

Была проведена опытная кампания выплавки ферросиликомарганца с применением полученного высококорреакционного восстановителя. Выплавку проводили в печи РКО-12. На рис. 1 представлены зависимости производительности, удельного пылеобразования, фактической мощности и удельного расхода электроэнергии от состава шихты в различные периоды плавки.

Работу печи можно разделить на три периода:

- переходный период (П): восстановитель – уголь;
- период I: восстановитель – уголь + полученный полукокс;
- период II: восстановитель – чистый полукокс.

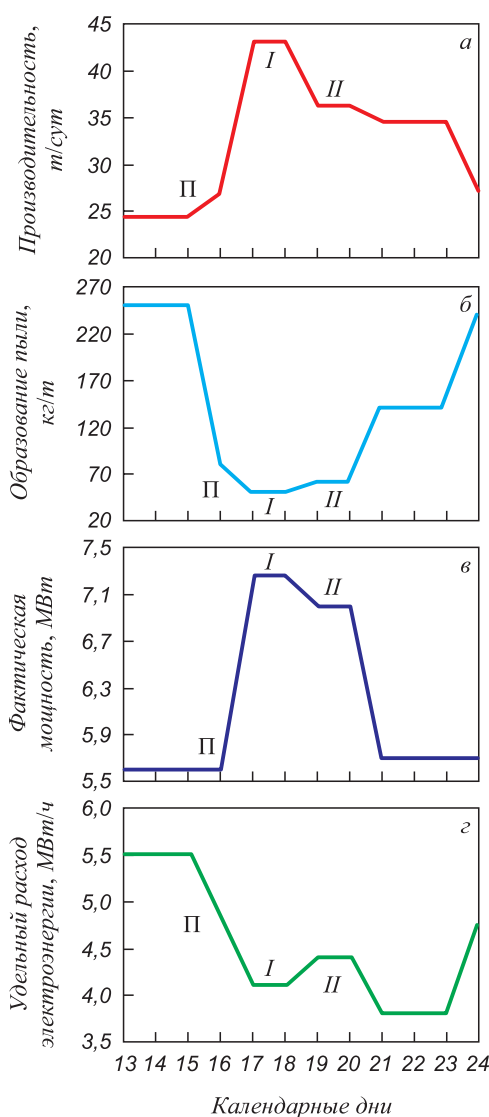


Рис. 1. Зависимость производительности печи (а), пылеобразования (б), фактической мощности (в) и удельного расхода электроэнергии (г) от состава шихты в различные периоды плавки

Fig. 1. Dependence of the furnace performance (а), dust formation (б), actual power (в) and specific energy consumption (г) on charge composition in different periods of smelting

В предопытный период (3 дня) печь работала с избытком углерода, длина электродов составляла 1,3 м. Отсутствие необходимой глубины посадки электродов привело к существенному (250 кг/т сплава) пылеобразованию (рис. 1, б), а также к низкой производительности (в среднем 24,3 т/сут).

Переходный период

При подаче нового восстановителя была скорректирована общая навеска углерода на недостаток в шихте с целью обеспечения более глубокой посадки электродов. Печь достаточно быстро отреагировала на введение в шихту нового восстановителя. Посадка электродов увеличилась (1,6 м), производительность печи возросла с 24,3 до 26,8 т/сут.

Следует отметить существенное влияние нового восстановителя на горение дуг: работа дуги более ровная, меньше скачки токовой нагрузки. Это привело к существенному уменьшению пылеобразования: удельное пылеобразование снизилось с 250, 0 до 80,6 кг/т сплава (рис. 1, б).

При коэффициенте извлечения марганца 0,454 (соотношение общего количества углерода к количеству марганца в шихте), несмотря на дефицит углерода, содержание марганца находится на достаточно высоком (71,5 %) уровне благодаря уменьшению потерь марганца с выносом пыли (рис. 1, б, табл. 1)

Период I

На этапе I было увеличено количество углерода в шихте (отношение количества углерода в шихте к количеству марганца в шихте 0,535) в основном за счет углерода нового восстановителя.

Посадка электродов не изменилась, производительность печи составила 41 – 43 т/сут, удельное образование пыли снизилось до 49 кг/т сплава. Извлечение марганца повысилось с 71,5 до 87,9 % (табл. 1),

при этом печь работала также с недостатком углерода.

Период II

Опробована работа печи на чистом восстановителе (без добавления угля). Работа печи в данном периоде представлена двумя интервалами.

Количество углерода на 1 т марганца увеличили с 535 до 564 кг, в результате снизились потери марганца со шлаком с 11,57 до 8,43 %. Однако некоторый переизбыток восстановителя ухудшил посадку печи, что привело к снижению производительности с 43,0 до 36,2 т/сут, увеличению пылеобразования до 60 кг/т сплава и уменьшению содержания марганца с 87,9 до 81,9 %. Этот период отмечен как самый нестабильный.

После вывода восстановителя из состава шихты в интервале I средняя производительность печи составила 34,5 т/сут, вынос пыли 140 кг/т сплава, посадка электродов ухудшилась. Ход печи следует охарактеризовать как переходный: по-видимому, остаточная часть восстановителя из периферийных зон печи постепенно перешла в зону плавления.

Далее (интервал 2) печь вернулась в исходное состояние: производительность печи снизилась до 27 т/сут, удельный вынос пыли возрос до 234 кг/т сплава.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЛАВКИ ФЕРРОСИЛИЦИЯ

С ПРИМЕНЕНИЕМ НОВОГО ВОССТАНОВИТЕЛЯ

Была проведена опытная кампания выплавки ферросилиция с применением полученного высокореакционного восстановителя. Выплавку проводили в печи РКО-14.

Были выбраны периоды работы печи:

- базовый: восстановитель – кокс/полукокс;
- опытный период:

• опытный этап I: восстановитель – кокс + полученный полукокс;

Т а б л и ц а 1

Технологические параметры плавки ферросиликомарганца по периодам

Table 1. Technological parameters of smelting ferrosilicon manganese by periods

Период	Mn, %		C _{общ} , %	$\frac{C_{\text{общ}}}{Mn_{\text{шихт}}}$	$\frac{C_{\text{уголь}}}{Mn_{\text{шихт}}}$	$\frac{C_{\text{полукокс}}}{Mn_{\text{шихт}}}$	α , %
	в руде	в шихте					
Переходный	32,6	26,0	11,8	0,454	0,214	0,240	0,715
I	33,6	66,4	35,5	0,535	0,081	0,455	0,879
II	34,3	61,7	34,8	0,564	0	0,546	0,819

П р и м е ч а н и е. $\frac{C_{\text{общ}}}{Mn_{\text{шихт}}}$, $\frac{C_{\text{уголь}}}{Mn_{\text{шихт}}}$, $\frac{C_{\text{полукокс}}}{Mn_{\text{шихт}}}$ – отношение общего количества углерода в шихте, количества углерода в угле, количества углерода в полукоксе к количеству марганца в шихте соответственно;

α – расчетный коэффициент извлечения марганца; $C_{\text{общ}}$ – общее количество углерода в шихте.

Т а б л и ц а 2

Удельные расходы материалов в различные периоды плавки

Table 2. Specific consumption of materials at different periods of smelting

Период	Расход, т/т металла					
	Руда	Уголь (Т)	Шлак оборотный	Полукокс	Кварцит	Антрацит
Предопытный	2,064	0,658	0,223	0	0,485	0
Переходный	2,933	0,284	0,270	0,251	0,600	0
<i>I</i>	2,298	0,088	0,199	0,389	0,510	0
<i>II</i>	2,375	0	0	0,517	0,497	0
Интервал <i>I</i>	2,147	0,234	0,213	0	0,287	0,247
Интервал 2	2,546	0,214	0,266	0	0,315	0,292

Т а б л и ц а 3

Основные (среднесуточные) производственные показатели работы печи РКО-14

Table 3. Key (daily average) performance indicators of the furnace RKO-14

Среднее и общее значения по периодам	Производство, факт. т		Съем электроэнергии, МВт/ч	Факт. мощность, МВт	Количество уловленной пыли, т	Температура под зонтом печи, °С	Температура на фильтрах газоочистки, °С
	физ. т	баз. т					
базовый период							
среднее	25,26	25,87	202,0	8,46	6,86	200	156
всего	277,84	284,6	2221,8	—	75,48	—	—
этап I опытного периода							
среднее	25,04	25,56	198,0	8,33	6,33	175,3	134,9
всего	425,75	434,57	3356,8	—	107,67	—	—
этап 2 опытного периода							
среднее	25,44	26,03	202,9	8,49	5,49	206	147
всего	101,76	104,1	811,5	—	21,97	—	—

• опытный этап 2: восстановитель – полученный полукокс.

В табл. 3 – 5 представлены основные (среднесуточные и удельные) производственные показатели работы печи и расход сырья по периодам.

На рис. 2 представлена зависимость количества произведенного ферросилиция от фактической мощности при работе печи в базовый период и этап *I* опытного периода.

На рис. 3 представлены зависимости удельного пылеобразования и удельного расхода электроэнергии в разные периоды плавки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Производство ферросиликомарганца с применением нового восстановителя

Мощность печи определяется в основном качеством восстановителя и ресурсом эвакуации газов из-под

зонта. Работа с новым восстановителем позволила увеличить активную мощность с 5,23 до 7,00 – 7,25 МВт (рис. 1, в) без видимого задымления рабочей площадки.

Увеличение мощности печи, безусловно, приводит к повышению ее производительности, однако при прочих равных условиях более существенным фактором следует считать скорость реакции восстановителя, то есть вид и комбинацию по составу восстановителей в шихте плавки. Действительно, при работе печи в периодах *I* и *II* при одинаковой мощности при применении нового восстановителя вместе с углем производительность печи увеличивается в 1,16 раза.

Минимальный удельный расход электроэнергии зафиксирован при использовании полученного полукокса вместе с углем марки «Т». Следует отметить, что использование нового восстановителя в любых комбинациях влияет на снижение удельного расхода электроэнергии более существенно, чем при использовании стандартного восстановителя (рис. 1, г).

Удельные показатели работы печи РКО-14

Table 4. Specific operation indicators of the furnace RKO-14

Период	Расход электро-энергии, кВт/ч	Количество уловленной пыли, кг/т	Расход сырья, т					
			Кварцит КРАДМС	Коксовый орешек	Полукокс П-2	Стальная стружка	Щепа древесная	Новый полукокс
Базовый	7807	265	1549,1	314,4	575	287,1	199,4	0
Этап 1 опытного периода	7745	248	1600,8	265,2	0	302,6	0	488,7
Этап 2 опытного периода	7795	211	1613,9	0	0	346,1	0	756,8

Расход сырья при работе печи РКО-14

Table 5. Raw material consumption during operation of the furnace RKO-14

Период	Расход сырья, т					
	Кварцит КРАДМС	Коксовый орешек	Полукокс П-2	Стальная стружка	Щепа древесная	Новый полукокс
базовый	453,692	89,491	163,638	81,709	56,749	0
Этап 1 опытного периода	695,650	115,23	0	131,509	0	212,375
Этап 2 опытного периода	168,014	0	0	36,025	0	78,783

Наилучшие показатели плавки получены при комплексном применении нового восстановителя и угля при $\frac{C_{\text{полукокс}}}{Mn_{\text{шихт}}} = 0,455$ и $\frac{C_{\text{уголь}}}{Mn_{\text{шихт}}} = 0,081$ (табл. 1). Удельные расходы материалов на тонну металла при этом составляют: 0,389 т нового восстановителя и 0,088 т угля (табл. 2).

Таким образом, можно отметить характерные особенности применения нового восстановителя в шихте

при плавке ферросиликомарганца: способствует более глубокой посадке электродов; стабилизирует процесс горения дуги; существенно снижает пылеобразование и тем самым снижает потери марганца с пылью; в чистом виде работает хуже, чем в смеси с углем; наибольший синергетический эффект достигнут при работе его вместе с углем, при этом достигнуты максимальная производительность печи (43 т/сут), максимальное извлечение (87,9 %), минимальное удельное образование пыли (49 кг/т сплава).

Производство ферросилиция**с применением нового восстановителя**

При введении в состав шихты нового полукокса (этап 1 опытного периода) снижается удельный расход электроэнергии за счет увеличения сопротивления шихты вследствие изменения структуры углеродсодержащего материала (рис. 3, б), при этом обеспечивается более глубокая посадка электродов. Глубина посадки электродов оказывает влияние на пылеобразование: глубокая посадка электродов обеспечивает минимальное пылеобразование. При работе печи с глубокой посадкой электродов (этап 1 опытного периода) достигнуто снижение удельного пылеобразования в среднем с 270 до 230 кг/сут (рис. 3, а). Производительность печи напрямую зависит от вводимой мощности (рис. 2). Производительность печи, работающей на шихте, в состав которой входит полученный полукокс, возрастает

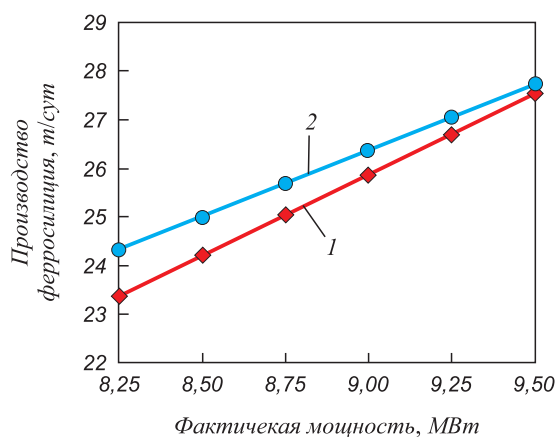


Рис. 2. Зависимость количества произведенного ферросилиция от фактической мощности при работе печи в базовый период (1) и этап I опытного периода (2)

Fig. 2. Dependence of the amount of produced ferrosilicon on actual power during furnace operation in the base period (1) and stage I of the experimental period (2)

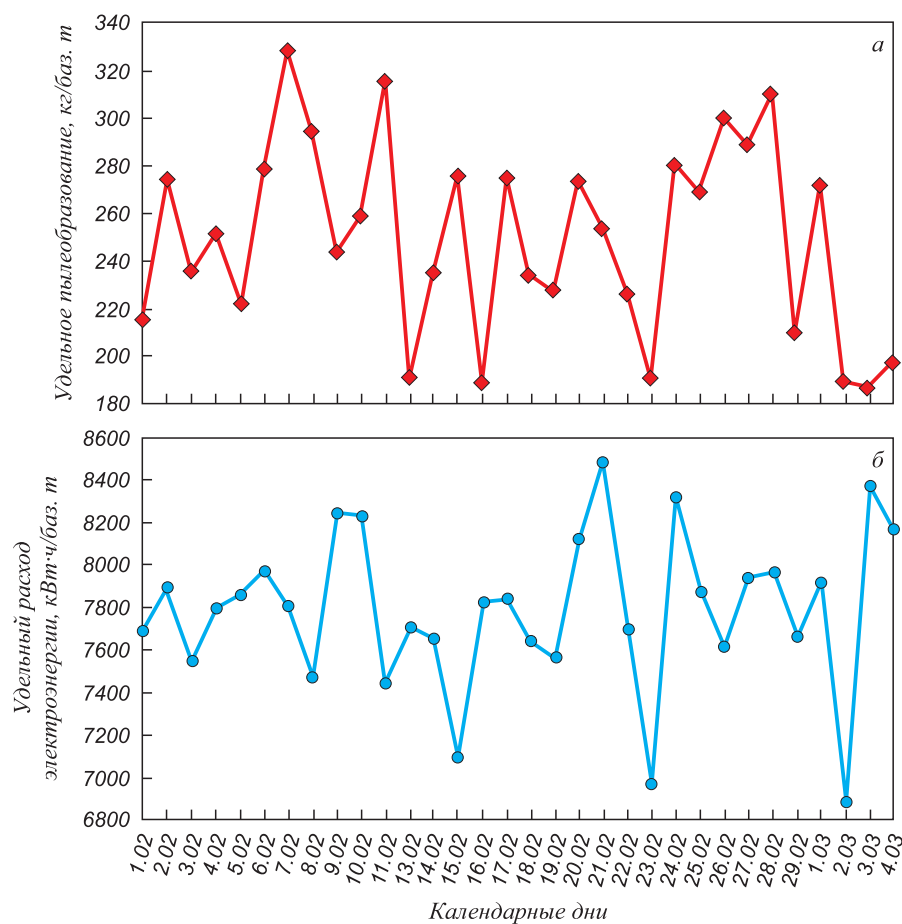


Рис. 3. Удельное пылеобразование (а) и удельный расход электроэнергии (б) в разные периоды плавки

Fig. 3. Specific dust formation (a) and specific energy consumption (b) at different periods of smelting

незначительно по сравнению с производительностью печи, работающей на стандартном восстановителе.

На этапе 2 опытного периода наблюдали нестабильную работу печи (рис. 3).

Таким образом можно сделать следующие выводы: производительность печи при прочих равных условиях определяется величиной вводимой мощности; при избытке углерода в шихте увеличение полезной мощности приводит к незначительному увеличению производительности печи, но при этом существенно увеличивается расход электроэнергии и удельное пылеобразование; изменение величины удельного пылеобразования тесно связано с уровнем суточного производства и удельного расхода электроэнергии и может служить индикатором работы печи; влияние технологических факторов на технико-экономические показатели плавки определяется степенью посадки электродов в печи; на производительность печи влияет структура и вид восстановителя: при использовании в шихте восстановителя с более высокой реакционной способностью (полукокс П-2 и полученный спецкокс) возможно получить более высокие производственные показатели печи.

Достигнуть высокой производительности печи и минимального пылеобразования не удалось. При работе

с новым полукоксом производственные показатели работы печи соответствуют показателям работы печи на полукоксе П-2. Применение нового восстановителя позволяет незначительно снизить пылеобразование. Из-за низкой структурной прочности в процессе транспортировки и дозирования нового полукокса отмечено значительное его измельчение.

Выводы

Установлена принципиальная возможность использования полученного полукокса в составе углеродной части шихты в качестве базового восстановителя для производства ферросиликомарганца. Наибольший синергетический эффект при производстве ферросиликомарганца достигнут при работе полученного полукокса вместе с углем, при этом достигнуты максимальная производительность печи 43 т/сут, максимальное извлечение 87,9 %, минимальное удельное пылеобразование 49 кг/т сплава.

Выявлено, что при производстве ферросилиция использование нового восстановителя не дало существенного положительного эффекта (из-за его низкой структурной прочности). При производстве ферросилиция

изменение величины удельного пылеобразования тесно связано с уровнем суточного производства и удельного расхода электроэнергии и может служить индикатором работы печи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галевский Г.В., Аникин А.Е., Руднева В.В., Галевский С.Г. Применение буроугольных полукоков в металлургии: технологическая и экономическая оценка // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № (2) 243. С. 114 – 123.
2. Рябов В.А., Столбова О.Б. Современный промышленный комплекс Кемеровской области // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Биологические, технические науки и науки о Земле. 2017. № 3. С. 41 – 46.
3. Страхов В.М. Проблемы с углеродистыми материалами для рудной и химической электротермии и пути их решения // Кокс и химия. 2010. № 8. С. 29 – 33.
4. Luo Y.H., Zhu D.Q., Pan J., Zhou X.L. Utilization of semi-coke as by-product derived from coal-based direct reduction process in iron ore sintering // Ironmaking & Steelmaking. 2016. Vol. 43. No. 8. P. 628 – 634.
5. Pistorius P.C. Reductant selection in ferroalloy production: The case for the importance of dissolution in the metal // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 2002. Vol. 102. No. 1. P. 33 – 36.
6. Koursaris A., See J.B. Reactions in the production of high-carbon ferromanganese from Mamatwan ore // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 1979. Vol. 79. P. 149 – 158.
7. Cheng A. Coke quality requirements for blast furnaces. Part I // Iron and Steelmaker. 2001. Vol. 28. No. 1. P. 30 – 32.
8. Ishii K. Preface to the special issue on «Innovative ironmaking reactions in new BF to aim at halving energy needs and minimizing environmental load» // ISIJ International. 2004. Vol. 44. No. 12. P. 1969 – 2178.
9. Ishii K., Yagi J. Basic research on ironmaking process in blast furnace and development in near future // Tetsu-to-Hagane. 2001. Vol. 87. No. 5. P. 207 – 220.
10. Khanna R., Sahajwalla V., Rodgers B., McCarthy F. Dissolution of carbon from alumina-carbon mixtures into liquid iron: influence of carbonaceous material // Metallurgical and Materials Transactions B. 2006. Vol. 37. No. 4. P. 623 – 632.
11. Gudenau H.W., Meier L., Schemmann V. Coke quality requirements for modern blast furnace operation. – In book: Ironmaking conference proceedings, 1998. P. 1067 – 1072.
12. Ким В.А., Ульева Г.А. Сравнительная оценка структуры спеккоксов, используемых в электротермии // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. № 2. С. 20 – 23.
13. Страхов В.М., Суровцева И.В., Елкин Д.К., Елкин К.С., Черевко А.Е. Анализ качества и перспективы использования малозольных углеродистых восстановителей для электротермического производства технического кремния // Кокс и химия. 2012. № 5. С. 18 – 21.
14. Страхов В.М. Альтернативные углеродистые восстановители для ферросплавных производств // Кокс и химия. 2009. № 1. С. 20 – 25.
15. Нефедов П.Я. О требованиях к качеству углеродистых восстановителей для процессов рудной электротермии // Кокс и химия. 2000. № 8. С. 24 – 32.
16. Dijs H.M., Smith D.J. Factors affecting the resistivity and reactivity of carbonaceous reducing agents for the electric-smelting industry // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 1980. P. 286 – 296.
17. Feng B., Bhatia S.K., Barry J.C. Structural ordering of coal char during heat treatment and its impact on reactivity // Carbon. 2002. Vol. 40. No. 4. P. 481 – 496.
18. Soundara Rajan M., Somu M., Ganapathik, Malarkkan K.M.V. Thermal analysis-approach to coal reactivity studies // Indian Journal of Power and River Valley Development. 1980. Vol. 30. No. 11-12. P. 148 – 162.
19. Miura S., Silveston P.L. Change of pore properties during carbonization of coking coal // Carbon. 1980. Vol. 18. No. 2. P. 93 – 108.
20. Голицын М.В., Вялов В.И., Богомолов А.Х., Пронина Н.В., Макарова Е.Ю., Митронов Д.В., Кузванова Е.В., Макаров Д.В. Перспективы развития технологического использования углей в России // Георесурсы. 2015. Т. 61. № 2. С. 41 – 53.
21. Угольная база России. Т. II. Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири (Кузнецкий, Горловский, Западно-Сибирский, бассейны; месторождения Алтайского края и Республики Алтай). – М.: ООО «Геоинформцентр», 2003. – 604 с.
22. Минерально-сырьевая база угольной промышленности России: в 2 т. Т. 1. Состояние, динамика, развитие / Н.Н. Балмасов, В.К. Бранчугин, М.В. Быкадоров и др.; под ред. А.Е. Евтушенко, Ю.Н. Малышева. – М.: изд. Московского государственного горного университета, 1999. – 648 с.

Поступила в редакцию 27 января 2020 г.
После доработки 25 февраля 2020 г.
Принята к публикации 13 марта 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 7, pp. 521–528.

TECHNOLOGICAL SUITABILITY OF SEMI-COKE AS A CARBON REDUCER IN PRODUCTION OF MANGANESE AND SILICON ALLOYS

A.A. Shubina¹, N.V. Zhuravleva^{1,2}, S.G. Korotkov²,
P.P. Lazarevskii³, Yu.E. Romanenko³

¹ Joint Stock Company “West Siberian Testing Center”, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, Russia

² Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, Russia

³ LLC “Regionstroj”, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, Russia

Abstract. The article presents results of testing semi-coke as a carbon reducing agent in the production of manganese and silicon alloys. The fundamental possibility of using semi-coke in carbon part of the charge as a basic reducing agent for the production of ferrosilicon manganese is established. It is noted that the new reducing agent in its pure form

works worse than in the mixture with coal. The greatest synergistic effect in the production of ferrosilicon manganese was achieved during the interaction of semi-coke with coal, while the following indicators were obtained: maximum furnace productivity of 43 t/day, maximum extraction coefficient of 87.9 %, and minimum specific dust formation of 49 kg/t of alloy. In the production of ferrosilicon the use of a new reducing agent did not give a significant positive effect, due to its low structural strength. It was revealed that the structure and type of the reducing agent affect the furnace performance: when using a reducing agent with a higher reactivity in the charge, it is possible to obtain higher furnace performance. In the production of ferrosilicon, a change in the specific dust generation is closely related to the level of daily production and specific energy consumption and can serve as an indicator of the furnace operation. The furnace performance, ceteris paribus, is determined by the amount of useful power input. With an

excess of carbon in the charge an increase in useful power leads to a slight increase in the furnace performance, but at the same time, the energy consumption and specific dust formation significantly increase. It is shown, that the influence of technological factors on the technical and economic indicators of melting is determined by the degree of electrode seating in the furnace.

Keywords: semi-coke, solid carbonaceous reducing agent, ferrosilicon, ferrosilicon manganese, ferroalloy production, technological properties, reactivity, application in metallurgy.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-521-528

REFERENCES

- Galevskii G.V., Anikin A.E., Rudneva V.V., Galevskii S.G. The use of lignite semi-coke in metallurgy: technological and economic assessment. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2016, no. 2 (243), pp. 114–123. (In Russ.).
- Ryabov V.A., Stolbova O.B. Modern industrial complex of Kemerovo region. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologicheskie, tekhnicheskie nauki i nauki o Zemle*. 2017, no. 3, pp. 41–46. (In Russ.).
- Strakhov V.M. Problems with carbon materials in ore and chemical electrofurnaces. *Coke and Chemistry*. 2010, vol. 53, no. 8, pp. 301–304.
- Luo Y.H., Zhu D.Q., Pan J., Zhou X.L. Utilisation of semi-coke as by-product derived from coal-based direct reduction process in iron ore sintering. *Ironmaking & Steelmaking*. 2016, vol. 43, no. 8, pp. 628–634.
- Pistorius P.C. Reductant selection in ferroalloy production: The case for the importance of dissolution in the metal. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2002, vol. 102, no. 1, pp. 33–36.
- Koursaris A., See J.B. Reactions in the production of high-carbon ferromanganese from Mamatwan ore. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1979, vol. 79, pp. 149–158.
- Cheng A. Coke quality requirements for blast furnaces. Part I. *Iron and Steelmaker*. 2001, vol. 28, no. 1, pp. 30–32.
- Ishii K. Preface to the special issue on innovative ironmaking reactions in new BF to aim at halving energy needs and minimizing environmental load. *ISIJ International*. 2004, vol. 44, no. 12, pp. 1969–2178.
- Ishii K., Yagi J. Basic research on ironmaking process in blast furnace and development in near future. *Tetsu-to-Hagane*. 2001, vol. 87, no. 5, pp. 207–220.
- Khanna R., Sahajwalla V., Rodgers B., McCarthy F. Dissolution of carbon from alumina-carbon mixtures into liquid iron: influence of carbonaceous material. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2006, vol. 37, no. 4, pp. 623–632.
- Gudenau H.W., Meier L., Schemmann V. Coke quality requirements for modern blast furnace operation. In: *Ironmaking Conference Proceedings*. 1998, pp. 1067–1072.
- Kim V.A., Ul'eva G.A. Comparative evaluation of the structure of special cokes used in electrothermics. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2012, no. 2, pp. 20–23. (In Russ.).
- Strakhov V.M., Surovtseva I.V., Elkin D.K., Elkin K.S., Cherevko A.E. Low-ash carbon reducing agents for electrothermal silicon production. *Coke and Chemistry*. 2012, vol. 55, no. 5, pp. 172–175.
- Strakhov V.M. Alternative carbon reducing agents for ferroalloy production. *Coke and Chemistry*. 2009, vol. 52, no. 1, pp. 19–22.
- Nefedov P.Ya. On the quality requirements of carbonaceous reducing agents for ore electrothermy. *Koks i khimiya*. 2000, no. 8, pp. 24–32. (In Russ.).
- Dijs H.M., Smith D.J. Factors affecting the resistivity and reactivity of carbonaceous reducing agents for the electric-smelting industry. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1980, pp. 286–296.
- Feng B., Bhatia S.K., Barry J.C. Structural ordering of coal char during heat treatment and its impact on reactivity. *Carbon*. 2002, vol. 40, no. 4, pp. 481–496.
- Soundara R.M., Somu M., Ganapathik, Malarkkan K.M.V. Thermal analysis-approach to coal reactivity studies. *Indian Journal of Power and River Valley Development*. 1980, vol. 30, no. 11–12, pp. 148–162.
- Miura S., Silveston P.L. Change of pore properties during carbonization of coking coal. *Carbon*. 1980, vol. 18, no. 2, pp. 93–108.
- Golitsyn M.V., Vyalov V.I., Bogomolov A.Kh., Pronina N.V., Makarova E.Yu., Mitronov D.V., Kuzevanova E.V., Makarov D.V. Prospects for technological use of coals in Russia. *Geosursy*. 2015, vol. 61, no. 2, pp. 41–53. (In Russ.).
- Ugol'naya baza Rossii. Tom II. Ugol'nye basseiny i mestorozhdeniya Zapadnoi Sibiri (Kuznetskii, Gorlovskii, Zapadno-Sibirskii basseiny; mestorozhdeniya Altaiskogo kraya i Respubliki Altai)* [Coal base of Russia. Vol. II. Coal basins and deposits of Western Siberia (Kuznetsk, Gorlovskii, West Siberian basins; deposits of the Altai Territory and the Altai Republic)]. Moscow: OOO "Geoinformtsentr", 2003, 604 p. (In Russ.).
- Balmasov N.N., Branchugov V.K., Bykadorov M.V. etc. *Mineral'no-syr'evaya baza ugol'noi promyshlennosti Rossii: v 2 t. T. 1. Sostoyaniye, dinamika, razvitiye* [Mineral resources base of the coal industry of Russia: in 2 vols. Vol. 1. State, dynamics, development]. Evtushenko A.E., Malyshev Yu.N. eds. Moscow: izd. Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 1999, 648 p. (In Russ.).

Information about the authors:

A.A. Shubina, Engineer of the Department of Chromatography, Ecology and Petroleum Products (osokina.alina@inbox.ru)
N.V. Zhuravleva, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Power and Ecology", General Director (zhuravleva_nv@zsfic.ru)
S.G. Korotkov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Power and Ecology" (kafedra-TEE@yandex.ru)
P.P. Lazarevskii, Cand. Sci. (Eng.), Chief Specialist of the Technological Department (lazarevskiy_pp@sgmk-group.ru)
Yu.E. Romanenko, Cand. Sci. (Eng.), Leading Specialist of the Technological Department (romanenko_ye@sgmk-group.ru)

Received January 27, 2020
 Revised February 25, 2020
 Accepted March 13, 2020

УДК 504.55.054:622(470.6)

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СНИЖЕНИИ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ В ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ РЕГИОНАХ*

Ляшенко В.И.¹, к.т.н., начальник научно-исследовательского отдела,
старший научный сотрудник (vilyashenko2017@gmail.com)

Голик В.И.², д.т.н., профессор кафедры «Горное дело» (v.i.golik@mail.ru)

Дятчин В.З.³, к.т.н., доцент кафедры менеджмента и социальной работы (dsveta49@i.ua)

¹ ГП «УкрНИПИИпромтехнологии»

(52204, Украина, Днепропетровская обл., Желтые Воды, пр. Свободы, 37)

² Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)

(362021, Республика Северная Осетия-Алания, Владикавказ, ул. Николаева, 44)

³ Институт предпринимательства «Стратегия»

(52204, Украина, Днепропетровская обл., Желтые Воды, ул. Гагарина, 43)

Аннотация. Одним из самых проблемных мест технологии складирования отходов переработки рудного сырья в подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя являются хвосты гидрометаллургического завода (ГМЗ), которые направляются по пульпопроводу в хвостохранилище в виде пульпы с соотношением по массе твердое:жидкое 1:2. Жидкая фаза пульпы после оттаивания и осветления в хвостохранилище возвращается в технологический цикл на ГМЗ. Рассматриваемая технология складирования имеет ряд недостатков: высокие единовременные капитальные затраты на строительство хвостохранилища на полную проектную мощность; большая вероятность миграции вредных химических веществ в подземные воды при повреждении защитных экранов основания или бортов хвостохранилища. В ходе исследования использовали данные литературных источников и патентной документации в области обоснования параметров хранилищ, результаты лабораторных и производственных экспериментов. Проводили физическое моделирование и подбор составов твердеющих смесей. Выполнены аналитические исследования, сравнительный анализ теоретических и практических результатов по стандартным и новым методикам. Установлена возможность использования твердеющих смесей с применением в качестве вяжущего отходов смежного производства. Предложен оптимальный состав ингредиентов на 1 м³ твердеющей смеси. Предложенная технология складирования отходов переработки рудного сырья в подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя позволяет при производственной мощности предприятия 1500 тыс. т/год хвостов использовать 50 – 55 % для закладки подземного выработанного пространства. Оставшуюся часть, соединенную с вяжущим материалом, можно складировать в хранилище. При заполнении связанными хвостами всей существующей площади зеркала хвостохранилища на высоту 10 м и производительности ГМЗ до 1,5 млн т в год срок эксплуатации хвостохранилища продлевается на 50 лет.

Ключевые слова: отходы переработки, рудное сырье, хвостохранилища, технологии укладки, экологическая безопасность, эффективность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-529-538

ВВЕДЕНИЕ

Анализ работы горных предприятий показывает, что при добыче и первичной переработке 1 т товарной руды попутно извлекается 1,4 – 1,6 т твердых отходов, техногенно-усиленных вредными источниками природного происхождения, создающих экологически неблагоприятную обстановку в регионе [1, 2]. Утилизация отходов горно-металлургического производства (закладка выработанных пространств, сооружение плотин для специальных хранилищ и пр.) позволяет использовать лишь 50 – 60 % общего их объема, а оставшаяся часть подлежит захоронению и последующей рекультивации загрязненных территорий [3, 4]. Поэтому актуальным является повышение экологической безопасности путем снижения техногенной нагрузки

в горнодобывающих регионах за счет разработки технологий и технических средств для складирования отходов переработки рудного сырья в подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АУДИТ

Объектом исследования настоящей работы будет горнодобывающий регион, технологии и технические средства для складирования отходов переработки рудного сырья в подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя [5, 6]. Одним из самых проблемных мест является технология складирования отходов переработки рудного сырья, согласно которой хвосты гидрометаллургического завода (ГМЗ) направляются по пульпопроводу в хвостохранилище в виде

* Указанная технология выполнена при участии Ю.Н. Тархина, Н.А. Худошиной, Л.А. Ляшенко, А.Г. Скотаренко.

пульпы с соотношением по массе твердое:жидкое 1:2. Жидкая фаза пульпы после отстаивания и осветления в хвостохранилище возвращается в технологический цикл на ГМЗ [7, 8]. Рассматриваемая технология складирования имеет ряд недостатков:

- высокие единовременные капитальные затраты на строительство хвостохранилища на полную проектную мощность;
- большая вероятность миграции вредных химических веществ в подземные воды при повреждении защитных экранов основания или бортов хвостохранилища.

Целью настоящей работы является повышение экологической безопасности за счет снижения техногенной нагрузки в горнодобывающих регионах при разработке технологий и технических средств для складирования отходов добычи и переработки рудного сырья в воронку обрушения, подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- установить возможность использования твердеющих смесей с применением в качестве вяжущего отходов горного производства и предложить оптимальный состав ингредиентов на 1 м³ смеси для заполнения воронки обрушения, подземных пустот и хвостохранилищ с добавкой отвердителя;
- предложить технологические, планировочные и инженерные мероприятия для улучшения экологической обстановки на промышленных площадках горно-металлургических предприятий и зоне влияния их объектов;
- рекомендовать «сухое» в иммобилизованном виде складирование хвостов горно-металлургического производства в хвостохранилища вместо традиционного наливного способа;
- показать перспективные направления дальнейших исследований технологий и технических средств для утилизации хвостов обогащения руд с извлечением всех опасных и ценных ингредиентов с применением механической и механохимической активаций минерального сырья, а также механической и химической компоненты выщелачивания.

ИССЛЕДОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ

ПРОБЛЕМЫ

На практике промышленные отходы складировать в подземных выработанных пространствах и специальных хранилищах на «дневной» поверхности [9, 10]. При этом хвостохранилища с ограждающей дамбой [11, 12] сооружают из инертных грунтов или из переработанного рудного материала в смеси с вяжущим компонентом [13, 14].

Таким образом, снижение опасности для окружающей среды путем складирования отходов переработки

рудного сырья в подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя решает важные научные, практические и социальные задачи [15, 16]. Это достигается за счет отверждения опасных ингредиентов, определения рецептур твердеющих смесей, оценки их прочности для заполнения подземных выработанных пространств и поверхностных карт хранилища, перевода в твердое состояние [17, 18].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведены следующие исследования:

- анализ мирового опыта обращения с отходами гидрометаллургического передела руд;
- сбор и анализ материалов по технологиям складирования и иммобилизации отходов горно-металлургического производства в поверхностных хранилищах;
- определение эффективной технологии иммобилизации и складирования хвостов ГМЗ;
- определение требований к физико-механическим, химическим показателям складированных отходов и к устройству хвостохранилища;
- установление физико-механических показателей смеси хвостов ГМЗ с вяжущим (подвижность, сцепление, прочность, фильтрация, выщелачиваемость вредных ингредиентов);
- разработка технологий и рецептов твердеющих смесей для укладки их в карты поверхностного хранилища и в подземные выработанные пространства шахт;
- определение основных технико-экономических показателей технологии приготовления и укладки твердеющей смеси;
- оценка влияния технологии приготовления и укладки твердеющей смеси в карты хвостохранилища на персонал, окружающую среду и население, проживающее в зоне его влияния.

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТВЕРДЕЮЩЕЙ СМЕСИ

Для проведения натуральных испытаний твердеющей смеси на основе хвостов рудообогатительной фабрики на пляжной зоне хвостохранилища была отобрана проба хвостов со следующим гранулометрическим составом по классам крупности: более 15 мм – 14,8 %; 0,074 ÷ 15 мм – 43,1 %; менее 0,074 мм – 42,1 %. На основе этих хвостов были приготовлены три образца твердеющей смеси объемом 1 м³, каждый с молотым гранулированным доменным шлаком в качестве вяжущего. Тонина помола шлака была аналогичной, как и при использовании его для натуральных испытаний твердеющей смеси на основе хвостов ГМЗ. Количество шлака по образцам брали несколько выше, по сравнению с хвостами ГМЗ, которое составило 89, 100 и 120 кг на 1 м³ твердеющей смеси. Приготовленную смесь

укладывали в деревянную опалубку, которую снимали после схватывания смеси. Образцы были оставлены на открытом воздухе для определения влияния атмосферных условий на их сохранность. В течение одного года образцы подвергали воздействию 50 циклов (замораживание – оттаивание). Внешний вид образцов после трех лет испытаний показал незначительное разрушение их поверхности и лучшую сохранность по сравнению с образцами на основе хвостов ГМЗ. Это связано с увеличением количества вяжущего. Хвосты обогатительной фабрики можно использовать в составе твердеющей смеси для заполнения воронки обрушения как следствия многолетней подземной разработки железорудного месторождения системами с принудительным обрушением руд и вмещающих пород (ГП «ВостГОК», г. Желтые Воды, Украина). При этом рекомендуется следующая композиция для 1 м³ твердеющей смеси: 1350 – 1500 кг хвосты обогатительной фабрики (песковая часть); 50 – 70 кг молотый гранулированный шлак; 350 кг вода затворения.

При анализе результата проведенных исследований были отобраны оптимальные образцы закладочных смесей (достижение нормативной прочности при минимальном расходе вяжущего), в которых вяжущим является цемент, а заполнителем – кислые или нейтрализованные хвосты и дробленая порода. На основании проведенных исследований можно рекомендовать следующие составы твердеющих смесей:

– для закладки выработанного пространства камер: 1400 кг нейтрализованных хвостов ГМЗ; 200 кг цемента марки М200; 400 л воды затворения;

– для укладки в хвостохранилище: 1600 – 1800 кг хвостов ГМЗ; 200 кг цемента марки М200; 350 л воды затворения.

СКЛАДИРОВАНИЕ ОТХОДОВ ГОРНОГО

И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВ В ПОДЗЕМНЫЕ ВЫРАБОТАННЫЕ ПРОСТРАНСТВА

Анализ технологии возведения искусственных массивов в подземном выработанном пространстве из твердеющей закладочной смеси различного состава и прочности показывает, что использование для закладки отходов горного и перерабатывающего производств технически осуществимо двумя способами (централизованный и раздельный).

На горно-металлургических предприятиях наиболее широко распространены технологические схемы приготовления твердеющей закладочной смеси на поверхностных стационарных закладочных комплексах на основе вяжущего, изготовленного из доменного гранулированного шлака и низкосортного песка или хвостов обогащения (рис. 1). Песок и гранулированный шлак из расходного склада бульдозером транспортируются в приемные бункера, откуда эти материалы пластинчатыми питателями, а затем ленточными конвейерами доставляются в промежуточные бункера и далее на автоматические ленточные дозаторы. Для отделения комков глины и других примесей песок проходит через грохотную решетку, установленную над промежуточным бункером.

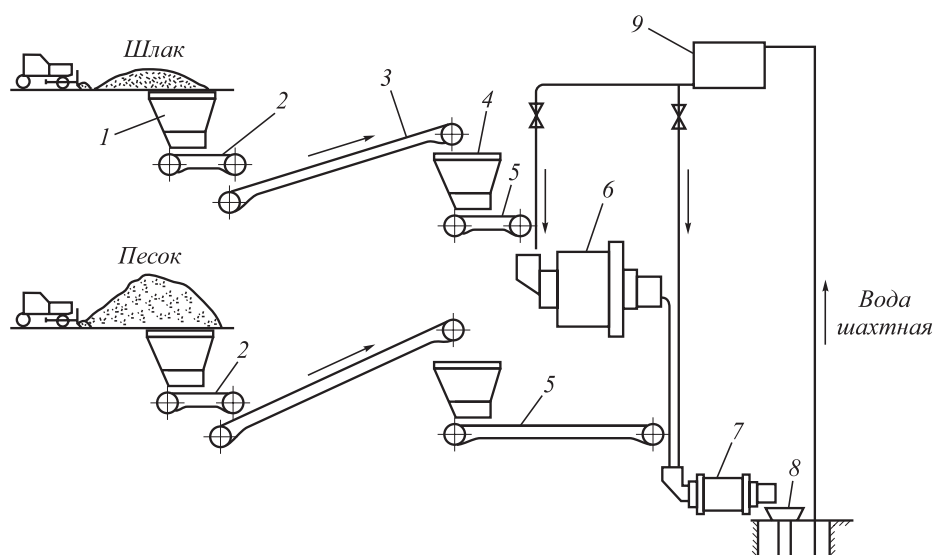


Рис. 1. Технологическая схема закладочного комплекса на основе вяжущего, изготовленного из доменного гранулированного шлака и низкосортного песка:
1 – бункер приемный; 2 – питатель; 3 – конвейер; 4 – бункер накопительный; 5 – дозатор; 6 – мельница шаровая; 7 – смеситель;
8 – воронка приемная; 9 – емкость для воды затворения

Fig. 1. Technological scheme of the filling complex based on a binder made of granulated blast furnace slag and low-grade sand:
1 – ground bunker; 2 – feeder; 3 – conveyor; 4 – storage bunker; 5 – dispenser; 6 – ball grinder; 7 – mixer;
8 – receiving funnel; 9 – mixing water tank

Т а б л и ц а 1

Характеристика твердеющих закладочных смесей

Table 1. Specification of hardening filling mixtures

Расход компонентов, кг/м ³					Предел прочности на сжатие в возрасте 6 месяцев, МПа
песок	дробленый материал	хвосты ГМЗ	гранулированный шлак	вода затворения	
1350	—	—	250	400	3,0
750	750	—	200		
—	800	700	200		
1300	—	—	300	400	5,0
700	750	—	250		
—	800	850	250		

После дозировки шлак в определенном соотношении с водой поступает в шаровую мельницу, а затем в виде пульпы в смеситель, где перемешивается с песком. В смеситель также подается вода для придания закладочной смеси нужной подвижности. Готовая смесь поступает в приемную воронку, далее по трубам в самотечно-пневматическом режиме транспортируется в выработанное пространство. Установлено, что в качестве добавки к заполнителю твердеющей закладки можно использовать дробленые горные породы или хвосты обогащения (табл. 1).

Анализ композиций твердеющей закладочной смеси показывает, что применение рассматриваемой технологической схемы позволяет снизить расход дефицитного дорогостоящего вяжущего (цемента) в 2,0 – 2,6 раза (от 400 до 150 кг/м³) и удельные затраты на закладку почти в 2,0 раза, а главное утилизировать в подземные пустоты вредные отходы (рис. 2).

Плотность закладочного массива составляет 2100 – 2300 кг/м³. Установлено, что 40 % объемов подземных пустот, образованных в процессе ведения горных работ, могут погашаться гидравлической смесью или сыпучей закладкой. В этом случае погашают полностью отдельные обособленные отработанные блоки и верхние части камер вторых очередей выемки.

Технико-экономические расчеты показали, что с учетом существующей технологии производства и доставки к месту укладки закладочного материала наиболее рациональной является схема с дроблением скальных отходов и их транспортировкой по трубопроводам в подземные пустоты. Такая схема отличается простотой организации и обслуживания, высокой производительностью и надежностью в работе. Оптимальная крупность отходов определена с учетом затрат на дробление, трубопроводный транспорт и плотность их укладки в отработанные камеры и находится в пределах 15 мм. Гранулометрический состав хвостов ГМЗ приведен в табл. 2, а прочность твердеющей закладки на основе хвостов ГМЗ – в табл. 3.

**ПРАКТИКА СКЛАДИРОВАНИЯ ХВОСТОВОЙ ПУЛЬПЫ
В ХВОСТОХРАНИЛИЩАХ**

С начала эксплуатации Желтореченских рудных месторождений (г. Желтые Воды, Украина) образовались:

– два карьера («Габаевский» и «Веселоивановский»), три хвостохранилища (резервное хвостохранилище в отработанном карьере бурых железняков (КБЖ), «Разбери» и «Терновская») и воронка обрушения как следствие подземной разработки железорудного месторождения системами с принудительным обрушением руд и вмещающих пород (табл. 4);

– балка «Щербаковская» (Щ) (ГП «ВостГОК», Петровский район, Украина).

Складирование хвостовой пульпы осуществляли в хвостохранилища, расположенные в КБЖ и балке Щ. Под хвостохранилище использован КБЖ, состоящий

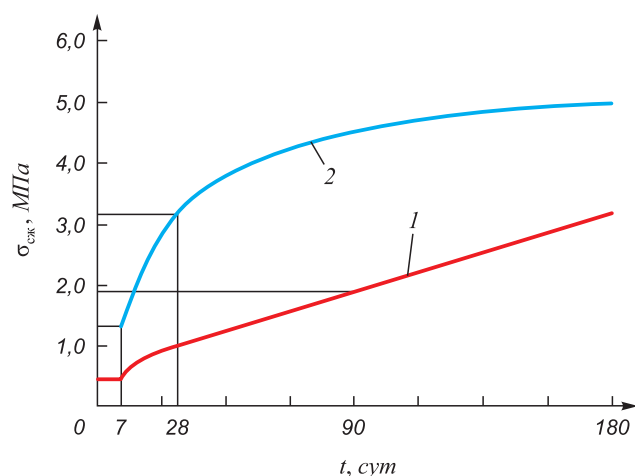


Рис. 2. Зависимость прочности закладки на сжатие $\sigma_{сж}$ от времени твердения t при расходе 50 кг (1) и 300 кг (2) цемента марки М200 на 1 м³ твердеющей закладочной смеси

Fig. 2. Graphs of dependence of compression strength of the filling mass $\sigma_{сж}$ on hardening time t at cement consumption of 50 kg (1) and 300 kg (2) on 1 m³ of waste

Т а б л и ц а 2

Гранулометрический состав хвостов ГМЗ

Table 2. Granulometric composition of HMP tailings

Размер фракции, мм	Содержание фракции, %
более 0,150	4,0
0,074 ÷ 0,150	19,8 – 41,8
0,043 ÷ 0,074	22,0 – 30,0
0,005 ÷ 0,043	30,0 – 40,0
менее 0,005	2,2

Т а б л и ц а 3

Характеристики твердеющей закладки на основе хвостов ГМЗ

Table 3. Strength hardening filler produced of HMP tailings

Наименование параметров	Количество замеров, шт	Среднее значение
Плотность, т/м ³ :		
шлака	4	2,47
хвостов	4	2,63
Влажность, %:		
шлака	5	8,00
хвостов	5	19,00
Модуль крупности хвостов	4	0,08
Содержание фракции –0,074 мм в шлаке, %:		
исходном	5	3,00
молотом	5	43,00
Объемная масса, т/м ³ :		
готовой смеси	4	2,00
пульпы молотого шлака	4	1,48
Подвижность смеси, см	9	14,00
Содержание воды, % :		
в смеси	4	31,00
в пульпе молотого шлака	4	53,00
Расход материалов, т/м ³ :		
хвостов	4	1,17
шлака	4	0,38
Прочность искусственного массива, МПа:		
3 месяцев	4	2,83
6 месяцев	6	5,12

из малой и большой чаш глубиной 10 – 15 и 60 – 65 м. В настоящее время резервное хвостохранилище КБЖ выведено из эксплуатации и рекультивируется. Действующее хвостохранилище Щ состоит из двух секций, разделенных плотиной, и эксплуатируется с 1959 г. Складирование материала осуществляли гидроналивом в обе секции с образованием поверхностного слоя

Т а б л и ц а 4

Характеристика хвостохранилищ КБЖ и Щ

Table 4. Specification of tailing dams of brown iron ore career and Scherbakovskaya putlog

Показатель	Хвостохранилища	
	КБЖ	Щ
Площадь земельного отвода, га	137,2	614,9
Площадь зеркала хвостохранилища, га	55,6	250,6
Проектный объем, млн м ³	12,4	40,7
Количество засклавированных отходов, млн т	15,9	27,7

воды в виде прудов-отстойников. Ограждающие дамбы имеют высоту от 7 до 44 м, общая протяженность около 8 км, мощность слоя хвостов до 30 м. При верхней отметке дамб 138,3 м заполнение хвостохранилища достигает уровня 135,1 м [19].

СКЛАДИРОВАНИЕ ОТХОДОВ**ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА
В ХВОСТОХРАНИЛИЩА**

С учетом мировой практики складирования и хранения отходов, достижений науки и техники с целью минимизации отрицательного влияния на окружающую среду во время строительства, эксплуатации и хранения отходов предполагается следующее [13, 14]:

- расположение хранилища в естественном понижении местности (балке), что с санитарно-экологической точки зрения является более благоприятным и обеспечивает наименьшую длину искусственных ограждающих дамб;
- строительство ограждающих дамб из естественных материалов (уплотненного суглинка);
- изоляция днища и внутренних откосов хранилища противофильтрационным экраном, который включает слой уплотненного суглинка и полиэтиленовую пленку высокой плотности (геомембрана типа НБРЕ); экран надежно защищает геологическую и гидрогеологическую среды от химического загрязнения;
- хранение отходов гидрометаллургической переработки рудного сырья в иммобилизованном (связанном) состоянии, которое снижает вероятность миграции вредных химических веществ в окружающую среду;
- устройство водоотводных канав по периметру хранилища, которые исключают поступление дождевых вод в чашу хранилища с близлежащей территории;
- устройство санитарно-защитной зоны хранилища по его периметру размером 1000 м и озеленение;
- поэтапное складирование отходов и рекультивация засклавированного участка;

- складирование и хранение плодородного слоя грунта и суглинка, которые вынимаются во время инженерной подготовки территории для дальнейшего использования их в строительстве и рекультивации за-складированного массива отходов;

- использование вентиляционного и очистного оборудования, орошение разрабатываемых грунтов с целью обеспечения соответствия загрязнения атмосферного воздуха санитарно-гигиеническим требованиям;

- своевременные сбор, хранение и утилизация образующихся промышленных отходов в соответствии с разработанными и согласованными лимитами предприятия в целом;

- рекультивация территории хранилища и близлежащей к нему территории после окончания эксплуатации;

- озеленение рекультивированной территории травяной и кустарниковой растительностью;

- постоянный мониторинг компонентов окружающей среды в зоне влияния хранилища.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПО СКЛАДИРОВАНИЮ И ХРАНЕНИЮ ОТХОДОВ

Хвостохранилище намечается разместить в безымянной балке, которая является правым притоком реки Малая Высь (Кировоградская обл., Украина). Постоянного тока воды в балке нет, за исключением стока в весеннее наводнение и в период осеннего паводка. Естественные условия участка отвечают требованиям нормативов по размещению хранилища. При строительстве по днищу хранилища уплотняется естественный грунт (суглинок), укладывается песок (0,1 м), геомембрана и защитный слой суглинка.

Емкость хранилища для складирования отходов переработки рудного сырья составляет 43,125 млн м³. Площадь его чаши составляет 2897,9 тыс. м², средняя глубина – 15,0 м, самая высокая отметка дамбы – 216,0 м. Прогнозный объем складирования во время разработки руд НовоCONSTANTиновского месторождения (Кировоградская обл., Украина) составляет 34,816 млн м³. Расчетный период складирования отходов ГМЗ составляет 50 – 85 лет в зависимости от объемов добычи и переработки руды. Территория выведенных из сельскохозяйственного пользования земель ограничивается площадью хранилища и составляет 290 га. Для хвостохранилища отходов ГМЗ предусматривается организация санитарно-защитной зоны по его периметру размером 1000 м. На борту хранилища строится комплекс подготовки отходов к складированию. Отходы ГМЗ к хранилищу транспортируются по пульпопроводу. Ориентировочно количество ингредиентов на 1 м³ смеси составляет: 1600 – 1800 кг обезвоженных отходов; 200 кг измельченной забалансовой руды (15 мм по содержанию полезных компонентов); 200 – 300 кг цемента марки М300 [20].

Вода, образующаяся при обезвоживании отходов, возвращается в технологический процесс ГМЗ. Образованная твердеющая смесь бетононасосом подается на подготовленный участок чаши хранилища. После затвердения смеси осуществляли рекультивацию этого участка. После окончания эксплуатации и рекультивации хранилища близлежащая территория рекультивируется для сельскохозяйственного или лесохозяйственного использования. Рекультивационные слои из суглинка (0,5 м), щебня или шлака (0,5 м), плодородного пласта грунта (0,6 м) снижают влияние вредных веществ на окружающую среду. Поверхность рекультивированного хранилища закрепляется посадкой травяной и кустарниковой растительности [21].

Подготовка хвостов ГМЗ к иммобилизации

Подготовка хвостов включает следующие операции: обезвоживание хвостовой пульпы ГМЗ в гидроциклонах диам. 500 мм с выделением песка с содержанием твердого 45 %, поступающего на стадию II обезвоживания, и слива, поступающего на стадию III обезвоживания; стадия I обезвоживания песка в гидроциклонах диам. 350 мм с выделением песка с содержанием 80 % твердого, направляемого на смешение с цементом в двухвальном смесителе, и слива, поступающего на стадию III обезвоживания; обезвоживание сливов гидроциклонов в сгустителе Ц50 диам. 50 м с центральным приводом с получением песка с содержанием 50 % твердого, направляемого на фильтрацию, и слива, используемого на ГМЗ в качестве оборотной воды; фильтрация песка сгустителей на дисковых вакуум-фильтрах до содержания 84 % твердого в кеке; смешение обезвоженных хвостов с цементом и фракцией 15 мм горных отходов; подача смеси на хранилище отвержденных отходов [22].

Хвосты ГМЗ с соотношением Т:Ж = 1,0:1,9 обезвоживаются на стадии I в гидроциклонах диам. 500 мм (четыре рабочих и четыре резервных), песок перекачивается на стадию II обезвоживания в гидроциклонах диам. 350 мм (четыре рабочих и четыре резервных), а слив самотеком поступает в сгустители диам. 50 м с центральным приводом. Для получения чистого слива предусматривается три сгустителя типа Ц50М. Слив сгустителей откачивается на ГМЗ для использования в качестве оборотной воды, избыток подается на карту испарения, организованную на хранилище отходов. Песок сгустителей подается на обезвоживание на дисковые вакуум-фильтры типа ДОО 100 (шесть рабочих и два резервных).

Удельные нагрузки для выбора сгустителей и вакуум-фильтров приняты по справочным данным и перед последующей стадией проектирования требуют проверки опытным путем. Кек фильтров совместно с песком гидроциклонов стадии II обезвоживания перегружается на ленточный конвейер, подающий обезвоженные хвосты на смешение с вяжущим. На этот кон-

вейер дозируется отсев (фракция менее 15 мм) отходов горного производства. Подготовка смеси к иммобилизации проводится в двухвальных бетоносмесителях типа БП-2Г-4500. Вяжущее подается в бетоносмесители весовыми дозаторами СБ-71В. Подготовленная смесь откачивается на укладку в хранилище поршневыми бетононасосами BSA 1400 HP-D [23].

Таким образом, установлена возможность использования твердеющих смесей с применением в качестве вяжущего цемента, доменного гранулированного шлака и золы, а в качестве наполнителя – хвостов ГМЗ для их иммобилизации при заполнении карт поверхностных хвостохранилищ, определена прочность, рецептура и последовательность укладки полученной твердеющей смеси в хранилище (табл. 5) [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ

В результате выполненных работ по пылеподавлению по данным санитарно-эпидемиологической службы содержание пыли в воздухе хвостохранилища ниже предельно-допустимых концентраций [25]. Результаты исследования твердеющих смесей, приготовленных на основе хвостов ГМЗ для сооружения макета дамбы хвостохранилища, показали следующее:

- контакт дамбовой воды и технической с твердеющей смесью в пределах исследованного диапазона концентрации солей и времени не разрушает ее и не влияет на прочность;
- коэффициент фильтрации смеси составляет менее 1 см в сутки, а прочность твердеющей смеси, пригото-

вленной на дамбовой воде, на 25 % выше, чем при использовании технической воды;

- выбуренные керны из массива дамбы после одного года пребывания на открытом воздухе прочность (2,0 – 2,3 МПа) не потеряют.

Твердеющая смесь после 100 циклов «замораживание – оттаивание» получила незначительное шелушение поверхности и сохранность формы, в соответствии с требованием СНиП-56 – 76 считается морозостойчивой.

Для контроля за распространением подземных вод, их химическим составом в пределах санитарно-защитной зоны и зоны наблюдения хвостохранилища (до 1000 м по его периметру) создана режимная сеть скважин. Два раза в год проводятся замеры уровня подземных вод и отбор проб воды для химического анализа. За каждый год приводится отчетность, выполняется анализ характера миграции сульфатов и нитратов по данным режимных наблюдений. Работы выполняются гидрогеологической службой ГП «ВостГОК» (Украина). Проводятся мероприятия по предотвращению пыления хвостового материала из сухих пляжей чаши хвостохранилища путем покрытия их суглинком мощностью до 0,5 м и по укреплению низовых откосов дамб [26].

Повышение экологической безопасности в зоне влияния горных объектов достигается за счет разработки и внедрения новых методов, технологий и технических средств, обеспечивающих возможность использования для закладки местных некондиционных материалов и отходов производства, уменьшение расхода вяжущего, снижение затрат на добычу рудного

Т а б л и ц а 5

Технологические показатели формирования хвостохранилища

Table 5. Technological indicators of tailing dump

Показатель	Вариант формирования хвостохранилища		
	1	2	3
Форма укладки отходов	Замкнутый объем из привозного материала	Ленточный блок по ширине	Ленточный блок по длине
Средство укладки	Бетононасос стрелами длиной 50 м	Бетононасос стрелами длиной 50 м	Трубопровод
Объем заскладированных отходов в блоке, тыс. м ³	138,0	1050,0	126,0
Параметры уложенного массива (блока), м:			
длина	190,0	1200,0	1200,0
ширина	150,0	50,0	6,0
высота	5,5	17,5	17,5
Площадь обнажений, м ² :			
– горизонтальных поверхностей;	28 500,0	7850,0*	600,0**
– вертикальных (наклонных)	–	92 760,0	92 760,0
Всего	28 500,0	100 610,0	93 360,0

* – принято по параметрам одного блока в работе и одного в стадии отвердения;

** – принято по размерам длины выпускного пульпопровода, обеспечивающей необходимую производительность по укладке хвостов.

сырья. Технология укладки иммобилизованных хвостов горно-металлургических производств в хранилище наклонными слоями обеспечивает удаление накапливающейся жидкости в емкости хранилища по мере его заполнения [27, 28].

НАПРАВЛЕНИЕ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам настоящей работы отмечена целесообразность полного покрытия лесом всех загрязненных локальных участков, а также всех санитарно-защитных зон вокруг горных объектов. Лес заменит гидропылеподавляющие системы для уменьшения пыления «сухих» пляжей, поскольку в лесу ветра практически нет. Территории, где ПДК загрязнений превышена, необходимо изымать из хозяйственного использования и переводить в земли природно-заповедного фонда местного значения со сплошным залеснением и ограниченным посещением людьми. Возможен перевод этих территорий под посев технических культур, а в водоемах – запрет вылова рыбы, купания и др. Кроме того, нужно разработать научно-методические основы и технические средства для повышения плодородности и эффективности использования почв промышленных зон горно-металлургических производств, а также дать оценку их влияния на окружающую среду и человека [29, 30].

Выводы

Установлена возможность использования твердеющих смесей с применением в качестве вяжущего отходов горного производства и предложен оптимальный состав ингредиентов на 1 м³ смеси для заполнения воронки обрушения (1350 – 1500 кг хвостов обогатительной фабрики (песковая часть); 50 – 70 кг молотого гранулированного шлака; 350 л воды затворения); для закладки выработанного пространства камер (1400 кг нейтрализованных хвостов ГМЗ; 200 кг цемента марки М200; 400 л воды затворения); для укладки в хвостохранилище (1600 – 1800 кг хвостов ГМЗ; 200 кг цемента марки М200; 350 л воды затворения). Предложены технологические, планировочные и инженерные мероприятия для улучшения экологической обстановки на площадках горных предприятий и зоне влияния горных объектов за счет проведения предусматривающих покрытие поверхностей «сухих» пляжей хвостохранилища суглинком (по мере необходимости), организацию ливневой канализации для сбора поверхностных и профильтрованных через отвалы вод и подачи их на установку очистки шахтных вод; изоляцию поверхности отвалов почворастительным слоем, препятствующим пылевыведению и миграции загрязняющих веществ от воздействия атмосферных осадков; рекультивацию загрязненных в процессе производственной деятельности локальных участков общей площадью 20 тыс. м² и др. Рекомендовано «сухое» в иммобилизованном виде

складирование хвостов горно-металлургического производства в хвостохранилища вместо традиционного наливного способа, который включает комплекс подготовки хвостов к складированию, состоящий из корпуса обезвоживания, складов обезвоженных хвостов и цемента, узла приготовления раствора, сгустителей, конвейерных галерей и вспомогательных сооружений. При заполнении связанными хвостами всей существующей площади зеркала хвостохранилища на высоту 10 м и производительности ГМЗ до 1,5 млн т в год продлевается срок его эксплуатации на 50 лет. Показаны перспективные направления дальнейших исследований технологий и технических средств для утилизации хвостов обогащения руд с извлечением всех опасных и ценных ингредиентов с применением механической и механохимической активаций минерального сырья, а также механической и химической компоненты выщелачивания. Эти мероприятия позволяют повысить экологическую безопасность промышленных регионов путем вовлечения в производство складированных хвостов обогащения и эффективность комбинированного выщелачивания металлов из хвостов горного, обогатительного и металлургического переделов руд (электрохимических, ультразвуковых, радиационно-термических, механохимических, гидрохимических и др.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yuan Y., Bolan N., Prévost A., Vithanage M., Biswas J.K., Ok Y.S., Wang H. Applications of biochar in redox-mediated reactions // *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 246. P. 271 – 281.
2. Ломоносов Г.Г., Полоник П.И., Абдалах Х. Совершенствование технологии очистных работ на основе применения пастообразных закладочных материалов // *Горный журнал*. 2000. № 2. С. 21 – 23.
3. Добыча и переработка урановых руд в Украине. Монография / Под общ. ред. А.П. Чернова. – Киев: Адеф – Украина, 2001. – 238 с.
4. Hu S. G., Lu X. J., Niu H. L. and Jin Z. Q. Research on preparation and properties of backfilling cementation material based on blast furnace slag // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 158. P. 189 – 196.
5. Lottermoser B. *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. – New York: Springer, 2012. – 400 p.
6. Maanju S.K., Saha K. Impact of mining industry on environmental fabric – a case study of Rajasthan State in India // *Journal of Environmental Science. Toxicology and Food Technology*. 2013. Vol. 6. No. 2. P. 8 – 13.
7. Snelling P.E., Godin L., McKinnon S.D. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada // *Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013. Vol. 58. P. 166 – 179.
8. Reiter K., Heidbach O. 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada) // *Solid Earth*. 2014. No. 5. P. 1123 – 1149.
9. Kayri M. Predictive abilities of Bayesian regularization and Levenberg – Marquardt algorithms in artificial neural networks: a comparative empirical study on social data // *Mathematical and Computational Applications*. 2016. Vol. 21. No. 2. Article 21020020.
10. Chowdhury S.R., Yanful E.K., Pratt A.R. Recycling of nickel smelter slag for arsenic remediation – an experimental study // *Environmental Science and Pollution Research*. 2014. Vol. 21. No. 17. P. 10096 – 10107.
11. Modaihs A.S., Mahjoub M.O., Nadeem M.E.A., Ghoneim A.M., Al-Barakah F.N. The air quality, characterization of polycyclic

- aromatic hydrocarbon, organic carbon, and diurnal variation of particulate matter over Riyadh City // *Journal of Environmental Protection*. 2016. No. 7. P. 1198 – 1209.
12. Ke X., Zhou X., Wang X., Wang T., Hou H., and Zhou M. Effect of tailings fineness on the pore structure development of cemented paste backfill // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 126. P. 345 – 350.
 13. Beiyuan J., Awad Y.M., Beckers F., Tsang D.C., Ok Y.S., Rinklebe J. Mobility and phytoavailability of As and Pb in a contaminated soil using pine sawdust biochar under systematic change of redox conditions // *Chemosphere*. 2017. Vol. 178. P. 110 – 118.
 14. Deng D.Q., Liu L., Yao Z.L., Song K.I., Lao D.Z. A practice of ultra-fine tailings disposal as filling material in a gold mine // *Journal of Environmental Management*. 2017. Vol. 196. P. 100 – 109.
 15. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterization: Informing material recovery and fuel production // *Waste Management*. 2017. Vol. 61. P. 40 – 57.
 16. Cheng Y., Jiang H., Zhang X., Cui J., Song C., Li X. Effects of coal rank on physicochemical properties of coal and on methane adsorption // *Int. Journal of Coal Science & Technology*. 2017. Vol. 4. No. 2. P. 129 – 146.
 17. Paul A., Murthy V.M.S.R., Prakash A.K. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines. A modified RMR approach // *Current Science*. 2018. Vol. 114. No. 10. P. 2167 – 2174.
 18. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Проблемы и перспективы развития ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения недр Земли // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012. № 4. С. 116 – 124.
 19. Кощаченко В.И. Разработка взрывной технологии, снижающей вредное воздействие на окружающую среду // *Изв. Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2016. № 1. С. 34 – 43.
 20. Ляшенко В.И., Голик В.И. Научное и конструкторско-технологическое сопровождение развития уранового производства. Достижения и задачи // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. № 7. С. 137 – 152.
 21. Строительство хвостохранилища на медно-молибденовом руднике Лос-Пеламбрес в Чили. – URL: <http://mineral.ru/News/34680.html> (дата обращения: 06.11.2019).
 22. Ляшенко В.И. Развитие научно-методических основ оценки эффективности природоохранных технологий и технических средств при добыче и переработке рудного сырья // *Безопасность труда в промышленности*. 2017. № 9. С. 30 – 36.
 23. Ляшенко В.И., Дятчин В.З., Лисовой И.А. Повышение безопасности горного производства на основе эффективного управления отходами добычи и переработки рудного сырья // *Безопасность труда в промышленности*. 2017. № 11. С. 16 – 22.
 24. Ляшенко В.И., Чекушина Т.В., Лисовой И.А., Лисовой Т.С. Экологическая безопасность в зоне влияния уранового производства // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23. № 3. С. 60 – 65.
 25. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников // *Горный журнал*. 2017. № 11. С. 52 – 59.
 26. Эпов М.И., Юркевич Н.В., Бортникова С.Б., Карин Ю.Г., Саева О.П. Определение состава горно-рудных отходов геохимическими и геофизическими методами (на примере хвостохранилища Салаирского горно-обогатительного комбината) // *Геология и геофизика*. 2017. Т. 58. № 12. С. 1944 – 1954.
 27. Крупская Л.Т., Голубев Д.А., Растанина Н.К., Филатова М.Ю. Рекультивация поверхности хвостохранилища закрытого горного предприятия Приморского края с использованием биоремедиации // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. № 9. С. 138 – 148.
 28. Волков Е.П., Анушенков А.Н. Разработка технологии закладки горных выработок твердеющими смесями на основе хвостов обогащения // *Изв. вуз. Горный журнал*. 2019. № 7. С. 5 – 13.
 29. Lyashenko V., Topolnij F., Dyatchin V. Development of technologies and technical means for storage of waste processing of ore raw materials in the tailings dams // *Technology audit and production reserves*. 2019. Vol. 3. No. 49. P. 33 – 40.
 30. Ляшенко В.И., Голик В.И. Комбинированные геотехнологии предконцентрации запасов руд выщелачиванием металлов из рудного сырья // *Маркшейдерия и недропользование*. 2020. № 2 (106). С. 16 – 23.

Поступила в редакцию 5 декабря 2019 г.
После доработки 20 января 2020 г.
Принята к публикации 24 января 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 7, pp. 529–538.

INCREASING ENVIRONMENTAL SAFETY BY REDUCING TECHNOGENIC LOAD IN MINING REGIONS

V.I. Lyashenko¹, V.I. Golik², V.Z. Dyatchin³

¹ Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology, Zhovti Vody, Dnipropetrovsk Region, Ukraine

² North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Republic of North Ossetia – Alania, Russia

³ Institute of Entrepreneurship “Strategy”, Zhovti Vody, Dnipropetrovsk Region, Ukraine

Abstract. One of the most problematic points in technology for storing ore enrichment waste materials with hardener admixture into underground mined space and tailing dumps are the tailings of hydrometallurgical plant (HMP). They are supplied through a slurry pipeline to the tailing dump in form of pulp with solid to liquid mass ratio of 1:2. Liquid phase of the pulp after gravity separation and clarification in tailing dump is returned to technological cycle of HMP. Storage technology under consideration has several disadvantages: high nonrecurrent capital costs for construction of tailing dump at full design capacity; high probability of harmful chemicals migration into groundwater if protec-

tive shields of the base or sides of tailings are damaged. The authors have used data from literature and patent documentation considering storage parameters, laboratory and production experiments, physical modeling and selection of compositions of hardening mixtures. Analytical studies, comparative analysis of theoretical and practical results by standard and new methods were performed. Possibility of using hardening mixtures with adjacent production wastes used as binders was established. Optimal composition of ingredients per 1 m³ of hardening mixture is proposed as follows: 1350 – 1500 kg of HMP tailings; 50 – 70 kg of binder (cement); 350 liters of mixing water. Proposed technology of ore enrichment waste storage into underground mined space and tailings with hardener admixture application allows using underground mined space at the enterprise production capacity of 1,500 thousand tons per year to store 50 – 55 % of tailings, and store the rest wastes cemented by binding material in repository. When filling the entire area of the tailing dump mirror of 10 m height with cemented tails and HMP capacity of up to 1.5 million tons per year, its operation life is extended by 50 years.

Keywords: ore enrichment waste, tailings, stacking technology, environmental safety, efficiency.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-529-538

REFERENCES

- Yuan Y., Bolan N., PrévotEAU A., Vithanage M., Biswas J.K., Ok Y.S., Wang H. Applications of biochar in redox-mediated reactions. *Bioresource Technology*. 2017, vol. 246, pp. 271–281.
- Lomonosov G.G., Polonik P.I., Abdalakh Kh. Improving extraction technology with the use of pasteous filling materials. *Gornyi zhurnal*. 2000, no. 2, pp. 21–23. (In Russ.).
- Chernov A.P. ed. *Dobycha i pererabotka uranovikh rud v Ukraine. Monografiya* [Mining and enrichment of uranium ores in Ukraine. Monograph]. Kiev: Adef–Ukraine, 2001, 238 p. (In Russ.).
- Hu S. G., Lu X. J., Niu H. L., Jin Z. Q. Research on preparation and properties of backfilling cementation material based on blast furnace slag. *Advanced Materials Research*. 2011, vol. 158, pp. 189–196.
- Lottermoser B. *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. New York: Springer, 2012, 400 p.
- Maanju S.K., Saha K. Impact of mining industry on environmental fabric – a case study of Rajasthan State in India. *Journal of Environmental Science. Toxicology and Food Technology*. 2013, vol. 6, no. 2, pp. 8–13.
- Snelling P.E., Godin L., McKinnon S.D. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada. *Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013, vol. 58, pp. 166–179.
- Reiter K., Heidbach O. 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada). *Solid Earth*. 2014, no. 5, pp. 1123–1149.
- Kayri M. Predictive abilities of Bayesian regularization and Levenberg – Marquardt algorithms in artificial neural networks: a comparative empirical study on social data. *Mathematical and Computational Applications*. 2016, vol. 21, no. 2, article 21020020.
- Chowdhury S.R., Yanful E.K., Pratt A.R. Recycling of nickel smelter slag for arsenic remediation – an experimental study. *Environmental Science and Pollution Research*. 2014, vol. 21, no. 17, pp. 10096–10107.
- Modaihsh A.S., Mahjoub M.O., Nadeem M.E.A., Ghoneim A.M., Al-Barakah F.N. The air quality, characterization of polycyclic aromatic hydrocarbon, organic carbon, and diurnal variation of particulate matter over Riyadh City. *Journal of Environmental Protection*. 2016, no. 7, pp. 1198–1209.
- Ke X., Zhou X., Wang X., Wang T., Hou H., Zhou M. Effect of tailings fineness on the pore structure development of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 126, pp. 345–350.
- Beiyuan J., Awad Y.M., Beckers F., Tsang D.C., Ok Y.S., Rinklebe J. Mobility and phytoavailability of As and Pb in a contaminated soil using pine sawdust biochar under systematic change of redox conditions. *Chemosphere*. 2017, vol. 178, pp. 110–118.
- Deng D.Q., Liu L., Yao Z.L., Song K.I., Lao D.Z. A practice of ultra-fine tailings disposal as filling material in a gold mine. *Journal of Environmental Management*. 2017, vol. 196, pp. 100–109.
- Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterization: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*. 2017, vol. 61, pp. 40–57.
- Cheng Y., Jiang H., Zhang X., Cui J., Song C., Li X. Effects of coal rank on physicochemical properties of coal and on methane adsorption. *Int. Journal of Coal Science & Technology*. 2017, vol. 4, no. 2, pp. 129–146.
- Paul A., Murthy V.M.S.R., Prakash A.K. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines. A modified RMR approach. *Current Science*. 2018, vol. 114, no. 10, pp. 2167–2174.
- Trubetskoi K.N., Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V. Problems and prospects for development of resource-saving and resource-reproducing geotechnologies for integrated development of the Earth's deep interior. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2012, no. 4, pp. 116–124. (In Russ.).
- Komashchenko V.I. Development of explosive technology reducing environmental impact. *Izv. Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2016, no. 1, pp. 34–43 (In Russ.).
- Lyashenko V.I., Golik V.I. Scientific, design and technological support for development of uranium production. Achievements and tasks. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2017, no. 7, pp. 137–152. (In Russ.).
- Stroitel'stvo khvostokhranilishcha na medno-molibdenovom rudnike Los-Pelambres v Chili* [Construction of tailing dump at the Los Pelambres Copper-Molybdenum Mine in Chile]. Available at URL: <http://mineral.ru/News/34680.html> (reference date: 06.11.2019). (In Russ.).
- Lyashenko V.I. Development of scientific and methodological foundations for evaluating effectiveness of environmental technologies and technical equipment in extraction and processing of ore resources. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2017, no. 9, pp. 30–36. (In Russ.).
- Lyashenko V.I., Dyatchin V.Z., Lisovoi I.A. Improving safety of mining through effective waste management of mining and processing of ore resources. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2017, no. 11, pp. 16–22. (In Russ.).
- Lyashenko V.I., Chekushina T.V., Lisovoi I.A., Lisovaya T.S. Environmental safety in the zone of influence of uranium production. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2019, vol. 23, no. 3, pp. 60–65. (In Russ.).
- Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Design philosophy and choice of technologies for sustainable development of underground mines. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 11, pp. 52–59. (In Russ.).
- Epov M.I., Yurkevich N.V., Bortnikova S.B., Karin Yu.G., Saeva O.P. Analysis of mine waste by geochemical and geophysical methods (a case study of the mine tailing dump of the Salair ore-processing plant). *Russian Geology and Geophysics*. 2017, vol. 58, no. 12, pp. 1543–1552.
- Krupsкая L.T., Golubev D.A., Rastanina N.K., Filatova M.Yu. Reclamation of tailings storage surface at a closed mine in the Primorsky Krai by bio remediation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019, no. 9, pp. 138–148. (In Russ.).
- Volkov E.P., Anushenkov A.N. Development of technology for filling mine workings with hardening mixtures based on enrichment tailings. *Izv. vuz. Gornyi zhurnal*. 2019, no. 7, pp. 5–13. (In Russ.).
- Lyashenko V., Topolnij F., Dyatchin V. Development of technologies and technical means for storage of waste processing of ore raw materials in the tailings dams. *Technology Audit and Production Reserves*. 2019, vol. 3, no. 49, pp. 33–40.
- Lyashenko V.I., Golik V.I. Combined geotechnologies for preconcentration of ore reserves by metals leaching from ores. *Marksheideriya i nedropol'zovanie*. 2020, no. 2 (106), pp. 16–23. (In Russ.).

Acknowledgements. Provided technology was designed with participation of Yu.N. Tarkhin, N.A. Khudoshina, L.A. Lyashenko, A.G. Skotarenko.

Information about the authors:

V.I. Lyashenko, Cand. Sci. (Eng.), Head of Research Department, Senior Researcher (vilyashenko2017@gmail.com)

V.I. Golik, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Mining Engineering (v.i.golik@mail.ru)

V.Z. Dyatchin, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Management and Social Work (dsveta49@mail.ru)

Received December 5, 2019

Revised January 20, 2020

Accepted January 24, 2020

УДК 669.18.046.516.2

ЖИДКОФАЗНОЕ БОРИРОВАНИЕ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ*

*Иванов Ю.Ф.¹, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник (yuf55@mail.ru)**Громов В.Е.², д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин**им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)**Романов Д.А.², д.т.н., старший научный сотрудник (romanov_da@physics.sibsiu.ru)**Иванова О.В.³, к.ф.-м.н., доцент кафедры высшей математики ТГАСУ (dekanat_oof@tsuab.ru)**Тересов А.Д.¹, ведущий электроник лаборатории низкотемпературной плазмы (tad514@yandex.ru)*¹ Институт сильноточной электроники СО РАН

(634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3)

² Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

³ Томский государственный архитектурно-строительный университет

(634003, Россия, Томск, пл. Соляная, 2)

Аннотация. Методами современного физического материаловедения выполнен анализ структурно-фазовых состояний и трибологических свойств стали 12Х18Н10Т, подвергнутой электровзрывному легированию титаном и бором и последующей электронно-пучковой обработке в различных режимах по плотности энергии пучка электронов и длительности импульса воздействия. Установлено, что электровзрывное легирование стали титаном и бором приводит к формированию поверхностного слоя с многофазной субмикро-нанокристаллической структурой, характеризующейся наличием микропор, микротрещин и микрократеров. Комплексная обработка, сочетающая электровзрывное легирование и последующее облучение высокоинтенсивным импульсным электронным пучком, приводит к формированию многофазного субмикро-нанокристаллического поверхностного слоя толщиной до 60 мкм. Показано, что фазовый состав поверхностного слоя стали определяется соотношением масс титана и бора при электровзрывном легировании. Микротвердость модифицированного слоя определяется относительной массовой долей боридов титана в поверхностном слое и может более чем в 18 раз превышать микротвердость стали в исходном (перед электровзрывным легированием) состоянии. Определены режимы комплексной обработки, при которых формируется поверхностный слой, содержащий исключительно бориды титана и интерметаллиды на основе титана и железа. Максимальное (примерно 82 % (по массе)) содержание боридов титана наблюдается при обработке стали по режиму с наибольшей массой порошка бора в навеске ($m_B = 87,5$ мг; $m_T/m_B = 5,202$). При уменьшении массы порошка бора относительное содержание боридов в поверхностном слое стали снижается. Установлено, что комплексная обработка стали сопровождается повышением микротвердости поверхностного слоя в семь раз, износостойкость стали увеличивается более чем в девять раз.

Ключевые слова: высокохромистая нержавеющая сталь, бор, титан, электровзрывное легирование, интенсивный импульсный электронный пучок, структура, свойства.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-539-547

ВВЕДЕНИЕ

Перевод атомных электростанций на более обогащенное топливо и, соответственно, ужесточение требований к абсорбирующей способности материалов обуславливает необходимость увеличения концентрации бора в сталях, которые часто используются при изготовлении емкостей для хранения отработанного ядерного топлива благодаря высокой нейтронопоглощающей способности бора [1]. Максимальная концентрация бора в используемых в настоящее время сталях не превышает 1,8 % (по массе) (сталь марки ЧС82), что обусловлено низкой пластичностью легированного бором материала, вызванной грубой формой бори-

дов [2, 3]. Измельчение структуры стали и сфероидизацию боридов осуществляют путем термомеханической обработки стали [4] и дополнительным легированием [5 – 9]. Цитируемые методы и подходы основаны на объемном модифицировании структуры и свойств стали. В последние десятилетия активно развиваются методы модифицирования стали, в основе которых заложено применение концентрированных потоков энергии [10 – 16]. Одним из таких методов является электровзрывное легирование, которое позволяет оплачивать обрабатываемую поверхность, насыщая расплав компонентами плазменной струи, сформированной из продуктов электрического взрыва проводника [17 – 19]. В ряде работ показано, что дополнительное облучение материала, легированного электровзрывным методом, интенсивным импульсным электронным пучком способствует гомогенизации модифицированного слоя, удалению микропор и микрократеров, повышению ме-

* Исследование выполнено при поддержке грантов Российского научного фонда (проекты № 18-79-00013 (эксперименты по электровзрывному легированию) и № 19-19-00183 (исследования методами электронной микроскопии)).

ханических, трибологических и усталостных свойств детали в целом [20].

Целью настоящей работы является анализ результатов и установление закономерностей формирования структуры и свойств аустенитной нержавеющей высокохромистой стали, подвергнутой легированию титаном и бором комплексным методом, сочетающим насыщение поверхностного слоя материала плазмой электрического взрыва проводящего материала и облучение высокоинтенсивным импульсным электронным пучком в режиме высокоскоростного плавления и кристаллизации легированного слоя.

МАТЕРИАЛ, МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И МЕТОДИКИ

ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследований была использована нержавеющая сталь марки 12X18H10T [21]. Образцы имели форму пластинок размерами $10 \times 10 \times 5$ мм. Легирование поверхностного слоя стали осуществляли электровзрывным методом (ЭВЛ) на установке ЭВУ 60/10 [17]. В качестве электропроводящего материала использовали фольгу технически чистого титана марки BT1-0, на поверхности которой располагали навеску порошка бора. Использовали порошок аморфного бора марки В-99В-ТУ 1-92-1549, В > 99 %, диаметр частиц 0,5 – 5,0 мкм. Параметры электровзрывного легирования: плотность мощности 2,2 ГВт/м², длительность импульса воздействия плазмы 100 мкс. Применяли четыре режима ЭВЛ, которые характеризовались различным соотношением масс фольги титана и порошка аморфного бора. Соотношения масс фольги титана m_{Ti} и навески порошка аморфного бора m_B , использованных для ЭВЛ стали 12X18H10T, приведены ниже:

Режим	m_{Ti} , мг	m_B , мг	m_{Ti}/m_B
1	360,7	50,0	7,214
3	392,2	62,5	6,275
5	423,7	75,0	5,649
7	455,2	87,5	5,202

На втором этапе модифицированную электровзрывным методом поверхность части образцов подвергали облучению высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (ВИЭП) [20] при следующих параметрах: энергия ускоренных электронов 17 кэВ, плотность энергии пучка электронов 40 и 20 Дж/см², длительность импульса воздействия пучка электронов 200 и 50 мкс, количество импульсов 3. Облучение образцов электронным пучком проводили дважды: сначала поверхность облучали электронным пучком с параметрами 17 кэВ, 40 Дж/см², 200 мкс, 3 имп.; после: 17 кэВ, 20 Дж/см², 50 мкс, 3 имп. Облучение образцов проводили в едином вакуумном пространстве на установке «СОЛО» [11]. Выбор режима облучения был основан на результатах

моделирования температурного поля [22]. Таким образом, исследованию подвергали две партии образцов: образцы после ЭВЛ (далее образцы 1, 3, 5, 7) и образцы, прошедшие двойную обработку, – ЭВЛ + ВИЭП (далее образцы 2, 4, 6, 8, где образец 2 – это образец, подвергнутый ЭВЛ по режиму 1 и ВИЭП, образец 4 – это образец, подвергнутый ЭВЛ по режиму 3 и ВИЭП, и т.д.).

Исследования структуры стали в исходном состоянии и после модифицирования осуществляли методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD 6000), сканирующей (прибор SEM 515 Philips) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM-2100F) электронной микроскопии. Исследования элементного состава образцов осуществляли методами микрорентгеноспектрального анализа. Исследуемые свойства модифицированного слоя: микротвердость (приборы ДУН-211S (Shimadzu, Япония), нагрузка на индентор 30 мН и ПМТ-3, нагрузка на индентор 1 Н) и износостойкость (прибор TRIBOtechnique; условие сухого трения при комнатной температуре, контртело – шарик ШХ15 diam. 6 мм, диаметр трека 4 мм, скорость вращения образца 2,5 см/с, нагрузка на индентор 10 Н, количество оборотов 8000). Износостойкость поверхностного слоя материала рассчитывали после проведения профилометрии образовавшегося трека.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Электровзрывная обработка стали 12X18H10T сопровождается формированием высокоразвитого рельефа с большим количеством микрокапель, микрократеров, микротрещин, наплывов металла, что характерно для данного метода воздействия на поверхность металлов и сплавов (рис. 1, а). Последующее облучение модифицированной стали интенсивным импульсным электронным пучком сопровождается выглаживанием поверхности материала за счет действия сил поверхностного натяжения расплава, практически полностью исчезают микрократеры и наплывы металла, однако остаются (в малом количестве) микротрещины (рис. 1, б).

Элементный состав модифицированного слоя стали определяли методами микрорентгеноспектрального анализа [23]. Результаты исследований приведены на рис. 2, а. Можно отметить, что после электровзрывного легирования (рис. 2, режимы обработки 1, 3, 5, 7) бор и титан являются основными элементами поверхностного слоя образцов; элементы, формирующие сталь, присутствуют в незначительном количестве. Следовательно, электровзрывная обработка с выбранными в настоящей работе параметрами сопровождается формированием не только легированного слоя стали, но и тонкого покрытия на основе титана и бора. Максимальная суммарная концентрация атомов бора и титана обнаруживается в поверхностном слое стали, модифицированной электровзрывным методом по ре-

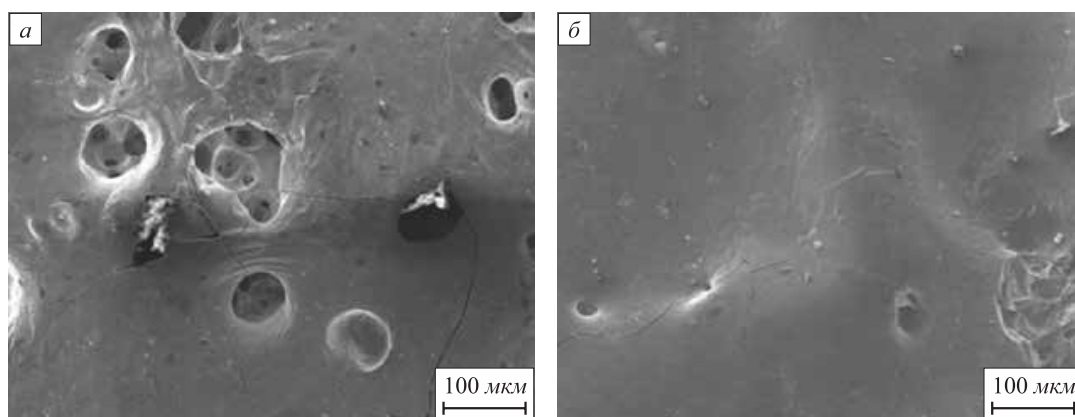


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности стали после ЭВЛ по режиму 3 (а) и последующего облучения ВИЭП (б). Сканирующая электронная микроскопия

Fig. 1. Electron-microscopic image of steel surface structure after electroexplosive alloying (EPA) at the mode 3 (a) and subsequent irradiation by a high-intensity pulsed electron beam (HIEB) (б). Scanning electron microscopy

жимам 1 и 7. Увеличение относительного содержания порошка бора в распыляемой навеске (при последовательной смене режимов $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 7$, рис. 2, а) сопровождается монотонным снижением концентрации бора в легированном слое.

Облучение легированного слоя ВИЭП сопровождается жидкофазным перемешиванием поверхностного слоя материала. На это указывает существенное увеличение в объеме поверхностного слоя элементов, формирующих сталь (железо, хром и никель) (рис. 2, а). Следует, однако, отметить, что при увеличении относительного содержания порошка бора в распыляемой навеске (при последовательной смене режимов $2 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 8$, рис. 2, а) концентрация основных элементов подложки в поверхностном слое монотонно снижается. Максимальная концентрация бора в поверхностном слое стали выявлена в образце, модифицированном по режиму 6 (рис. 2, а).

Фазовый состав модифицированного слоя стали изучали методами рентгеноструктурного анализа. Установлено, что электровзрывное легирование независимо от режима воздействия сопровождается формированием в поверхностном слое многофазного состояния, основными фазами которого являются бориды титана состава TiB и TiB_2 (рис. 2, б). Максимальное количество боридов титана, достигающее суммарно 75 % (по массе), формируется при электровзрывном легировании по режиму 1 (рис. 2, б). При этом основным боридом титана является борид состава TiB (рис. 2, б).

Последующее облучение модифицированного слоя стали ВИЭП приводит к существенному увеличению относительного содержания диборида титана TiB_2 . В поверхностном слое образца, подвергнутого ЭВЛ по режиму 7 и дополнительной обработке ВИЭП, данное соединение становится основной фазой (рис. 2, б, режим 8). Можно предположить, что увеличение отно-

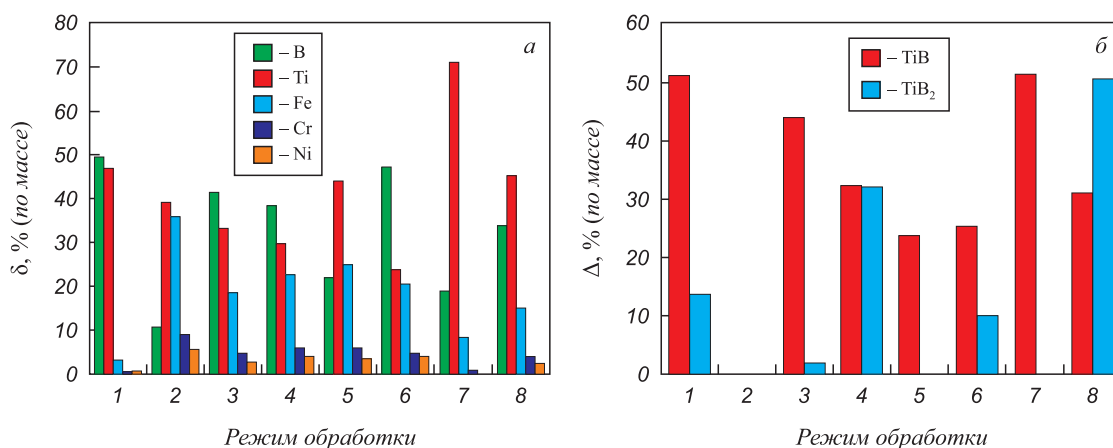


Рис. 2. Результаты микрорентгеноспектрального (а) и рентгенофазового (б) анализа поверхностного слоя стали 12Х18Н10Т, подвергнутой ЭВЛ титаном и бором (по режимам обработки 1, 3, 5, 7) и последующему облучению ВИЭП (по режимам обработки 2, 4, 6, 8)

Fig. 2. Results of X-ray microspectral (a) and X-ray phase (б) analysis of the surface layer of 12Kh18N10T steel subjected to EPA with titanium and boron (at processing modes 1, 3, 5, 7) and subsequent HIEB irradiation (at processing modes 2, 4, 6, 8)

Микротвердость (HV), коэффициент износа (k) и коэффициент трения (μ) стали 12X18H10T после ЭВЛ и дополнительного облучения ВИЭП (ЭВЛ + ВИЭП)

Microhardness (HV), wear coefficient (k) and friction coefficient (μ) of 12X18H10T steel after EPA and additional HIEB exposure (EPA + HIEB)

Параметр	Режим							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	ЭВЛ	ЭВЛ + ВИЭП	ЭВЛ	ЭВЛ + ВИЭП	ЭВЛ	ЭВЛ + ВИЭП	ЭВЛ	ЭВЛ + ВИЭП
HV, МПа	35 398,4	12 891,0	10 243,4	10 866,0	11 144,0	13 763,0	18 993,9	9398,0
k , мм ³ /Н·м		$1,3 \cdot 10^{-3}$		$1,3 \cdot 10^{-3}$		$0,3 \cdot 10^{-3}$		$1,2 \cdot 10^{-3}$
μ		0,61		0,57		0,65		0,60

П р и м е ч а н и е. Для исходной стали HV = 1952 МПа; $k = 2,8 \cdot 10^{-3}$ мм³/Н·м; $\mu = 0,58$.

сительного содержания диборида титана обусловлено существенным различием температур кристаллизации этих соединений, диборид титана образуется при температуре 3225 °С, борид титана – при температуре 2200 °С [24].

Механические свойства модифицированного электровзрывным легированием поверхностного слоя стали характеризовали микротвердостью (см. таблицу). Анализируя результаты, можно отметить, что ЭВЛ независимо от режима обработки сопровождается многократным (5,2 – 18,1) увеличением микротвердости поверхностного слоя стали. Максимальное значение микротвердости поверхностного слоя стали получено для образцов, модифицированных в соответствии с режимом 1. Сопоставляя результаты элементного и фазового состава модифицированного слоя, представленные на рис. 2, с результатами механических испытаний (см. таблицу), можно констатировать, что максимальная твердость поверхностного слоя стали соответствует максимальной концентрации в слое бора и максимальному относительному содержанию боридов титана составов TiB и TiB₂.

Облучение ВИЭП поверхности стали, подвергнутой электровзрывному легированию титаном и бором (режимы 1 и 7), приводит к снижению микротвердости модифицированного слоя. При комплексной обработке по режимам 4 и 6 микротвердость материала превышает микротвердость стали в состоянии после ЭВЛ. Наибольшие значения микротвердости, превышающие микротвердость стали в исходном состоянии в семь раз, достигаются в образце, модифицированном по режиму 6. Следует отметить, что этот режим модифицирования характеризуется наибольшей концентрацией бора в поверхностном слое (рис. 2, а, режим 6), сформированном исключительно боридами титана (TiB и TiB₂) и интерметаллидом (TiFe₂).

Трибологические характеристики (параметр износа (величина, обратная износостойкости) и коэффициент трения) стали 12X18H10T удалось измерить лишь для образцов, подвергнутых комплексной обработке. Высокий уровень шероховатости поверхности образцов

после ЭВЛ не позволил корректно измерить данные характеристики материала. Из результатов выполненных исследований видно, что износостойкость стали (величина, обратная коэффициенту износа k) после комплексной обработки, сочетающей электровзрывное легирование титаном и бором и последующее облучение высокоинтенсивным импульсным электронным пучком, достигает наибольших значений в образце, модифицированном по режиму 6, и превышает износостойкость исходной стали более чем в девять раз.

Для образца стали 12X18H10T, подвергнутого комплексной обработке по режиму 6, был построен профиль микротвердости (рис. 3). Отчетливо видно, что толщина упрочненного слоя достигает 60 мкм, твердость слоя остается неизменной по всей его толщине.

Очевидно, что высокие прочностные и трибологические свойства модифицированной стали обусловлены структурно-фазовым состоянием материала. Морфологию структуры поверхностного слоя стали изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг [25 – 27]. Фольги готовили методом ионного утонения пластинок, вырезанных

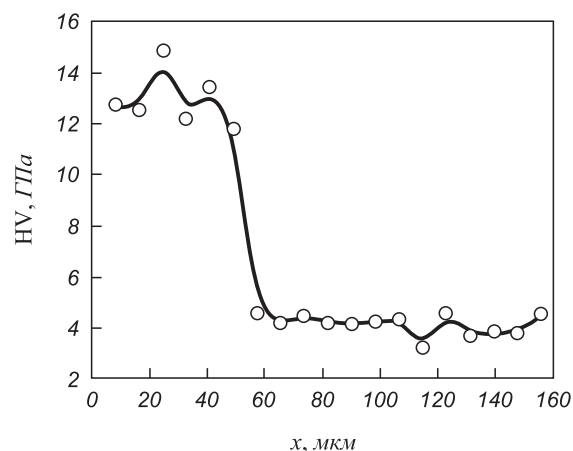


Рис. 3. Профиль микротвердости образца стали 12X18H10T, подвергнутой комплексной обработке по режиму 6

Fig. 3. Microhardness profile of 12Kh18N10T steel sample subjected to complex treatment at the mode 6

перпендикулярно поверхности модифицирования. Такое расположение фольги позволяет анализировать состояние материала на различном контролируемом расстоянии от поверхности образца. Характерное изображение структуры стали, формирующейся на различном расстоянии от поверхности обработки, приведено на рис. 4.

Отчетливо видно, что в результате обработки в поверхностном слое стали формируется субмикро-нанокристаллическая структура, размеры кристаллитов которой изменяются в пределах от десятков до сотен нанометров (рис. 4, *а, б*). Толщина слоя с подобной структурой не превышает 60 мкм. При большем удалении от поверхности образца выявляется поликристал-

лическая структура, характерная для стали в исходном состоянии (рис. 4, *в*).

Элементный состав модифицированного слоя изучали методами микрорентгеноспектрального анализа тонких фольг (метод картирования [23]). Результаты исследований (рис. 5) свидетельствуют о неравномерном распределении легирующих элементов в поверхностном слое стали. Выделяются области, обогащенные и обедненные титаном (рис. 5, *а, б*).

Присутствие атомов бора в поверхностном слое стали методом картирования выявляется плохо. Более доказательными являются результаты микрорентгеноспектрального анализа, представленные в виде энергетических спектров (рис. 5, *в*). Выполненные таким

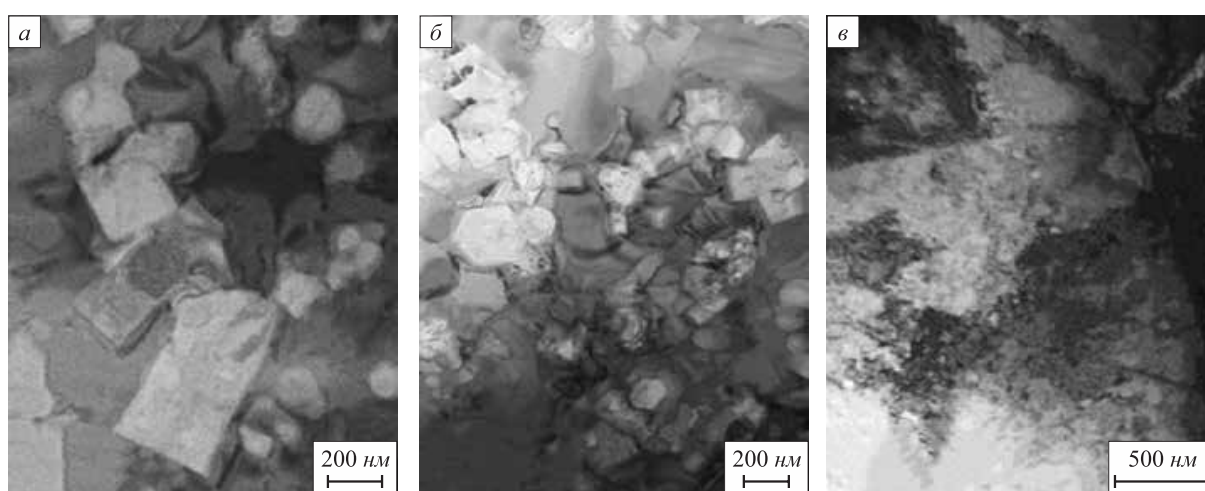


Рис. 4. Структура стали 12X18H10T после комплексной обработки:
а – слой, примыкающий к поверхности образца; *б* – слой на глубине примерно 40 мкм; *в* – слой на глубине примерно 60 мкм

Fig. 4. Structure of 12X18H10T steel after complex treatment:
a – layer adjacent to the sample surface; *б* – layer at nearly 40 microns depth; *в* – layer at nearly 60 microns depth

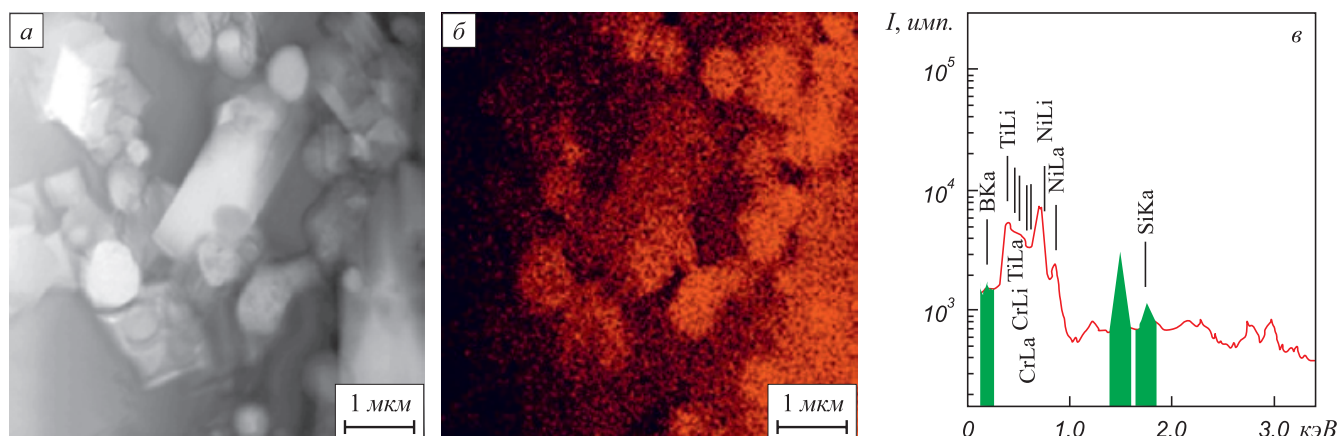


Рис. 5. Результаты микрорентгеноспектрального анализа модифицированного слоя стали 12X18H10T

(анализируется слой, примыкающий к поверхности модифицирования):

а – светлое поле; *б* – изображение, полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов титана; *в* – фрагмент энергетических спектров, полученных с участка фольги, приведенного на поз. *а* (анализируется слой, примыкающий к поверхности модифицирования)

Fig. 5. Results of X-ray microspectral analysis of the modified layer of 12X18H10T steel (layer adjacent to the modifying surface was analyzed):
a – bright field; *б* – image obtained in symptomatic X-ray radiation of titanium atoms; *в* – fragment of energy spectra obtained from the foil piece shown in pos. *a* (layer adjacent to the modifying surface was analyzed)

образом исследования показали, что концентрация бора в поверхностном слое изменяется немонотонным образом, достигая максимальной величины (примерно 19 % (ат.)) на расстоянии 10 – 15 мкм от поверхности легирования.

Анализ микроэлектроннограмм и применение темнопольных изображений позволяет провести визуализацию фаз, присутствующих в стали [25 – 30]. Пример такого анализа приведен на рис. 6, на котором представлены изображения кристаллитов TiB_2 (рис. 6, в) и TiB (рис. 6, з). Размер выявленных кристаллитов изменяется в широких пределах: от 30 до 200 нм.

Выводы

Электровзрывное легирование стали титаном и бором приводит к формированию поверхностного слоя с многофазной субмикро-нанокристаллической структурой, характеризующейся наличием микропор, мик-

ротрещин и микрократеров. Показано, что фазовый состав поверхностного слоя стали определяется соотношением масс титана и бора при электровзрывном легировании. Высказано предположение, что электровзрывная обработка с выбранными в настоящей работе параметрами сопровождается не только легированием стали, но и формированием тонкого покрытия, обогащенного атомами титана и бора. Обнаружено, что микротвердость модифицированного слоя определяется относительной массовой долей боридов титана в поверхностном слое и может более чем в 18 раз превышать микротвердость стали в исходном (перед электровзрывным легированием) состоянии.

Установлено, что комплексная обработка поверхности высокохромистой нержавеющей стали 12X18H10T, сочетающая электровзрывное легирование титаном и бором и последующее облучение высокоинтенсивным импульсным электронным пучком, позволяет формировать многофазный субмикро-нанокристалли-

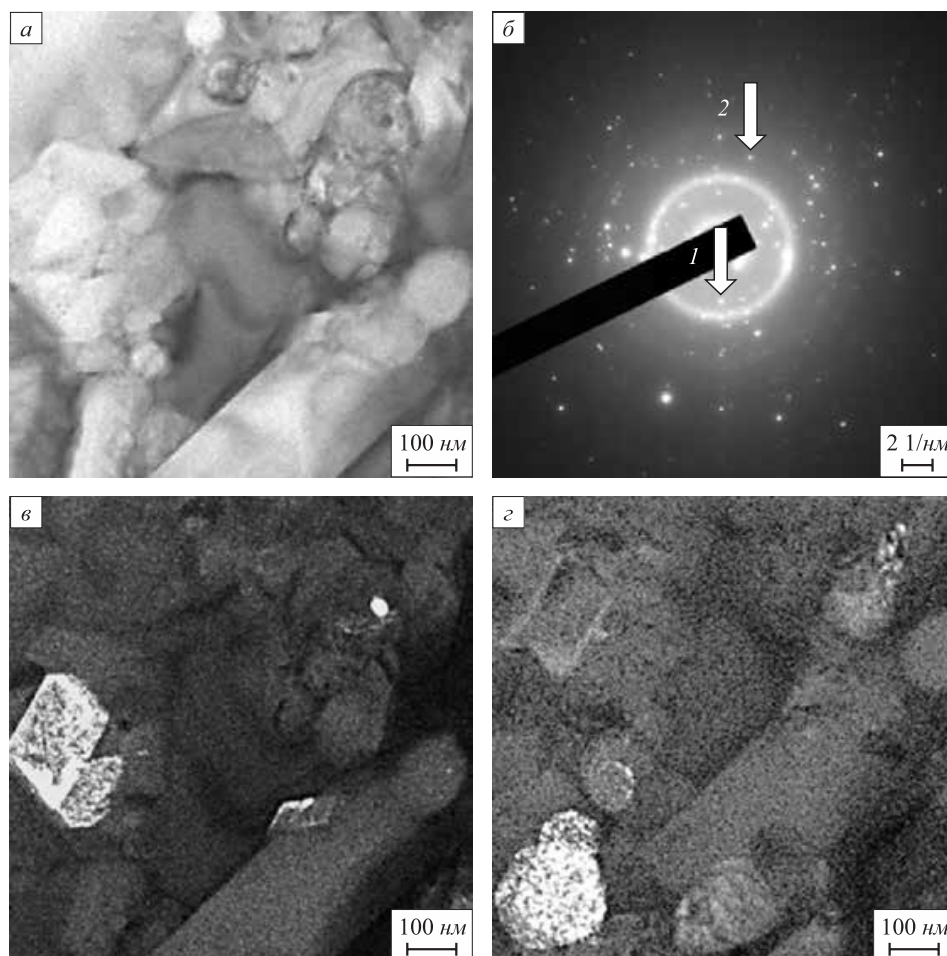


Рис. 6. Электронно-микроскопическое изображение структуры стали 12X18H10T после комплексной обработки: а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в, з – темное поле, полученное в рефлексе $[100] TiB_2$ и $[220] TiB$; на поз. б стрелками указаны рефлекс, в которых получено темное поле (рефлекс 1 – поз. в; рефлекс 2 – поз. з) (анализируется слой, примыкающий к поверхности модифицирования)

Fig. 6. Electron-microscopic image of 12X18H10T steel structure after complex treatment:

а – bright field; б – microelectron diffraction pattern; в, з – dark field obtained in the reflex of $[100] TiB_2$ and $[220] TiB$; at pos. б; arrows indicate reflexes in which dark field is obtained (reflex 1 – pos. в; reflex 2 – pos. з) (layer adjacent to the modified surface was analyzed)

ческий поверхностный слой толщиной до 60 мкм. Выявлены режимы комплексной обработки, приводящие к формированию поверхностного слоя, содержащего исключительно бориды титана и интерметаллиды на основе титана и железа. Максимальное (примерно 82 % (по массе)) содержание боридов титана наблюдается при обработке стали по режиму с массой порошка бора в навеске $m_{\text{Ti}}/m_{\text{B}} = 5,202$. При уменьшении массы порошка бора относительное содержание боридов в поверхностном слое стали снижается.

Микротвердость и износостойкость поверхностного слоя стали 12Х18Н10Т, модифицированной комплексным методом, сочетающим электровзрывное легирование атомами бора и титана и последующее облучение высокоинтенсивным импульсным электронным пучком, превышает микротвердость материала в исходном состоянии в семь раз, износостойкость – более чем в девять раз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Shulga A.V. A comparative study of the mechanical properties and the behavior of carbon and boron in stainless steel cladding tubes fabricated by PM HIP and traditional technologies // *Journal of Nuclear Materials*. 2013. Vol. 434. No. 1-3. P. 133 – 140.
- Sude Ma, Jianjun Zhang. Wear resistant high boron cast alloy – A Review // *Reviews on Advanced Material Science*. 2016. Vol. 44. No. 1. P. 54 – 62.
- Zhang J., Gao Y., Xing J., Ma S., Yi D., Liu L., Yan J. Effects of plastic deformation and heat treatment on microstructure and properties of high boron cast steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2011. Vol. 20. No. 9. P. 1658 – 1664.
- Saha R., Ray R.K. Development of texture, microstructure, and grain boundary character distribution in a high-strength boron-added interstitial-free steel after severe cold rolling and annealing // *Metall. Mater. Trans. A*. 2009. Vol. 40. No. 9. P. 2160 – 2170.
- Saha R., Ray R.K. Microstructural and textural changes in a severely cold rolled boron-added interstitial-free steel // *Scripta Materialia*. 2007. Vol. 57. No. 3. P. 841 – 844.
- He L., Liu Y., Li J., Li B.H. Effects of hot rolling and titanium content on the microstructure and mechanical properties of high boron Fe–B alloys // *Materials and Design*. 2012. Vol. 36. No. 4. P. 88 – 93.
- Liu Y., Li B.H., Li J., He L., Gao S.J., Nieh T.G. Effect of titanium on the ductilization of Fe–B alloys with high boron content // *Materials Letters*. 2010. Vol. 64. No. 11. P. 1299 – 1301.
- Бор. Его соединения и сплавы / Г.В. Самсонов, Л.Я. Марковский, А.Ф. Жигач, М.Г. Валяшко; под общ. ред. Г.В. Самсонова. – Киев: Изд-во АН Украинской ССР, 1960. – 591 с.
- Ren X., Fu H., Xing J., Yi Y. Effect of solidification rate on microstructure and toughness of Ca–Ti modified high boron high speed steel // *Material Science and Engineering A*. 2019. Vol. 742. P. 617 – 627.
- Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. Учебник / В.А. Грибков, Ф.И. Григорьев, Б.А. Калинин, В.Л. Якушин. – М.: Круглый стол, 2001. – 527 с.
- Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // *Изв. вуз. Физика*. 2008. № 5. С. 60 – 70.
- Surface modification and alloying: by laser, ion, and electron beams / Eds. J.M. Poate, G. Foti, D.C. Jacobson. – New York and London: Plenum Press., 1983. – 414 p.
- Сильноточные электронные импульсные пучки для авиационного двигателестроения / В.А. Шулов, А.Г. Пайкин, А.С. Новиков и др.; под общ. ред. В.А. Шулова, А.С. Новикова, В.И. Энгелько. – М.: Артек, 2012. – 283 с.
- Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов / К.К. Кадыржанов, Ф.Ф. Комаров, А.Д. Погребняк и др. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 640 с.
- Модификация материалов компрессионными плазменными потоками / В.В. Углов, Н.Н. Черенда, В.М. Анищик, В.М. Асташинский, Н.Т. Квасов. – Минск: изд. БГУ, 2013. – 248 с.
- Основы технологии обработки поверхности материалов импульсной гетерогенной плазмой / Е.А. Будовских, Е.В. Мартусевич, П.С. Носарев, В.Е. Громов, В.Д. Сарычев. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2002. – 170 с.
- Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2007. – 301 с.
- Kononov S., Gromov V., Ivanov Yu. Multilayer structure of Al–Si alloy after electro-explosion alloying with yttrium oxide powder // *Material Research Express*. 2018. Vol. 5. No. 11. No. Art. 116520.
- Романов Д.А., Громов В.Е., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф. Закономерности формирования структурно-фазовых состояний на поверхности металлов и сплавов при электровзрывном легировании // *Успехи физики металлов*. 2015. Т. 16. № 2. С. 119 – 157.
- Структура, фазовый состав и свойства поверхностных слоев титановых сплавов после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки / Под ред. В.Е. Громова, Ю.Ф. Иванова, Е.А. Будовских. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2012. – 435 с.
- Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
- Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A. Surface treatment of materials with low-energy, high-current electron beams. – In: *Materials Surface Processing by Directed Energy Techniques* / Ed. Y. Pauleau. – Elsevier Inc., 2006. P. 205 – 240.
- Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный анализ в примерах практического применения / М.М. Криштал, И.С. Ясников, В.И. Полунин, А.М. Филатов, А.Г. Ульяненок; под общ. ред. М.М. Криштала. – М.: Техносфера, 2009. – 208 с.
- Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник. В 3 т. Т. 1. / Под общ. ред. Н.П. Лакишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.
- Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в материаловедении. – М.: Металлургия, 1973. – 584 с.
- Tomas G., Goringe M.J. Transmission electron microscopy of materials. – New York: John Wiley & Sons, 1979. – 318 p.
- Andrews K.W., Dyson D.J., Keown S.R. Interpretation of electron diffraction patterns. – London, 1968. – 256 p.
- Kumar C.S.S.R. (Ed.) Transmission electron microscopy characterization of nanomaterials. – New York: Springer, 2014. – 717 p.
- Barry Carter C., David B.W. Transmission electron microscopy. – Berlin: Springer International Publishing, 2016. – 518 p.
- Egerton R.F. Physical principles of electron microscopy. – Berlin: Springer, 2016. – 196 p.

Поступила в редакцию 30 сентября 2019 г.

После доработки 22 октября 2019 г.

Принята к публикации 15 ноября 2019 г.

LIQUID-PHASE BORIDING OF HIGH-CHROMIUM STEEL

Yu.F. Ivanov¹, V.E. Gromov², D.A. Romanov², O.V. Ivanova³,
A.D. Teresov¹

¹Institute of High Current Electronics, SB RAS, Tomsk, Russia

²Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo
Region – Kuzbass, Russia

³Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Using the methods of modern physical materials science, structural-phase states and tribological properties of 12Kh18N10T steel, subjected to electroexplosive alloying with titanium and boron and subsequent electron-beam processing in various modes depending on electron beam energy density, exposure pulse duration and their quantity have been analyzed. It has been established that electroexplosive alloying of steel with titanium and boron leads to formation of surface layer with multiphase submicro-nanocrystalline structure, characterized by presence of micropores, microcracks, and microcraters. Complex processing, combining electroexplosive alloying and subsequent irradiation with high-intensity pulsed electron beam, leads to formation of 60 μm thick multiphase submicro-nanocrystalline surface layer. It is shown that phase composition of surface layer of steel is determined by mass ratio of titanium and boron during electroexplosive alloying. Microhardness of modified layer is defined by relative mass fraction of titanium borides in surface layer and can be more than 18 times higher than microhardness of steel in its initial state (before electroexplosive alloying). Modes of complex processing have been determined at which surface layer containing exclusively titanium borides and intermetallic compounds based on titanium and iron is formed. The maximum (approximately 82 % by weight) titanium boride content is observed when steel is processed at regime with the highest mass of boron powder in the sample ($m_B = 87.5$ mg; $m_{Ti}/m_B = 5.202$). With decrease in mass of boron powder, relative content of borides in surface layer of steel decreases. It was found that integrated processing of steel is accompanied by sevenfold increase in microhardness of surface layer, wear resistance of steel increases by more than nine times.

Keywords: high-chromium stainless steel, boron, titanium, electric explosive alloying, intense pulsed electron beam, structure, properties.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-539-547

REFERENCES

- Shulga A.V. A comparative study of the mechanical properties and the behavior of carbon and boron in stainless steel cladding tubes fabricated by PM HIP and traditional technologies. *Journal of Nuclear Materials*. 2013, vol. 434, no. 1-3, pp. 133–140.
- Sude Ma, Jianjun Zhang. Wear resistant high boron cast alloy – A Review. *Reviews on Advanced Material Science*. 2016, vol. 44, no. 1, pp. 54–62.
- Zhang J., Gao Y., Xing J., Ma S., Yi D., Liu L., Yan J. Effects of plastic deformation and heat treatment on microstructure and properties of high boron cast steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2011, vol. 20, no. 9, pp. 1658–1664.
- Saha R., Ray R.K. Development of texture, microstructure, and grain boundary character distribution in a high-strength boron-added interstitial-free steel after severe cold rolling and annealing. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2009, vol. 40, no. 9, pp. 2160–2170.
- Saha R., Ray R.K. Microstructural and textural changes in a severely cold rolled boron-added interstitial-free steel. *Scripta Materialia*. 2007, vol. 57, no. 3, pp. 841–844.
- He L., Liu Y., Li J., Li B.H. Effects of hot rolling and titanium content on the microstructure and mechanical properties of high boron Fe–B alloys. *Materials and Design*. 2012, vol. 36, no. 4, pp. 88–93.
- Liu Y., Li B.H., Li J., He L., Gao S.J., Nieh T.G. Effect of titanium on the ductilization of Fe–B alloys with high boron content. *Materials Letters*. 2010, vol. 64, no. 11, pp. 1299–1301.
- Samsonov G.V., Markovskii L.Ya., Zhigach A.F., Valyashko M.G. *Bor. Ego soedineniya i splavy* [Boron. Its compounds and alloys]. Samsonov G.V. ed. Kiev: Izd-vo AN Ukrainskoi SSR, 1960, 591 p. (In Russ.).
- Ren X., Fu H., Xing J., Yi Y. Effect of solidification rate on microstructure and toughness of Ca–Ti modified high boron high speed steel. *Material Science and Engineering A*. 2019, vol. 742, pp. 617–627.
- Gribkov V.A., Grigor'ev F.I., Kalin B.A., Yakushin V.L. *Perspektivnye radiatsionno-puchkovye tekhnologii obrabotki materialov. Uchebnik* [Promising radiation-beam technologies for materials processing. Textbook]. Moscow: Kruglyi stol, 2001, 527 p. (In Russ.).
- Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of the surface of ceramic-metal and ceramic materials at pulsed electron-beam processing. *Izv. vuz. Fizika*. 2008, no. 5, pp. 60–70. (In Russ.).
- Poate J.M., Foti G., Jacobson D.C. *Surface Modification and Alloying: By Laser, Ion, and Electron Beams*. Springer, 1983, 414 p. (Russ. ed.: Poate J.M., Foti G., Jacobson D.C. *Modifikatsiya i legirovanie poverkhnosti lazernymi, ionnymi i elektronnymi puchkami*. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 424 p.).
- Shulov V.A., Paikin A.G., Novikov A.S. etc. *Sil'notochnye elektronnye impul'snye puchki dlya aviatsionnogo dvigatelestroeniya* [High-current electronic pulsed beams for aircraft engines]. Shulov V.A., Novikov A.S., Engel'ko V.I. eds. Moscow: Artek, 2012, 283 p. (In Russ.).
- Kadyrzhanoov K.K., Komarov F.F., Pogrebnyak A.D. etc. *Ionno-luchevaya i ionno-plazmennaya modifikatsiya materialov* [Ion-beam and ion-plasma modification of materials]. Moscow: Izd-vo MGU, 2005, 640 p. (In Russ.).
- Uglov V.V., Cherenda N.N., Anishchik V.M., Astashinskii V.M., Kvasov N.T. *Modifikatsiya materialov kompressionnymi plazmennymi potokami* [Modification of materials by compression plasma flows]. Minsk: izd. BGU, 2013, 248 p. (In Russ.).
- Budovskikh E.A., Martusevich E.V., Nosarev P.S., Gromov V.E., Sarychev V.D. *Osnovy tekhnologii obrabotki poverkhnosti materialov impul'snoi geterogennoi plazmoi* [Theoretical fundamentals of materials surface treatment by pulsed heterogeneous plasma]. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2002, 170 p. (In Russ.).
- Bagautdinov A.Ya., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. *Fizicheskie osnovy elektrovzryvnogo legirovaniya metallov i splavov* [Physical fundamentals of electroexplosive alloying of metals and alloys]. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2007, 301 p. (In Russ.).
- Konovalov S., Gromov V., Ivanov Yu. Multilayer structure of Al–Si alloy after electro-explosion alloying with yttrium oxide powder. *Material Research Express*. 2018, vol. 5, no. 11, no. article 116520.
- Romanov D.A., Gromov V.E., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F. Regularities of structural phase states formation on surface of metals and alloys during electroexplosive alloying. *Uspekhi fiziki metallov*. 2015, vol. 16, no. 2, pp. 119–157. (In Russ.).
- Struktura, fazovyi sostav i svoystva poverkhnostnykh sloev titanovykh splavov posle elektrovzryvnogo legirovaniya i elektronno-puchkovoi obrabotki* [Structure, phase composition and properties of surface layers of titanium alloys after electroexplosive alloying and electron-beam processing]. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Budovskikh E.A. eds. Novokuznetsk: Inter-Kuzbass, 2012, 435 p. (In Russ.).
- Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A. etc. *Marochnik stalei i splavov* [Grade guide of steels and alloys]. Sorokin V.G. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 640 p. (In Russ.).

22. Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A. Surface treatment of materials with low-energy, high-current electron beams. In: *Materials Surface Processing by Directed Energy Techniques*. Pauleau Y. ed. Elsevier, 2006, pp. 205–240.
23. Krishtal M.M., Yasnikov I.S., Polunin V.I., Filatov A.M., Ul'yanenkov A.G. *Skaniruyushchaya elektronnyaya mikroskopiya i rentgenospektral'nyi analiz v primerakh prakticheskogo primeneniya* [Scanning electron microscopy and X-ray spectral analysis in practice]. Krishtal M.M. ed. Moscow: Tekhnosfera, 2009, 208 p. (In Russ.).
24. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem: Spravochnik. V 3 t. T. 1.* [State diagrams of double metal systems: Reference book. In 3 vols. Vol. 1]. Lyakishev N.P. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1996, 992 p. (In Russ.).
25. Utevsii L.M. *Difraktsionnaya elektronnyaya mikroskopiya v metallovedenii* [Diffraction electron microscopy in metal science]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 584 p. (In Russ.).
26. Tomas G., Goringe M.J. *Transmission Electron Microscopy of Materials*. New York: John Wiley & Sons, 1979, 318 p.
27. Andrews K.W., Dyson D.J., Keown S.R. *Interpretation of Electron Diffraction Patterns*. London, 1968, 256 p.
28. *Transmission Electron Microscopy Characterization of Nanomaterials*. Kumar C.S.S.R. ed. New York: Springer, 2014, 717 p.
29. Barry Carter C., David B.W. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 2016, 518 p.
30. Egerton R.F. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Berlin: Springer, 2016, 196 p.

Acknowledgements. The work was financially supported by grants of the Russian Science Foundation (project No. 18-79-00013 (experiments on electrical explosive alloying) and project No. 19-19-00183 (electron microscopy)).

Information about the authors:

Yu.F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Chief Researcher (yuf55@mail.ru)

V.E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel' (gromov@physics.sibsiu.ru)

D.A. Romanov, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Senior Researcher (romanov_da@physics.sibsiu.ru)

O.V. Ivanova, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Assist. Professor of the Chair of Advanced Mathematics (dekanat_oof@tsuab.ru)

A.D. Teresov, Leading Electronic Engineer of the Laboratory of Low-temperature Plasma (tad514@yandex.ru)

Received September 30, 2019

Revised October 22, 2019

Accepted November 15, 2019

УДК 621.74.046

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ НА УСТАНОВКЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ. СООБЩЕНИЕ 1

Лехов О.С., д.т.н., профессор кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии (MXLehov38@yandex.ru)

Михалев А.В., к.т.н., старший преподаватель кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии (mialex@trubprom.com)

Российский государственный профессионально-педагогический университет
(620012, Россия, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)

Аннотация. Поставлена и решена объемная задача определения напряженно-деформированного состояния (НДС) металла в очаге деформации при формировании разделяющими выступами калиброванных бойков из сляба трех сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Обоснована целесообразность использования этой установки для продольного разделения непрерывнолитого сляба на ряд сортовых заготовок. Приведена калибровка бойков с разделяющими выступами для получения за один проход трех сортовых заготовок, соединенных перемычками. Показано объемное изображение таких заготовок. Описана технология их получения на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Изложена постановка задачи и приведены исходные данные и граничные условия для определения НДС металла в очаге деформации при формировании калиброванными бойками установки трех стальных сортовых заготовок с использованием пакета ANSYS. Приведены зависимости модуля упругости и сопротивления деформации от температуры и степени деформации для стали марки СтЗсп. Описаны использованные при расчете НДС металла в очаге деформации твердотельные конечные элементы и приведены размеры сетки. Результаты расчета НДС металла в очаге деформации при получении из непрерывнолитого сляба трех стальных сортовых заготовок на установке совмещенного процесса получены решением задачи упругопластичности методом конечных элементов в объемной постановке. Результаты расчета перемещений и напряжений в очаге деформации представлены в виде графиков и таблиц по рабочим поверхностям в четырех поперечных сечениях и взяты для характерных точек. Определены величины и закономерности распределения осевых перемещений по ширине и длине очага деформации при внедрении разделяющих буртов бойка в непрерывнолитой сляб при получении трех стальных сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Ключевые слова: установка совмещенного процесса, кристаллизатор, сляб, заготовка, разделение, напряжение, деформация, конечный элемент.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-548-553

ВВЕДЕНИЕ

В современном металлургическом производстве для получения сортовых заготовок для мелкосортных станов используются обжимные и непрерывно-заготовочные станы, причем на обжимной стан поступают непрерывнолитые заготовки или отдельные слитки [1, 2]. Однако такой технологический процесс производства сортовых заготовок отличается высокими капитальными, эксплуатационными и энергетическими затратами, так как он включает машину непрерывного литья сортовых заготовок, нагревательные печи, обжимной и непрерывно-заготовочный станы. В связи с этим в мире ведутся работы по созданию ресурсосберегающих литейно-прокатных комплексов для производства сортовых заготовок, в частности процессов продольного разделения непрерывнолитых слябов на ряд сортовых заготовок [3 – 5].

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК НА УСТАНОВКЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ

Для решения выше изложенных проблем производства сортовых заготовок может быть эффективно использована компактная установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для одновременного получения из непрерывнолитого сляба трех и более сортовых заготовок за один проход [6 – 8].

В установке для получения сортовых заготовок калибровка бойков с разделяющими выступами (рис. 1) выполнена таким образом, что при сведенном положении бойков они в совокупности образуют закрытую полость разъемного кристаллизатора, которая обеспечивает на выходе из него одновременное получение трех сортовых заготовок, соединенных перемычками (рис. 2).

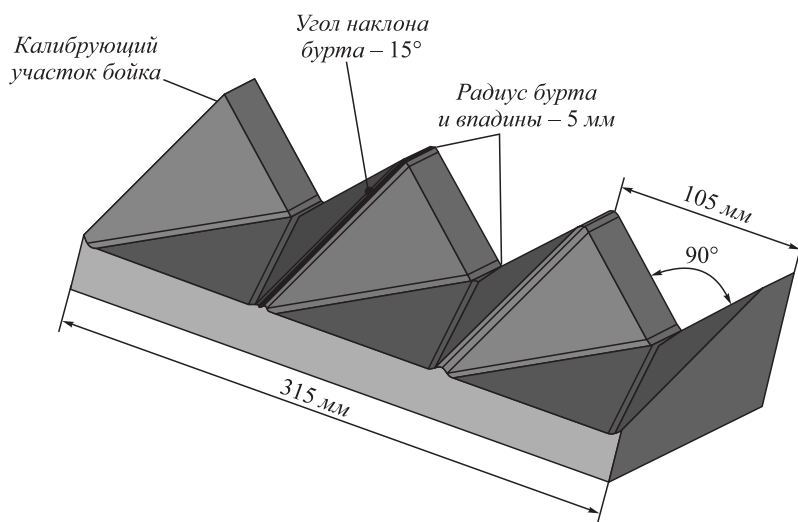


Рис. 1. Изображение бойков

Fig. 1. Image of strikers

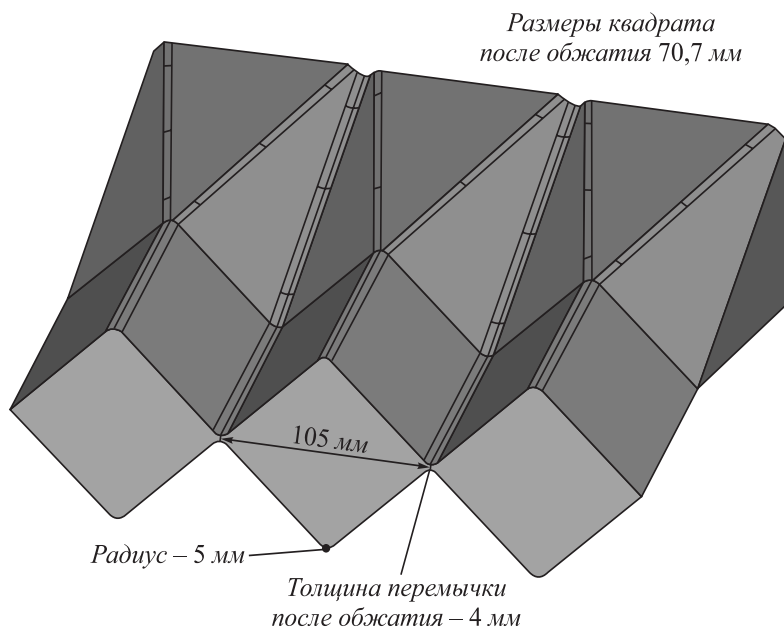


Рис. 2. Объемное изображение трех сортовых заготовок толщиной 100 и шириной 315 мм

Fig. 2. Three-dimensional image of three section billets with thickness of 100 mm and width of 315 mm

Установка непрерывного литья и деформации работает следующим образом. Расплав металла заливают в медный водоохлаждаемый кристаллизатор, в котором происходит кристаллизация металла с образованием замкнутой оболочки с жидкой фазой. В зависимости от сортамента получаемых сортовых заготовок из кристаллизатора может выходить сляб с жидкой фазой или без нее. Далее с помощью тянущего устройства сляб подается в бойки с разделяющими выступами, высота которых постепенно увеличивается в направлении непрерывного литья и деформации. По мере продвижения затвердевшего сляба через калиброванные бойки происходит формирование нескольких сортовых заготовок, соединенных перемычками. Если происходит форми-

рование сортовых заготовок из сляба с жидкой фазой, то при этом наблюдается циклическое вытеснение жидкого металла из полостей сортовых заготовок. После полного вытеснения жидкой фазы из сортовых заготовок происходит одновременное их обжатие рабочими поверхностями разделяющих выступов по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Полное разделение сортовых заготовок происходит после их выхода из установки в специальном блоке дисковых пил.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Рассмотрим процесс получения из сляба толщиной 100 и шириной 315 мм трех сортовых заготовок квадрат

70,7×70,7 мм из стали марки СтЗсп на установке непрерывного литья и деформации. Сечение полости медного водоохлаждаемого кристаллизатора 100×315 мм, боковые стенки кристаллизатора выполнены в виде полукружности с радиусом 50 мм. Температура внешней поверхности слюба равна 1200 °С, а его осевой зоны – 1450 °С. По толщине слюба температура изменяется линейно. На рис. 1 изображен калиброванный боек для получения трех сортовых заготовок квадрат 70,7×70,7 мм из слюба без жидкой фазы толщиной 100 и шириной 315 мм.

Объемное изображение трех сортовых заготовок, соединенных перемычками, приведено на рис. 2. Величина эксцентриситета эксцентриковых валов равна 5 мм, а их угловая скорость – 50 мин⁻¹. Коэффициент трения между калиброванным бойком и слюбом принят 0,5.

Зависимости модуля упругости и сопротивления пластической деформации от степени деформации

и температуры для стали марки СтЗсп представлены на рис. 3 [9 – 11].

В силу симметрии расчет проводили для четверти очага деформации и бойка. Боек принят абсолютно жестким, что позволило вводить в контакт бойка с очагом деформации только его рабочую поверхность.

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при формировании сортовых заготовок получены решением задачи упругопластичности методом конечных элементов [12 – 19]. Для решения задачи использован пакет ANSYS [20].

Для удобства представления результатов расчета очаг деформации и рабочая поверхность бойка разбиты сечениями (рис. 4).

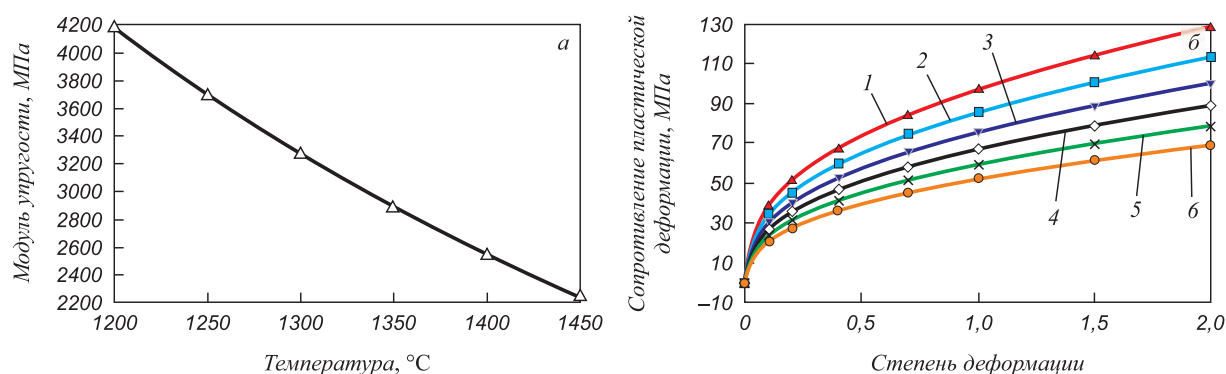


Рис. 3. Зависимость модуля упругости от температуры (а) и сопротивления пластической деформации от степени деформации (б) при температуре 1200 (1), 1250 (2), 1300 (3), 1350 (4), 1400 (5) и 1450 (6) °С для стали марки СтЗсп

Fig. 3. Dependence of elastic modulus on temperature (а) and resistance to plastic deformation (б) on degree of deformation at temperature 1200 (1), 1250 (2), 1300 (3), 1350 (4), 1400 (5) and 1450 (6) °С for St3sp steel

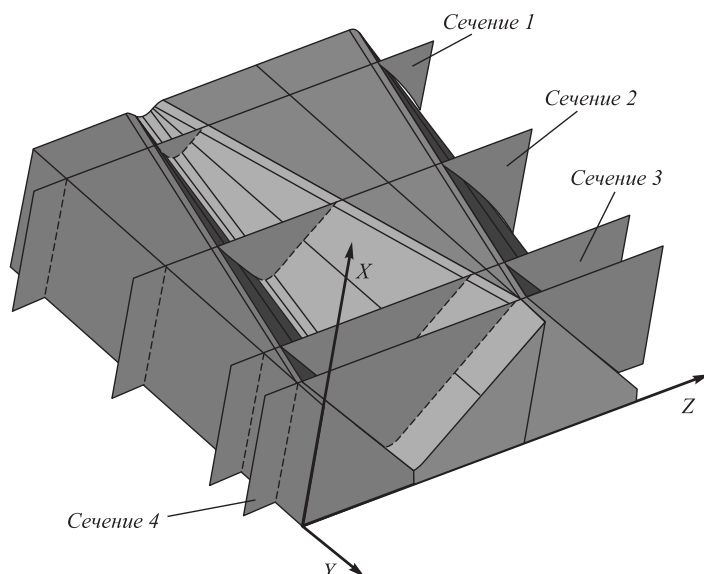


Рис. 4. Положение сечений, в которых приведены графики перемещений и напряжений

Fig. 4. Position of sections for which the graphs of displacements and stresses are given

Для расчета между поверхностью очага деформации и рабочей поверхностью калиброванного бойка созданы десять контактных пар. Каждая контактная пара связана со своим пилотным узлом, на которые задаются граничные условия. К пилотным узлам, связанным с рабочей поверхностью бойка, приложены кинематические граничные условия: перемещение по осям X и Y – 5 мм, что соответствует повороту эксцентрикового вала на 90° .

При моделировании использован восьмиузловой твердотельный конечный элемент SOLID 185. Для создания контактов использованы элементы TARGE 170 и CONTA 174. Элементы CONTA 174 располагались на рабочей поверхности очага деформации, а TARGE 170 – на рабочей поверхности калиброванного бойка. Размер сетки конечных элементов принят переменным в диа-

пазоне 1,0 – 2,5 мм. Минимальный размер элемента принят на рабочей поверхности очага деформации.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты расчета перемещений и напряжений в очаге деформации представлены в виде графиков и таблицы по рабочим поверхностям в четырех поперечных сечениях (см. таблицу, рис. 4). На каждом сечении для удобства представления результатов приведены семь характерных точек (рис. 5).

В таблице приведены значения осевых перемещений в шести характерных точках четырех сечений.

Показан характер распределения осевых перемещений по ширине очага деформации в четырех сечениях (рис. 4) при внедрении разделяющих буртов бойка в сляб на 5 мм. Наибольшее перемещение металла величиной 5 мм наблюдается в направлении оси X в точках 2 и 6. Далее по сечению впадины перемещения металла снижаются и достигают минимальной величины 4 мм в точке 4 впадины.

На рис. 6 представлены результаты расчета перемещений по развертке между точками 2 – 3 – 4 – 5 – 6 сечения 3.

Значения осевых перемещений

Values of axial displacements

Номер точки сечения	Значения перемещений по оси, мм		
	X	Y	Z
	UX	UY	UZ
Сечение 1			
1	-4,98	-2,86	0
2	-4,97	-2,72	-0,03
3	-4,19	-2,18	-0,02
4	-4,08	-1,72	-0,02
5	-4,22	-2,17	-0,02
6	-4,84	-2,61	-0,06
Сечение 2			
1	-4,99	-5,37	0
2	-4,96	-5,15	-0,13
3	-4,57	-5,10	-0,46
4	-4,92	-4,67	-0,06
5	-4,67	-4,97	0,32
6	-4,99	-5,02	0,07
Сечение 3			
1	-5,00	-11,22	0
2	-5,18	-11,03	-0,57
3	-4,58	-12,18	-2,44
4	-5,98	-7,75	-0,34
5	-4,75	-11,86	2,18
6	-5,50	-10,42	0,66
Сечение 4			
1	-4,99	-14,58	0
2	-4,97	-14,54	-0,08
3	-3,33	-17,17	-1,67
4	-5,11	-13,30	-0,32
5	-3,48	-17,25	1,52
6	-5,00	-14,36	0,04

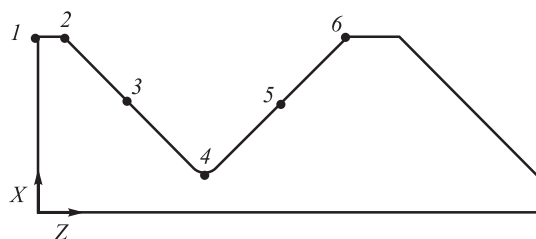


Рис. 5. Вид сечения 3 (положение точек для представления результатов по развертке периметра сечения)

Fig. 5. View of section 3 (position of points for presenting results of the section perimeter scanning)

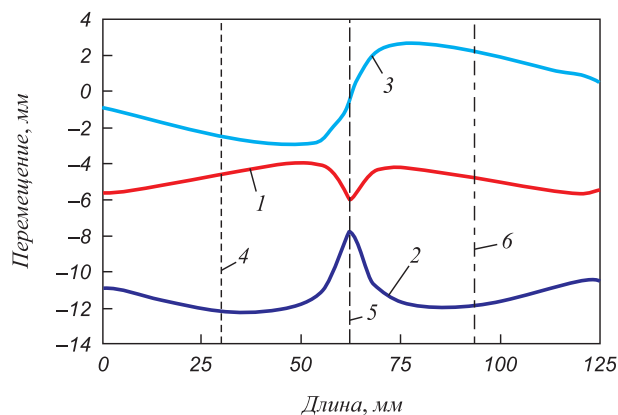


Рис. 6. Осевые перемещения по развертке части периметра сечения 3 (начало графика в точке 2; развертка по точкам 2 – 3 – 4 – 5 – 6): 1 – UX ; 2 – UY ; 3 – UZ ; 4 – точка 3; 5 – точка 4; 6 – точка 5

Fig. 6. Axial displacements along the scanning of part of section 3 perimeter (the beginning of the graph at point 2; scanning along the points 2 – 3 – 4 – 5 – 6):

1 – UX ; 2 – UY ; 3 – UZ ; 4 – point 3; 5 – point 4; 6 – point 5

чения 3 (рис. 5) очага деформации (см. таблицу). Длина развертки составляет 126 мм.

Наибольшие перемещения металла в направлении оси Y величиной 12 мм имеют место в точках 3 и 5, а в точке 4 эти перемещения снижаются до 8 мм. Перемещения в направлении оси X значительно меньше и в точке 4 впадины они достигают 6 мм. Следует отметить характер перемещений металла по длине впадины в направлении оси Z , которые в точке 4 меняют знак перемещений (рис. 6). Значительно меньше перемещения в направлении оси X , которые изменяются от 4 до 6 мм.

Выводы

Поставлена и решена объемная задача определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при формировании разделяющими выступами калиброванных бойков из сляба трех сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Установлены закономерности распределения перемещений металла по ширине и длине очага деформации при внедрении разделяющих выступов бойков установки в непрерывно-литой сляб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Матвеев Б.Н. Новое в производстве балок и сортовых профилей // *Сталь*. 1996. № 3. С. 35 – 40.
- Матвеев Б.Н. Проектирование и внедрение агрегатов бесконечного литья-прокатки сортовых профилей // *Сталь*. 2017. № 10. С. 57 – 60.
- Ямада К., Ватанабе Т., Абе К., Функада Т. Непрерывная разливка заготовок малого сечения // *Черные металлы*. 1981. № 10. С. 18 – 23.
- Поляков Б.Н. Новая технология модернизации заготовочных станков. Многооручевая прокатка сортовых заготовок из непрерывнолитых слябов // *Национальная металлургия. Оборудование*. 2006. № 4. С. 66 – 69.
- Фастыковский А.Р., Федоров А.А. Опыт применения технологии прокатки-разделения в условиях действующего производства // *Производство проката*. 2016. № 12. С. 3 – 7.
- Лехов О.С., Михалев А.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Теория и расчет. – Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2017. – 151 с.
- Лехов О.С., Билалов Д.Х. Технологические возможности установок совмещенных процессов непрерывного литья и деформации для производства металлопродукции // *Производство проката*. 2016. № 7. С. 24 – 26.
- Пат. № 2658761 РФ. Способ непрерывного литья заготовок и устройство для его осуществления / О.С. Лехов, И.В. Ухлов, А.В. Михалев. 2018. Бюл. № 18.
- Мазур Д.Д., Хижняк В.Л. Сопротивление деформации низколегированных сталей // *Сталь*. 1991. № 8. С. 41 – 43.
- Marciniak Z., Duncan J.L., Hu, S.J. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. – Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd, Oxford, 2002. – 228 p.
- Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs // *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1978. Vol. 18. No. 8. P. 510 – 518.
- Sorimachi K., Emi T. Elastoplastic stress analysis of bulging as a major cause of internal cracks in continuously cast slabs // *Tetsu to Hagane*. 1977. Vol. 63. No. 8. P. 1297 – 1304.
- Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling // *Wiley in Steel Research Int.* 2011. Vol. 82. P. 1240 – 1247.
- Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. *Metal Forming and Finite-Element Method*. – New York: Oxford University Press, 1989. – 377 p.
- Matsumia T., Nakamura Y. Mathematical model of slab bulging during continuous casting. – In: *Applied Mathematical and Physical Models in Iron and Steel Industry. Proceedings of the 3rd Process Tech. Conf.*, Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982. – New York, 1982. P. 264 – 270.
- Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in of tubes under tension // *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210. No. 2. P. 336 – 362.
- Kazakov A.L., Spevak L.F. Numeral and analytical studies of nonlinear parabolic equation with boundary conditions of a special form // *Applied Mathematical Modelling*. 2013. Vol. 37. No. 10-13. P. 6918 – 6928.
- Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication. – In: *High Performance Computing for Computational Science – VECPAR 2012*. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. P. 128 – 139.
- Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
- ANSYS. *Structural Analysis Guide*. Rel. 15.0.

Поступила в редакцию 25 марта 2019 г.

После доработки 17 апреля 2019 г.

Принята к публикации 18 апреля 2019 г.

STRESS-STRAIN STATE OF METAL IN DEFORMATION ZONE DURING PRODUCTION OF STEEL SECTION BILLETS ON THE UNIT OF COMBINED CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION. REPORT 1

O.S. Lekhov, A.V. Mikhalev

Russian State Vocational Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Volumetric problem of determining stress-strain state of metal in deformation zone during forming of three section billets from the slab by separating collars of grooved strikers on the unit of combined continuous casting and deformation was set and solved. The expediency of using such unit was justified for longitudinal division

of continuously cast slab into a series of section billets. Calibration of strikers was provided with separating collars for production of three section billets connected by bridges in a single pass. 3D image of them are shown. The technology of billets production on the unit of combined continuous casting and deformation is described. The authors present the problem statement, initial data and boundary conditions for determining stress-strain state of metal in deformation zone during production of three section steel billets by calibrated strikers using the ANSYS software. Dependences of the modulus of elasticity and strain resistance on temperature and degree of defor-

mation are given for St3sp steel. The solid-state finite elements used in calculation of stress-strain state of metal in deformation zone and dimensions of the grid are described. The results of calculation of stress-strain state of metal in deformation zone were obtained by solving the problem of elasticity by the finite element method in volumetric formulation. The results of calculation of displacements and stresses in deformation zone are given in form of graphs and tables by working surfaces in four cross sections and are presented for characteristic points. Values and regularities of distribution of axial displacements in width and length of deformation center were determined during introduction of strikers separating collars into continuously cast slab in production of three section steel billets on the unit of combined continuous casting and deformation.

Keywords: unit of combined process, mold, slab, billet, separation, stress, strain, finite element.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-548-553

REFERENCES

1. Matveev B.N. Novelties in manufacturing the beams and bar shapes. *Stal'*. 1996, no. 3, pp. 35–40. (In Russ.).
2. Matveev B.N. Design and implementation of endless casting and rolling units for high-quality bar. *Stal'*. 2017, no. 10, pp. 57–60. (In Russ.).
3. Yamada K., Vatanabe T., Abe K., Funkda T. Continuous casting of light section billets. *Chernye metally*. 1981, no. 10, pp. 18–23. (In Russ.).
4. Polyakov B.N. New technology for upgrading billet mills. Multi-strand rolling of section billets from continuously cast slabs. *Natsional'naya metallurgiya. Oborudovanie*. 2006, no. 4, pp. 66–69. (In Russ.).
5. Fastyskovskii A.R., Fedorov A.A. Experience in application of rolling-separation technology in existing production. *Proizvodstvo prokata*. 2016, no. 12, pp. 3–7. (In Russ.).
6. Lekhov O.S., Mikhalev A.V. *Ustanovka sovmeshchennogo protsesa nepreryvnogo lit'ya i deformatsii dlya proizvodstva listov iz stali dlya svarnykh trub. Teoriya i raschet* [Unit of combined continuous casting and deformation for production of steel sheets for welded pipes. Theory and design]. Ekaterinburg: Izd-vo UMTs UPI, 2017, 151 p. (In Russ.).
7. Lekhov O.S., Bilalov D.Kh. Technological capabilities of combined continuous casting and deformation units for production of metal products. *Proizvodstvo prokata*. 2016, no. 7, pp. 24–26. (In Russ.).
8. Lekhov O.S., Ukhlov I.V., Mikhalev A.V. *Sposob nepreryvnogo lit'ya zagotovok i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of continuous casting of billets and device for its implementation]. Patent RF no. 2658761. *Byulleten' izobretenii*. 2018, no. 18. (In Russ.).
9. Mazur D.D., Khizhnyak V.L. Resistance of low-alloyed steels to deformation. *Stal'*. 1991, no. 8, pp. 41–43. (In Russ.).
10. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd, Oxford, 2002, 228 p.
11. Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1978, vol. 18, no. 8, pp. 510–518.
12. Sorimachi K., Emi T. Elastoplastic stress analysis of bulging as a major cause of internal cracks in continuously cast slabs. *Tetsu to Hagane*. 1977, vol. 63, no. 8, pp. 1297–1304.
13. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling. *Wiley in Steel Research Int.* 2011, vol. 82, pp. 1240–1247.
14. Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. *Metal Forming and Finite-Element Method*. New York: Oxford University Press, 1989, 377 p.
15. Matsumia T., Nakamura Y. Mathematical model of slab bulging during continuous casting. In: *Applied Mathematical and Physical Models in Iron and Steel Industry. Proceedings of the 3rd Process Tech. Conf., Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982*. New York, 1982, pp. 264–270.
16. Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in of tubes under tension. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, vol. 210, no. 2, pp. 336–362.
17. Kazakov A.L., Spevak L.F. Numeral and analytical studies of non-linear parabolic equation with boundary conditions of a special form. *Applied Mathematical Modelling*. 2013, vol. 37, no. 10-13, pp. 6918–6928.
18. Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication. In: *High Performance Computing for Computational Science – VECPAR 2012*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, pp. 128–139.
19. Zienkiewicz O.C., Morgan K. *Finite Elements and Approximation*. New York: Wiley, 1983, 328 p. (Russ. ed.: Zienkiewicz O.C., Morgan K. *Konechnye elementy i approksimatsiya*. Moscow: Mir, 1986, 318 p.).
20. *ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0*.

Information about the authors:

O.S. Lekhov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy (MXLehov38@yandex.ru)

A.V. Mikhalev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy (mialex@trubprom.com)

Received March 25, 2019

Revised April 17, 2019

Accepted April 18, 2019

УДК 621.926.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА КУСКОВ ХРУПКОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ДРОБЛЕНИИ В ОДНОВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКЕ С УПОРОМ НА ВАЛКЕ

Никитин А.Г.¹, д.т.н., профессор кафедры «Механика и машиностроение» (nikitin1601@yandex.ru)

Епифанцев Ю.А.¹, к.т.н., доцент кафедры «Механика и машиностроение» (epifantsev42@mail.ru)

Медведева К.С.¹, ведущий инженер (ksuwinchester@mail.ru)

Герике П.Б.², к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории средств механизации (am_besten@mail.ru)

Фастыковский А.Р.¹, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» (omd@sibsiu.ru)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
(650000, Россия, Кемерово, пр. Советский, 18)

Аннотация. Переработка используемых в металлургической промышленности сыпучих материалов для получения необходимых классов крупности требует использования дробильных машин, в том числе и одновалковых. Показателями процесса дробления являются степень и эффективность дробления. Степень дробления оценивается отношением размеров исходного дробимого и получаемого кусков, зависит от величины зазора между валком и неподвижной щекой. В Сибирском государственном индустриальном университете спроектирована, изготовлена и запатентована опытно-экспериментальная установка для проведения исследований процесса дробления. Установка представляет собой одновалковую дробилку с упором на валке. Проведена серия экспериментов по дроблению различных образцов (по форме, размеру и прочности). Описана методика проведения эксперимента и конструкция одновалковой дробилки с упором на валке. Представлены результаты разрушения образцов изотропного материала, изготовленных из цементно-песчанной смеси, правильной (сферической) формы. Образцы из изотропного материала позволяют сравнивать аналитические выводы определения положения плоскости действия максимальных касательных напряжений с экспериментальными данными. Также разрушены образцы из анизотропного материала (на примере ферросплава). Экспериментально определено, что чем больше величина зазора между валком и неподвижной щекой, тем крупнее размер фракции готового продукта и меньше переизмельчение, чем при дроблении такого же куска при меньшем зазоре. При этом степень дробления в одновалковой дробилке с упором на валке не может быть равна 4 и более. Доказано, что разрушение изотропных материалов происходит по плоскости действия максимальных касательных напряжений. Анизотропные материалы разрушаются в зависимости от величины зазора между валком и щекой как по плоскости действия максимальных касательных напряжений, так и по плоскостям наименьшего сопротивления.

Ключевые слова: одновалковая дробилка, кусок, валок, упор, щека, степень дробления, зазор, фракция.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-554-559

ВВЕДЕНИЕ

Многие промышленные производства перерабатывают сыпучие материалы различных классов крупности. Для получения необходимого размера фракции сырья применяются различные агрегаты. Подавляющее большинство подвергаемых измельчению материалов являются хрупкими, поэтому задача решается путем дробления исходных кусков большого размера. При этом должен выдерживаться соответствующий фракционный состав готового продукта, к которому предъявляются жесткие требования, так как переизмельченный продукт в дальнейшем чаще всего не используется, а идет в отвал [1 – 8].

Конструкции существующих дробильных машин и способы дробления имеют ряд существенных недостатков, которые связаны с высокой энергоемкостью,

относительно низкой производительностью процесса дробления и переизмельчением дробимого материала. Перспективным является направление совершенствования конструкций дробильных машин, основанное на реализации способов дробления высокой производительности, генерирующих в разрушаемых кусках сложное напряженное состояние посредством одновременно действующих нормальных и касательных напряжений. Усовершенствование конструкций дробильных машин связывается с уточнением закономерностей процесса разрушения рудных и нерудных материалов, разработкой научных и методологических основ повышения производительности машин с минимальными удельными энергозатратами на дробление, так как удельный расход энергии на единицу получаемой продукции является одним из основных технико-экономических показателей работы дробильных машин.

Для дробления исходного материала в основном используются дробильные машины, в том числе и одновалковые, которые в последнее время получили широкое распространение [9 – 17].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Запатентована разработанная в Сибирском государственном университете конструкция одновалковой дробилки с принудительной подачей разрушаемого материала в зону дробления [18], в которой захват дробимого куска происходит за счет упора, расположенного на валке.

Схема одновалковой дробилки с упором на валке показана на рис. 1. Дробилка работает следующим образом: кусок дробимого материала 1 подается в зазор между приводным вращающимся валком 2 и неподвижной щекой 3, затягивается в него под действием силы трения между валком и дробимым материалом и дробится [19]. Вертикальная составляющая этой силы трения направлена в сторону зазора между валком 2 и неподвижной щекой 3. Однако при увеличении степени дробления (то есть отношения размера $2r$ дробимого куска к величине зазора a между валком и неподвижной щекой) угол захвата α увеличивается и это может привести к тому, что вертикальная составляющая силы трения между валком и дробимым материалом будет направлена в сторону, противоположную от зазора между валком 2 и неподвижной щекой 3, при этом будет происходить проскальзывание куска 1 по поверхности валка 2 без захватывания куска в зону дробления. В этом случае при вращении валка упор 4 рабочей поверхностью соприкасается с куском и начинает давить на кусок: при этом возникает сила, действующая на кусок

и направленная в сторону зазора, кусок материала принудительно подается в зону дробления и дробится [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения фракционного состава раздробленного различного материала с разной степенью дробления была проведена серия экспериментов на исследовательской установке. Опытно-экспериментальная установка (рис. 2) представляет собой одновалковую дробилку с упором на валке с возможностью регулирования зазора между валком и щекой. Установка состоит из рамы; двигателя мощностью 3 кВт, соединенного с редуктором (передаточное отношение $i_p = 15,3$), приводного валка (диаметр валка 180 мм, число оборотов в минуту 100); жесткой вертикальной щеки.

Образцы диам. 40 мм дробили с установленным на дробилке зазором 26, 20, 13 и 10 мм. На рис. 3, а – в приведены результаты влияния степени дробления на фракционный состав готового продукта при разрушении образцов сферической формы из цементно-песчаной смеси (изотропный материал) на одновалковой дробилке с упором на валке.

При дроблении образцов с установленным зазором между вращающимся валком и неподвижной щекой 10 мм разрушение происходит следующим образом: происходит глобальное разрушение образца в точке контакта упора с куском на два фрагмента; после этого нижняя часть образца проваливается под упор, а верхняя, большая часть, переваливается через упор и попадает в следующий карман, при этом нижняя часть дробится упором и полученные фрагменты проваливаются в зазор; затем верхняя часть образца попадает под следующий кусок, аддитивность процесса нарушается, из-за чего происходит сильное переизмельчение фрагмента (рис. 3, г).

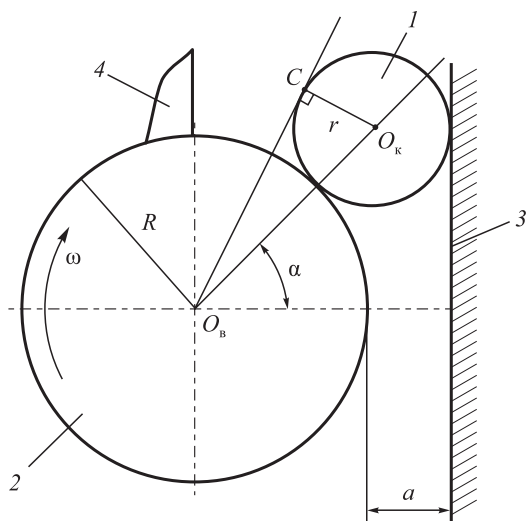


Рис. 1. Схема одновалковой дробилки с упором на валке:
1 – дробимый кусок; 2 – рабочий валок; 3 – неподвижная щека;
4 – упор

Fig. 1. Diagram of a single-roll crusher with a block stop on the roll:
1 – crushed piece; 2 – work roll; 3 – steady jaw; 4 – block stop



Рис. 2. Опытно-экспериментальная установка одновалковой дробильной машины с упором на валке

Fig. 2. Pilot unit of a single-roll crusher with a block stop on the roll

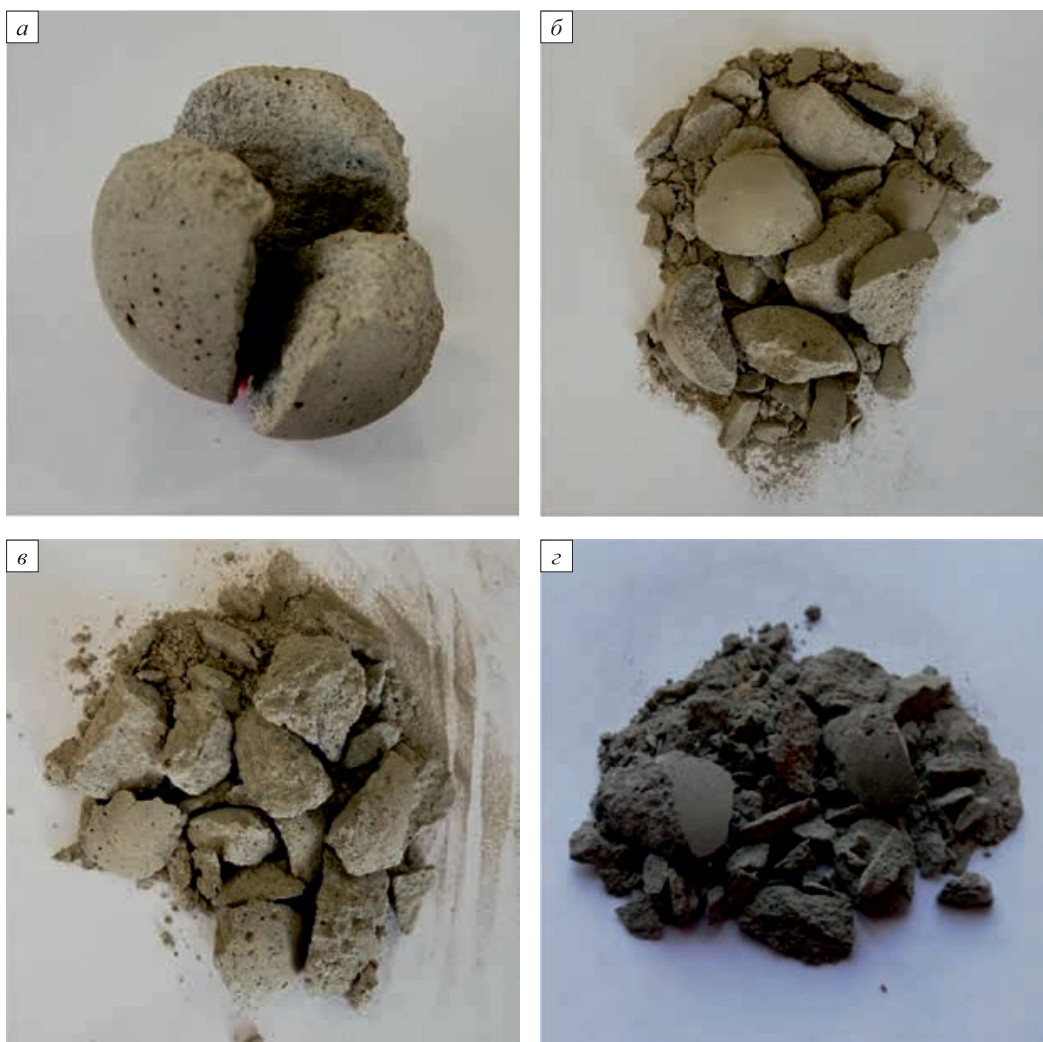


Рис. 3. Разрушение образцов из цементно-песчаной смеси в одновалковой дробилке с упором при степени дробления 1,5 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Fig. 3. Destruction of the samples made of cement-sand mixture in a single-roll crusher with a block stop at crushing degree of 1.5 (a), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Таким образом установлено, что степень дробления в одновалковой дробилке с упором на валке не может быть равна 4 и более.

Из анализа результатов экспериментов можно сделать вывод, что, чем больше величина зазора между валком и неподвижной щекой, тем крупнее размер фракции готового продукта и меньше переизмельчение, чем при дроблении такого же куска при использовании меньшего зазора. Связано это с тем, что чем больше величина зазора, тем меньше степень дробления и меньше количество плоскостей действия максимальных касательных напряжений, по которым происходит разрушение.

Все сказанное выше относилось к разрушению изотропных материалов, то есть материалов, физические свойства которых одинаковы во всех направлениях. Однако дроблению подлежат не только изотропные, но и анизотропные материалы. Необходимо учитывать, что в отличие от изотропных материалов, которые раз-

рушаются в одновалковой дробилке с упором на валке по плоскостям максимальных касательных напряжений, разрушение анизотропных материалов происходит по плоскостям наименьшего сопротивления. В связи с этим были разрушены образцы кубовидной формы со стороной 40 мм из ферросплава (анизотропный материал) (рис. 4).

Эксперименты показали, что при дроблении в одновалковой дробилке с упором на валке как изотропных материалов, так и анизотропных материалов фракционный состав готового продукта практически одинаковый (см. таблицу).

Выводы

Экспериментально определено, что чем больше величина зазора между валком и неподвижной щекой, тем крупнее размер фракции готового продукта и меньше переизмельчение, чем при дроблении такого

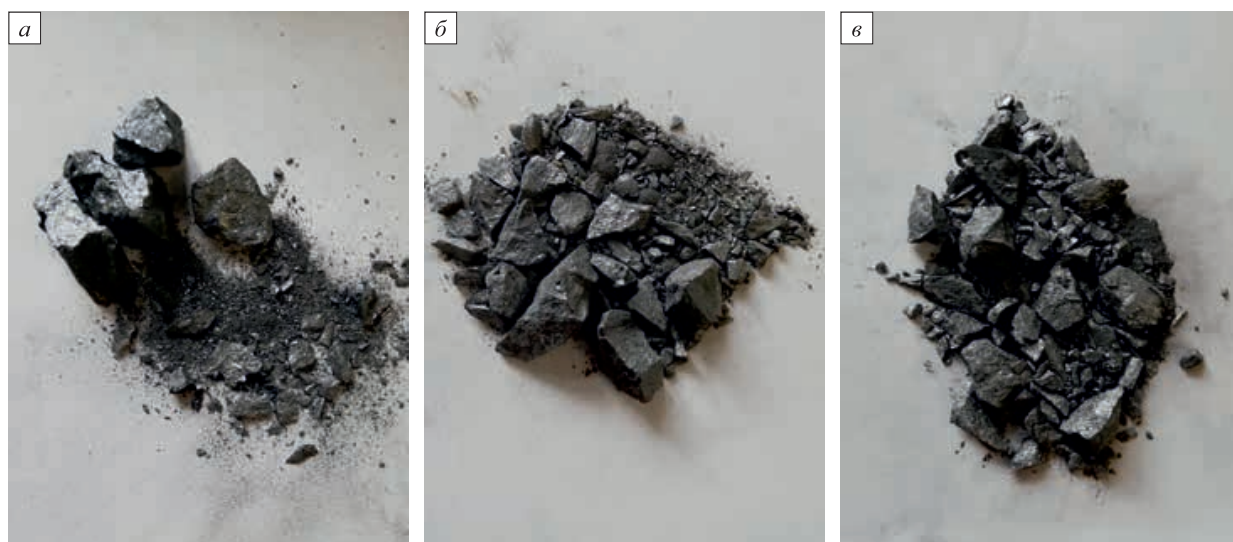


Рис. 4. Разрушение образцов ферросплава в одновалковой дробилке с упором при степени дробления 1,5 (а), 2 (б), 3 (в)

Fig. 4. Destruction of the samples made of ferroalloy in a single-roll crusher with a block stop at crushing degree of 1.5 (a), 2 (b), 3 (c)

Содержание кусков готового продукта

Composition of the finished product

a, мм	Содержание кусков готового продукта, % (по массе), при среднем размере куска, мм			
	менее 3	3 – 10	10 – 16	более 16
образцы из цементно-песчаной смеси				
13	12	25	28	35
20	10	15	30	50
26	–	–	–	100
образцы из ферросплава				
13	18	20	32	30
20	15	18	25	42
26	5	10	35	50

же куска при меньшем зазоре. При этом степень дробления в одновалковой дробилке с упором на валке не может быть равна 4 и более. Доказано, что разрушение изотропных материалов происходит по плоскости действия максимальных касательных напряжений. Анизотропные материалы разрушаются в зависимости от величины зазора между валком и щекой как по плоскости действия максимальных касательных напряжений, так и по плоскостям наименьшего сопротивления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jack de la Vergne. Hard Rock Miner's Handbook. Stantec Consulting. – Edmonton, Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008. – 330 p.
2. Egbe E.A.P., Olugboji O.A. Design, fabrication and testing of a double roll crusher // Int. Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). 2016. Vol. 35. No. 11. P. 511 – 515.
3. Никитин А.Г., Сахаров Д.Ф. Экспериментальное исследование дробления хрупких материалов в одновалковой дробилке // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 6. С. 52.
4. Austin L.G., Van Orden D., McWilliams B., Perez J.W., Shoji K. Breakage parameters of some materials in smooth roll crushers // Powder Technology. 1981. Vol. 28. No. 2. P. 245 – 251.
5. Zhao L.L., Zang F., Wang Z.B. Design and motion simulation for differential and grading toothed roll crusher // Coal Mine Machinery. 2007. Vol. 28. No. 6. P. 19 – 21.
6. Zhao L.L., Wang Z.B., Zang F., Multi-object optimization design for differential and grading toothed roll crusher using a genetic algorithm // Journal of China University of Mining and Technology. 2008. Vol. 18. No. 2. P. 316 – 320.
7. Sajjan Kumar Soni, Satish Chandra Shukla, Gautam Kundu. Modeling of particle breakage in a smooth double roll crusher // Int. Journal of Mineral Processing. 2009. Vol. 90. No. 1-4. P. 97 – 100.
8. Болтенгаден И.Л., Власов В.Н., Клишин В.И. Расчет параметров валкового пресса для дробления кимберлитовой руды // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2003. № 3. С. 61 – 72.
9. Cotabarren I., Schulz P.G., Bucalá V., Piña J. Modeling of an industrial double-roll crusher of a urea granulation circuit // Powder Technology. 2008. Vol. 183. No. 2. P. 224 – 230.
10. Velletri P., Weedon D.M. Comminution in a non-cylindrical roll crusher // Minerals Engineering. 2001. Vol. 14. No. 11. P. 1459 – 1468.
11. Morrell S. Predicting the specific energy required for size reduction of relatively coarse feeds in conventional crushers and high pressure grinding rolls // Minerals Engineering. 2010. Vol. 23. No. 2. P. 151 – 153.
12. Shirong Zhang, Wei Mao. Optimal operation of coal conveying systems assembled with crushers using model predictive control methodology // Applied Energy. 2017. Vol. 198. P. 65 – 76.
13. Schaefer H.U. Loesche vertical roller mills for the comminution of ores and minerals // Minerals Engineering. 2001. Vol. 14. No. 10. P. 1155 – 1160.
14. Lieberwirth H., Hillmann Ph., Hesse M. Dynamics in double roll crushers // Minerals Engineering. 2017. Vol. 103-104. P. 60 – 66.
15. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
16. Масленников В.А. Дробилки, разрушающие материал сжатием // Изв. вуз. Горный журнал. 1996. № 10-11. С. 124 – 138.

17. Клушанцев Б.В. Валковые дробилки. Их параметры и метод расчета мощности // Строительные и дорожные машины. 1982. № 8. С. 23 – 24.
18. Пат. 2603923 РФ. Валковая дробилка / Никитин А.Г., Лактионов С.А., Баженов И.А., Медведева К.С.; заявл. 20.10.2015; опубл. 10.12.2016. Открытия. Изобретения. Бюл. № 34.
19. Никитин А.Г., Сахаров Д.Ф. Анализ сил, действующих на кусок дробимого материала в одновалковой дробилке. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 10. С. 41 – 42.

20. Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Медведева К.С., Герике П.Б. Силовой анализ процесса разрушения хрупких материалов в одновалковой дробильной машине с упором на валке // Изв. вуз. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 4. С. 303 – 307.

Поступила в редакцию 24 декабря 2019 г.

После доработки 28 января 2020 г.

Принята к публикации 7 февраля 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 7, pp. 554–559.

EXPERIMENTAL STUDY OF FRACTIONAL COMPOSITION OF PIECES OF BRITTLE MATERIAL DURING CRUSHING IN A SINGLE-ROLL CRUSHER WITH BLOCK STOP ON THE ROLL

**A.G. Nikitin¹, Yu.A. Epifantsev¹, K.S. Medvedeva¹,
P.B. Gerike², A.R. Fastyskovskii¹**

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, Russia

²Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of SB RAS, Russia, Kemerovo Region – Kuzbass, Kemerovo

Abstract. Processing of bulk materials used in metallurgical industry to obtain necessary grades of size requires application of crushing machines, including a single-roll type. Indicators of crushing process are degree and efficiency of crushing. Degree of crushing is estimated by the ratio of size of initial crushed and resulting pieces, which depends on size of the gap between a roll and a fixed jaw. The Siberian State Industrial University has patented, designed and manufactured a pilot unit, which is a single-roll crusher with block stop on the roll to study crushing process. A series of experiments on different samples (in shape, size and strength) crushing was carried out on the developed unit. Technique of the experiment and the design of a single-roll crusher with block stop on the roll were described. Results of destruction of the samples of isotropic material made of sand-cement mixture of regular (spherical) shape are presented. Samples from isotropic material allow comparison of analytical conclusions of determining position of the plane of action of maximum tangential stresses with experimental data. Samples of anisotropic material (for example, ferroalloy) were also destroyed. It was experimentally determined that the larger is clearance between the roll and the fixed jaw, the larger is the size of fraction of finished product and over-grinding is less than after crushing the same piece with a smaller clearance. The degree of crushing in a single-roll crusher with block stop on the roll cannot be equal to 4 or more. It was proved that destruction of isotropic materials occurs along the plane of action of maximum tangential stresses. Anisotropic materials are destroyed, depending on size of clearance between a roll and a jaw, both on the plane of action of the maximum tangential stresses and on the planes of least resistance.

Keywords: single-roll crusher, piece, roll, stop, jaw, crushing degree, clearance, fraction.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-554-559

REFERENCES

1. Jack de la Vergne. *Hard Rock Miner's Handbook*. Edmonton, Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008, 330 p.
2. Egbe E.A.P., Olugboji O.A. Design, fabrication and testing of a double roll crusher. *Int. Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2016, vol. 35, no. 11, pp. 511–515.
3. Nikitin A.G., Sakharov D.F. Experimental study of brittle materials breaking in a single-roll crusher. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 6, pp. 53. (In Russ.).
4. Austin L.G., Van Orden D., McWilliams B., Perez J.W., Shoji K. Breakage parameters of some materials in smooth roll crushers. *Powder Technology*. 1981, vol. 28, no. 2, pp. 245–251.
5. Zhao L.L., Zang F., Wang Z.B. Design and motion simulation for differential and grading toothed roll crusher. *Coal Mine Machinery*. 2007, vol. 28, no. 6, pp. 19–21.
6. Zhao L.L., Wang Z.B., Zang F. Multi-object optimization design for differential and grading toothed roll crusher using a genetic algorithm. *Journal of China University of Mining and Technology*. 2008, vol. 18, no. 2, pp. 316–320.
7. Sajjan Kumar Soni, Satish Chandra Shukla, Gautam Kundu. Modeling of particle breakage in a smooth double roll crusher. *Int. Journal of Mineral Processing*. 2009, vol. 90, no. 1–4, pp. 97–100.
8. Boltengagen I.L., Vlasov V.N., Klishin V.I. Calculation of roller-press parameters for kimberlite ore crushing. *Journal of Mining Science*. 2003, vol. 39, no. 3, pp. 260–270.
9. Cotabarren I., Schulz P.G., Bucalá V., Piña J. Modeling of an industrial double-roll crusher of a urea granulation circuit. *Powder Technology*. 2008, vol. 183, no. 2, pp. 224–230.
10. Velletri P., Weedon D.M. Commminution in a non-cylindrical roll crusher. *Minerals Engineering*. 2001, vol. 14, no. 11, pp. 1459–1468.
11. Morrell S. Predicting the specific energy required for size reduction of relatively coarse feeds in conventional crushers and high pressure grinding rolls. *Minerals Engineering*. 2010, vol. 23, no. 2, pp. 151–153.
12. Shirong Zhang, Wei Mao. Optimal operation of coal conveying systems assembled with crushers using model predictive control methodology. *Applied Energy*. 2017, vol. 198, pp. 65–76.
13. Schaefer H.U. Loesche vertical roller mills for the comminution of ores and minerals. *Minerals Engineering*. 2001, vol. 14, no. 10, pp. 1155–1160.
14. Lieberwirth H., Hillmann Ph., Hesse M. Dynamics in double roll crushers. *Minerals Engineering*. 2017, vol. 103–104, pp. 60–66.
15. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. *Drobilki* [Crushers]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 320 p. (In Russ.).
16. Maslennikov V.A. Compressive crushers. *Izv. vuz. Gornyi zhurnal*. 1996, no. 10–11, pp. 124–138. (In Russ.).
17. Klushantsev B.V. Roll crushers. Their parameters and power calculation method. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 1982, no. 8, pp. 23–24. (In Russ.).
18. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Bazhenov I.A., Medvedeva K.S. *Valkovaya drobilka* [Roller crusher]. Patent RF no. 2603923. *Byulleten' izobretenii*. 2016, no. 34. (In Russ.).
19. Nikitin A.G., Sakharov D.F. Analysis of forces acting on material piece at breaking in single-roll crusher. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 10, pp. 41–42. (In Russ.).
20. Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Medvedeva K.S., Gerike P.B. Power analysis of the process of brittle materials destruction in univer-

sal crushing machine with roll locke. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 4, pp. 303–307. (In Russ.).

Information about the authors:

A.G. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Mechanics and Machine Engineering (nikitin1601@yandex.ru)

Yu.A. Epifantsev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Mechanics and Mechanical Engineering (epifantsev42@mail.ru)

K.S. Medvedeva, Leading Engineer (ksuwinchester@mail.ru)

P.B. Gerike, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Means of Mechanization (am_besten@mail.ru)

A.R. Fastyskovskii, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair “Metal Forming and Metal Science. OJSC “EVRAZ ZSMK” (omd@sibsiu.ru)

Received December 14, 2020

Revised January 28, 2020

Accepted February 7, 2020

УДК 669.053.2

СЕЛЕКТИВНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗА И ФОСФОРА ИЗ ООЛИТОВОЙ РУДЫ

Салихов С.П., к.т.н., доцент кафедры пиromеталлургических процессов (salikhovsp@susu.ru)

Сулеймен Б., аспирант кафедры пиromеталлургических процессов (bakysuleimen@mail.ru)

Роцин В.Е., д.т.н., профессор кафедры пиromеталлургических процессов (oshchinve@susu.ru)

Южно-Уральский государственный университет
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 76)

Аннотация. Экспериментально подтверждена возможность селективного твердофазного восстановления железа из оолитовой руды. Твердофазное восстановление проводили при температурах 850 и 1000 °С в атмосфере оксида углерода СО и в смеси с твердым углеродом. Распределение железа и фосфора исследовано с помощью электронного сканирующего микроскопа. Установлено, что при температуре 1000 °С минимальное количество фосфора (до 0,3 %) переходит в металлическую фазу при восстановлении оксидом углерода СО. При восстановлении в смеси руды с углеродом содержание фосфора в металлической фазе достигает 1,0 – 1,3 % даже при 850 °С. Проведено термодинамическое моделирование процессов при восстановительном обжиге оолитовой руды в зависимости от температуры (1000 – 1400 К) и количества углерода в системе. Показано, что температура восстановления и степень восстановления фосфора меняются в зависимости от соотношения СО и СО₂ в газовой фазе. При температуре меньше 892 °С фосфор не восстанавливается, а все железо находится в металлической фазе. С увеличением количества углерода в системе в металлической фазе появляется фосфор. При избытке углерода в системе весь фосфор находится в металлической фазе уже при 892 °С. Таким образом, при определенном количестве углерода в системе и, соответственно, при определенном соотношении СО и СО₂ в составе газовой фазы возможно селективное восстановление железа без восстановления фосфора даже при температуре 1100 °С. Сравнение экспериментальных результатов с результатами термодинамического расчета подтверждает возможность селективного восстановления железа без восстановления фосфора только оксидом углерода СО.

Ключевые слова: оолитовая руда, селективное восстановление, металлизация, восстановление фосфора, степень восстановления, температура восстановления, термодинамическое моделирование.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-560-567

ВВЕДЕНИЕ

Разработка технологии извлечения железа из оолитовых фосфористых руд является актуальной задачей в связи с их колоссальными мировыми запасами [1]. Так, в Казахстане имеются Лисаковское (1,6 млрд т) и Айтское (более 10 млрд т) месторождения [2, 3]. В Китае разведанные запасы оолитовых руд составляют примерно 10 % от общих запасов железной руды [4]. Одним из крупнейших месторождений железной руды в России и мире является Бакчарское (28,7 млрд т) [5].

Генезис большинства таких руд обуславливает высокое (до 0,9 % и более (по массе)) содержание фосфора в оолитах. В условиях доменной плавки фосфор практически полностью переходит в чугун. Удаление фосфора из чугуна в ковшах или в сталеплавильных агрегатах требует повышенного расхода материалов, времени. Существующими стандартами верхний предел содержания фосфора в железорудном концентрате для передела руд в доменной печи ограничен 0,3 % (по массе) [1 – 5].

Известно несколько способов обесфосфоривания оолитовой руды и ее концентрата, основанных на физических, химических и комбинированных методах воздействия на частицы рудного материала оолитового

строения. Предлагаются способы обогащения оолитовых руд путем восстановительного обжига с получением концентратов и их последующего магнитного разделения [6, 7]. Но при восстановительном обжиге фосфор переходит в металлическую фазу, а при последующем магнитном разделении попадает в магнитную фракцию [8]. Поэтому удалить фосфор из концентрата этими методами обогащения не удастся.

В работах [9, 10] представлены результаты исследований процесса магнетизирующего обжига фосфористой оолитовой руды в смеси с различными добавками, влияющими на распределение фосфора между металлической и оксидной фазами. Однако такие методы требуют использования дополнительных материалов, которые увеличивают стоимость обработки. Кроме того, добавки не всегда положительно влияют на процесс металлизации, и, в конечном счете, приводят к значимым результатам только на лабораторном уровне.

Помимо пиromеталлургических способов известны гидрометаллургические процессы обесфосфоривания оолитовых руд [11, 12]. Предлагаются также совмещенные пиро-гидрометаллургические способы переработки [13]. Однако использование химических реагентов для отделения фосфора гидрометаллургическими процессами экологически неблагоприятно и экономически

невыгодно. Предлагаются даже биологические методы воздействия на частицы рудного материала оолитового строения [14].

Все рассмотренные способы удаления фосфора из железорудного сырья по отмеченным выше причинам пока не получили практического применения. Между тем в работе [15] приведены экспериментальные результаты относительно успешного селективного восстановления железа при косвенном восстановлении газообразными восстановителями. Такие процессы могут быть использованы при разработке технологии переработки оолитовых высокофосфористых руд в агрегатах бескоксовой металлургии. В работе [16] выполнен термодинамический анализ карботермического восстановления железа и фосфора в высокофосфористой оолитовой железной руде, однако результаты анализа не позволяют оценить влияние состава газовой фазы на металлизацию. Именно поэтому целесообразно провести экспериментальное исследование и термодинамический анализ селективного восстановления железа и фосфора в оолитовых рудах.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование и термодинамическое моделирование условий селективного восстановления железа и фосфора при твердофазной металлизации оолитовой руды.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исходных образцов использовали руду Аятского месторождения (Республика Казахстан) следующего состава [1], % (по массе): Fe – 37,1; Mn – 0,88; P – 0,37; S – 0,35; SiO₂ – 16,4; Al₂O₃ – 8,6; CaO – 1,6; MgO – 0,8; п.п.п. – 17,3. Руда представляет собой порошкообразный материал из частиц размером менее 1 мм.

Восстановительный обжиг проводили в закрытой печи сопротивления с графитовым нагревателем (печи Таммана) без контроля состава газовой фазы рабочего пространства. Но использование в печи графитового нагревателя гарантировало наличие в объеме рабочего пространства печи восстановительной атмосферы, состоящей из азота и оксида углерода CO. В рабочее пространство печи устанавливали два корундовых тигля с рудой, в одном из которых руда была смешана с измельченным графитом из отходов графитированных электродов. Благодаря этому железо и фосфор восстанавливали в одном тигле газообразным оксидом углерода CO атмосферы печи, а в другом – одновременно газообразным оксидом углерода CO и твердым углеродом. Печь нагревали до требуемой температуры (850 и 1000 °C) и выдерживали в течение 3 ч. После выдержки печь отключали, образцы охлаждали вместе с печью до комнатной температуры.

После экспериментов образцы делили на магнитную и немагнитную части. Магнитную часть заливали эпоксидной смолой, после шлифовки исследовали с помощью электронного сканирующего микроскопа. Хи-

мический состав фаз определяли микрорентгеноспектральным методом.

С учетом полученных экспериментальных данных провели термодинамический анализ процесса восстановления. Моделирование проводили с использованием программы ТЕРРА [17, 18]. Для проведения расчета пересчитывали исходный состав руды с учетом максимальной степени окисленности железа и марганца после обжига, а также с учетом отсутствия в прокаленной руде потерь при прокаливании, % (по массе): Fe₂O₃ – 65,64; Mn₂O₃ – 1,47; P – 0,43; S – 0,41; SiO₂ – 19,18; Al₂O₃ – 10,06; CaO – 1,87; MgO – 0,94. Расчет проведен на 100 г обожженной руды.

Для выполнения расчетов в базу данных термохимических констант веществ программы ТЕРРА были введены недостающие данные для фосфида железа Fe₃P. Использованные в расчете данные: $\Delta_f H_{298}^\circ = -172,41$ кДж; $S_{298}^\circ = 114,22$ Дж/моль·К; уравнение теплоемкости $C_p = 117,11 + 13,067T \cdot 10^{-3} - 17,78T^{-2} \cdot 10^5$ в интервале температуры 298 – 1439 К [19, 20]. Величину изменения стандартной энтальпии $H_{298}^\circ - H_0^\circ$ рассчитали, исходя из допущения линейной зависимости теплоемкости от температуры в интервале значений температуры 0 – 298 К, в результате получили $H_{298}^\circ - H_0^\circ = 15\,076$ Дж/моль·К.

Расчет процесса восстановления выполнили для интервала температуры 1000 – 1400 К. В качестве восстановителя при термодинамическом моделировании использовали углерод, количество которого в системе согласно предварительным расчетам должно быть в интервале 14,05 – 14,64 г на 100 г руды.

Состав фаз выбран с учетом полученных экспериментальных данных. В металлической фазе согласно результатам проведенных экспериментов отсутствует карбид железа, поэтому при термодинамическом моделировании карбид железа не учитывали. Принятый в расчетах состав оксидной фазы соответствует существующим в программе соединениям.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что даже при температуре 850 °C в образцах руды восстанавливаются и железо, и фосфор (рис. 1). Содержание элементов после восстановительного обжига при температуре 850 °C приведено ниже:

Участок анализа	Содержание, % (ат.)				
	O	Al	Si	P	Fe
1a	–	–	–	1,0	99,0
2a	–	–	–	1,3	98,7
3a	57,4	9,7	15,8	1,0	16,2
4a	45,2	11,4	18,1	0,1	25,2
1б	59,9	0,8	5,5	0,4	33,4
2б	–	–	–	0,2	99,8
3б	59,5	2,4	4,0	0,8	33,4

В металлической фазе образца руды, смешанного с порошком графита, содержание фосфора составляет 1,0–1,3 % (ат.) (рис. 1, спектры 1а и 2а), что значительно больше, чем при восстановлении в атмосфере оксида углерода CO (рис. 1, спектр 2б). Однако восстановление в этих условиях неполное, так как железо и фосфор присутствуют и в оксидной фазе.

При температуре 850 °С и восстановлении оксидом углерода CO металлическая фаза выделилась не во всех оолитовых структурах. В одной оолитовой структуре железо и фосфор находятся в оксидной фазе (рис. 1, спектры 1б и 3б), в другой – часть железа и фосфора находятся в металлической фазе (рис. 1, спектр 2б).

При температуре 1000 °С восстановление железа углеродом и оксидом углерода CO происходит во всех образцах. На рис. 2 видно, что при контакте с твердым углеродом железо практически полностью восстановлено, а в оксидной фазе железо осталось в количестве 8,2 % (ат.) (рис. 2, а). В образцах, выдержанных только

в атмосфере оксида углерода CO, восстановленное железо также занимает основную часть площади, но количество остаточной оксидной фазы больше, чем в образцах, контактировавших с твердым углеродом (рис. 2, б).

Содержание элементов после восстановительного обжига при температуре 1000 °С приведено ниже:

Участок анализа	Содержание, % (ат.)				
	O	Al	Si	P	Fe
1а	–	–	–	1,5	98,5
2а	64,6	15,3	10,9	0,9	8,2
1б	–	–	–	0,1	99,9
2б	60,8	12,2	5,8	0,3	19,9

При восстановлении только газообразным оксидом углерода CO содержание фосфора в металле меньше по сравнению с восстановлением твердым углеродом (спектры 1а и 2а). В то же время в оксидной фазе при

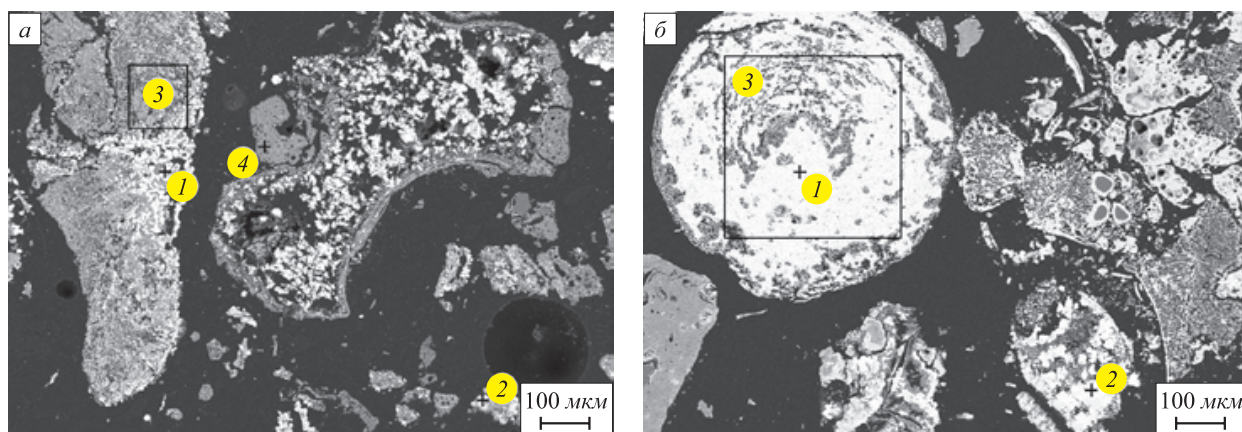


Рис. 1. Участки и точки анализа руды после восстановительного обжига при температуре 850 °С в контакте с графитом (а) и в атмосфере оксида углерода CO (б)

Fig. 1. Sections and points of analysis of the ore after reduction roasting at temperature of 850 °С in contact with graphite (а) and in atmosphere of CO (б)

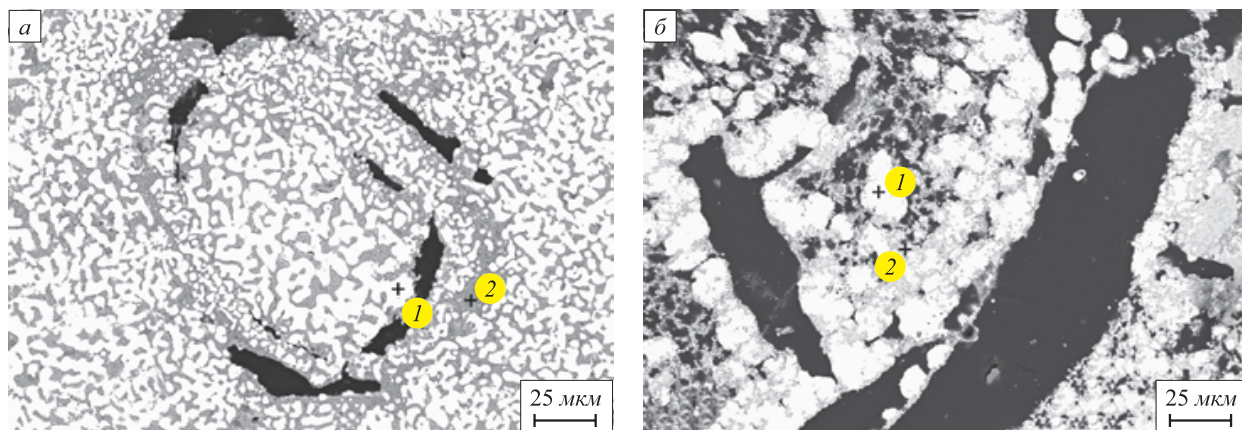


Рис. 2. Участки руды после восстановительного обжига при температуре 1000 °С в контакте с графитом (а) и в атмосфере оксида углерода CO (б)

Fig. 2. Ore sections after reduction roasting at temperature of 1000 °С in contact with graphite (а) and in atmosphere of CO (б)

восстановлении в атмосфере CO содержание железа выше (спектр 2б), чем при восстановлении твердым углеродом (спектр 2а).

Таким образом, результаты термодинамического моделирования в общем согласуются с экспериментальными данными. При термодинамическом моделировании восстановителем считали углерод, источником которого в экспериментах являлся графит. В расчетах принято количество углерода в моделируемой системе в интервале 14,05 – 14,64 г на 100 г руды. При меньшем количестве углерода в заданном интервале температуры 1000 – 1400 К фосфор не восстанавливается, при большем количестве весь фосфор находится в металле уже при температуре 892 °С. Следовательно, в принятом интервале температуры возможно селективное разделение фосфора и железа. При меньшей температуре железо имеет низкую степень восстановления, а фосфор не восстанавливается. При температуре более 1400 К фосфор восстанавливается полностью и селективного восстановления не происходит.

При количестве углерода 14,05 г на 100 г руды в моделируемой системе в исследуемом интервале температур существуют элементы и соединения: C, CO, CO₂, SiO₂, Al₂O₃, Fe, MnO, MnS, MgO·SiO₂, 3(CaO)·P₂O₅, CaO·SiO₂. При этом все железо находится в металлической фазе, а весь фосфор – в составе оксидной фазы в виде соединения 3(CaO)·P₂O₅.

Фосфор появляется в металлической фазе при увеличении количества углерода в системе. Влияние массы углерода на температуру восстановления фосфора в интервале 14,05 – 14,24 г на 100 г руды показано на рис. 3.

В моделируемой системе при массе углерода 14,14 г на 100 г руды доля ряда оксидных соединений руды не изменяется, поэтому на рис. 4 представлены лишь соединения, массовая доля которых изменяется при увеличении температуры. С увеличением температуры в системе уменьшается доля углерода и оксида углерода CO₂, вследствие чего растет массовая доля оксида CO. При таком количестве углерода в системе фосфид железа Fe₃P появляется при температуре 1279 К. С по-

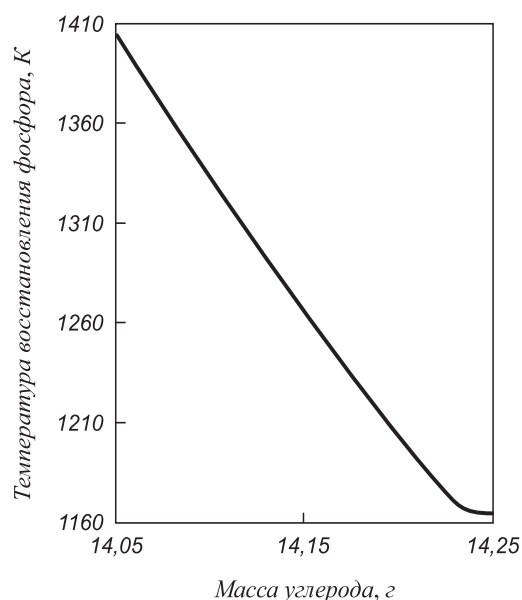


Рис. 3. Влияние массы углерода на температуру восстановления фосфора

Fig. 3. Effect of carbon mass on temperature of phosphorus reduction

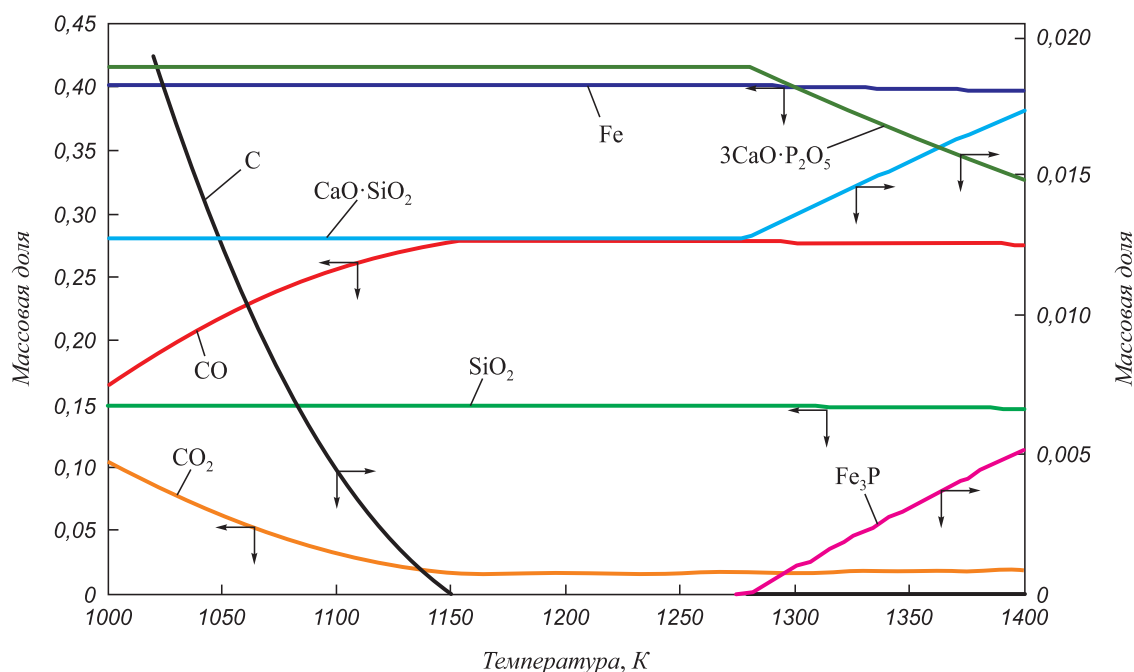


Рис. 4. Изменения в моделируемой системе при массе углерода 14,14 г на 100 г руды

Fig. 4. Changes in simulated system at carbon mass of 14.14 g per 100 g of ore

вышением температуры количество фосфида в системе увеличивается, но фосфор восстанавливается все же не полностью. При этом, естественно, уменьшается содержание $3(\text{CaO}) \cdot \text{P}_2\text{O}_5$, а высвобождающийся оксид кальция взаимодействует с оксидом кремния с образованием соединения $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$.

В интервале содержания углерода 14,24 – 14,64 г на 100 г руды температура восстановления не изменяется, а изменяется лишь степень восстановления фосфора в зависимости от температуры.

Степень α_p восстановления фосфора рассчитывали по формуле:

$$\alpha_p = \frac{m_{\text{P}_{[\text{Fe}_3\text{P}]}}}{m_{\text{P}_{[\text{Fe}_3\text{P}]}} + m_{\text{P}_{(\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8)}}},$$

где $m_{\text{P}_{[\text{Fe}_3\text{P}]}}$ и $m_{\text{P}_{(\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8)}}$ – масса фосфора в соединении Fe_3P и $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$.

Влияние массы углерода в интервале его содержания 14,24 – 14,64 г на 100 г руды на степень восстановления фосфора показано в таблице: с увеличением массы углерода в системе степень восстановления фосфора растет. При этом отношение объемных долей

оксидов CO к CO_2 не меняется, пока степень восстановления фосфора не достигает 100 %. Соотношение CO/CO_2 (см. таблицу) рассчитано, исходя из данных о составе газовой фазы в объемных долях.

Изменение массовых долей компонентов при массе углерода 14,5 г на 100 г руды в зависимости от температуры представлено на рис. 5. Температура начала восстановления фосфора при таком количестве углерода составляет 1165 К, при этом в системе появляется фосфид железа. С увеличением температуры степень восстановления фосфора растет (см. таблицу). При температуре 1200 К степень восстановления составляет 81,44 %, при 1300 К достигает 95,75 %; при температуре 1340 К весь фосфор переходит в металлическую фазу. В результате восстановления фосфора снижается массовая доля железа, а также высвобождается оксид кальция, который связывается с оксидом кремния SiO_2 .

Согласно результатам термодинамического расчета при наличии углерода в системе более 14,62 г на 100 г руды весь фосфор находится в металлической фазе при температуре 1165 К.

Влияние массы углерода на степень α_p восстановления фосфора и состав газовой фазы системы при содержании углерода 14,24 – 14,64 г на 100 г руды

Effect of carbon mass on α_p degree of phosphorus reduction and composition of gas phase of the system at carbon content of 14.24 – 14.64 g per 100 g of ore

Масса углерода, г	α_p при температуре, К			CO/CO_2 при температуре, К		
	1200	1300	1400	1200	1300	1400
14,24	13,89	38,71	57,61	30,06	25,40	22,22
14,26	20,70	44,33	62,42	30,06	25,40	22,22
14,28	27,16	49,70	67,01	30,06	25,40	22,22
14,30	33,30	54,83	71,42	30,06	25,40	22,22
14,32	39,15	59,73	75,65	30,06	25,40	22,22
14,34	44,73	64,42	79,70	30,06	25,40	22,22
14,36	50,05	68,92	83,60	30,06	25,40	22,22
14,38	55,13	73,22	87,35	30,06	25,40	22,22
14,40	60,00	77,36	90,95	30,06	25,40	22,22
14,42	64,65	81,33	94,43	30,06	25,40	22,22
14,44	69,11	85,14	97,77	30,06	25,40	22,22
14,46	73,39	88,81	100,00	30,06	25,40	22,47
14,48	77,49	92,35	100,00	30,06	25,40	23,29
14,50	81,44	95,75	100,00	30,06	25,40	24,17
14,52	85,23	99,03	100,00	30,06	25,40	25,11
14,54	88,88	100,00	100,00	30,06	26,11	26,12
14,56	92,39	100,00	100,00	30,06	27,20	27,21
14,58	95,77	100,00	100,00	30,06	28,38	28,38
14,60	99,03	100,00	100,00	30,06	29,65	29,66
14,62	100,00	100,00	100,00	31,03	31,04	31,05
14,64	100,00	100,00	100,00	32,55	32,55	32,56

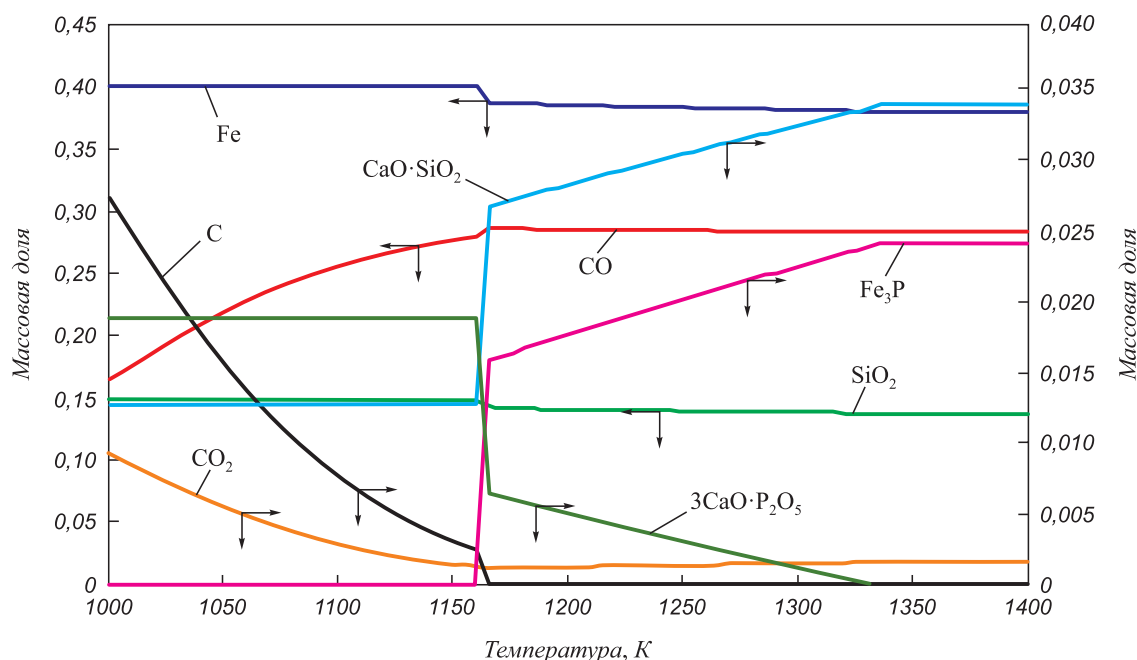


Рис. 5. Изменения в моделируемой системе при массе углерода 14,5 г на 100 г руды

Fig. 5. Changes in simulated system at carbon mass of 14.5 g per 100 g of ore

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальные результаты твердофазного восстановления показали, что уже при температуре 850 °С в металлической фазе обнаруживаются и железо, и фосфор. При восстановлении твердым углеродом содержание фосфора в металлической фазе выше по сравнению с восстановлением только оксидом СО. При повышении температуры до 1000 °С площадь, занимаемая на шлифе металлическим железом, увеличивается как при контакте руды с твердым углеродом, так и только в атмосфере оксида СО. При температуре 1000 °С и восстановлении оксидом углерода СО в металле удастся получить минимальное (порядка 0,1 % (ат.)) содержание фосфора, в то время как при восстановлении твердым углеродом содержание фосфора находится на уровне примерно 1,5 % (ат.). Поэтому из результатов экспериментов следует сделать вывод, что в атмосфере СО можно селективно восстановить железо и получить металл с минимальным содержанием фосфора.

Согласно результатам термодинамического моделирования железо при наличии в системе достаточного количества углерода в интервале температуры 1000 – 1400 К переходит в металлическое состояние. Фосфор в зависимости от количества углерода и от температуры может быть в виде Fe_3P в металлической фазе или в виде $3(\text{CaO})\cdot\text{P}_2\text{O}_5$ в оксидной фазе. При массе углерода 14,05 – 14,24 г на 100 г руды температура восстановления фосфора понижается с 1405 до 1165 К. При меньшей температуре фосфор не восстанавливается даже при избытке углерода в системе. При массе

углерода в системе 14,24 – 14,62 г на 100 г руды степень восстановления фосфора возрастает. При избытке углерода в системе весь фосфор уже при температуре 1165 К будет находиться в металлической фазе.

Таким образом, согласно результатам термодинамического расчета селективное восстановление железа может быть реализовано при восстановлении газообразным оксидом углерода и точно заданном составе газовой фазы даже при относительно высоких (до 1405 К) значениях температуры.

Выводы

При восстановлении железа из оолитовой руды при контакте с твердым углеродом содержание фосфора достигает 1,5 % (ат.) уже при температуре 850 °С. Но в атмосфере оксида углерода СО получено относительно небольшое (до 0,3 % (ат.)) содержание фосфора в металле при температуре 1000 °С и выдержке в течение 3 ч. Согласно термодинамическому расчету металлическая фаза без фосфора может быть получена и при температуре 1132 °С, но только при точно заданном количестве углерода в системе 14,05 г на 100 г руды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Metallurgiya chuguna / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев и др.; под ред Ю.С. Юсфина. – М.: Metallurgiya, 1978. – 480 с.
2. Мирко В.А., Кабанов Ю., Найденов В. Современное состояние развития месторождений бурых железняков Казахстана // Промышленность Казахстана. 2002. № 1. С. 79 – 82.
3. Смирнов Л.А., Бабенко А.А. Вовлечение в производство Лисаковского концентрата – одно из направлений расширения же-

- лезорудной базы Урала и Сибири. – В кн.: Матер. Междунар. конгр. «300 лет Уральской металлургии». – Екатеринбург: изд. Уральского университета, 2001. С. 48 – 49.
4. Cao Y.Y., Zhang Y.R., Sun T.C. Dephosphorization behavior of high-phosphorus oolitic hematite-solid waste containing carbon briquettes during the process of direct reduction-magnetic separation // *Metals*. 2018. Vol. 11. No. 8. Article 897.
 5. Тигунов Л.П., Ануфриева С.И., Броницкая Е.С., Кривоконова Г.К., Соколова В.Н., Аликберов В.М., Сладкова Г.А., Файнштейн Г.Г., Паровинчак М.С. Современные технологические решения переработки железосодержащих руд Бакчарского месторождения // *Разведка и охрана недр*. 2010. № 2. С. 37 – 43.
 6. Li K., Ni W., Zhu M., Zheng M., Li Y. Iron extraction from oolitic iron ore by a deep reduction process // *Journal of Iron and Steel Research Int.* 2011. Vol. 18. No. 8. P. 9 – 13.
 7. Yu Y.F., Qi C.Y. Magnetizing roasting mechanism and effective ore dressing process for oolitic hematite ore // *Journal of Wuhan University of Technology: Material Science*. 2011. Vol. 26. No. 2. P. 177 – 182.
 8. Sun Y.S., Han Y.X., Gao P., Wang Z.H., Ren D.Z. Recovery of iron from high phosphorus oolitic iron ore using coal-based reduction followed by magnetic separation // *Int. Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2013. Vol. 20. No. 5. P. 411 – 419.
 9. Xu C.Y., Sun T.C., Kou J., Li Y.L., Mo X.L., Tang L.G. Mechanism of phosphorus removal in beneficiation of high phosphorous oolitic hematite by direct reduction roasting with dephosphorization agent // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2012. Vol. 22. No. 11. P. 2806 – 2812.
 10. Li G.H., Zhang S.H., Rao M.J., Zhang Y.B., Jiang T. Effects of sodium salts on reduction roasting and Fe–P separation of high-phosphorus oolitic hematite ore // *Int. Journal of Mineral Processing*. 2013. Vol. 124. P. 26 – 34.
 11. Карелин В.Г., Зайнуллин Л.А., Епишин А.Ю., Артов Д.А. Особенности пиро-, гидрометаллургической технологии обесфосфоривания бурого железняка Лисаковского месторождения // *Сталь*. 2015. № 3. С. 8 – 11.
 12. Wang H.H., Li G.Q., Zhao D., Ma J.H., Yang J. Dephosphorization of high phosphorus oolitic hematite by acid leaching and the leaching kinetics // *Hydrometallurgy*. 2017. Vol. 171. P. 61 – 68.
 13. Jin Y., Jiang T., Yang Y., Li Q., Li G., Guo Y. Removal of phosphorus from iron ores by chemical leaching // *Journal of Central South University of Technology*. 2006. Vol. 13. No. 6. P. 673 – 677.
 14. Wang J., Shen S., Kang J., Li H., Guo Z. Effect of ore solid concentration on the bioleaching of phosphorus from high-phosphorus iron ores using indigenous sulfur-oxidizing bacteria from municipal wastewater // *Process Biochemistry*. 2010. Vol. 45. No. 10. P. 1624 – 1631.
 15. Tang H., Guo Z., Zhao Z. Phosphorus removal of high phosphorus iron ore by gas-based reduction and melt separation // *Journal of Iron and Steel Research, Int.* 2010. Vol. 17. No. 9. P. 1 – 6.
 16. Yu W., Tang Q., Chen J., Sun T. Thermodynamic analysis of the carbothermic reduction of a high-phosphorus oolitic iron ore by FactSage // *Int. Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2016. Vol. 23. No. 10. P. 1126 – 1132.
 17. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. – М.: Металлургия, 1994. – 352 с.
 18. Гамов П.А., Мальков Н.В., Рошин В.Е. Термодинамическое моделирование процесса восстановления металлов из титаномагнетитовых концентратов Суроямского месторождения // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия*. 2018. Т. 18. № 2. С. 21 – 28.
 19. Okamoto H. The Fe-P (iron-phosphorus) system // *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*. 1990. Vol. 11. No. 4. P. 404 – 412.
 20. Кубашевский О., Олкок С.Б. Металлургическая термехимия / Пер с англ. – М: Металлургия, 1982. – 392 с.

Поступила в редакцию 13 декабря 2019 г.

После доработки 24 января 2020 г.

Принята к публикации 24 января 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 7, pp. 560–567.

SELECTIVE REDUCTION OF IRON AND PHOSPHORUS FROM OOLITIC ORE

S.P. Salikhov, B. Suleimen, V.E. Roshchin

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Possibility of selective solid-phase reduction of iron from oolitic ore has been experimentally confirmed. Solid phase reduction was carried out at temperatures of 850 and 1000 °C in CO atmosphere and in the mixture with solid carbon. Distribution of iron and phosphorus was investigated with scanning electron microscope. It was found that at temperature of 1000 °C minimum amount of phosphorus (up to 0.3 %) is transformed into the metallic phase at reduction by carbon monoxide. Upon reduction in mixture of ore with carbon, phosphorus content in metal phase reaches 1.0 – 1.3 % even at temperature of 850 °C. Thermodynamic modeling of the processes occurring during reductive roasting of oolitic ore was carried out depending on temperature (1000 – 1400 K) and amount of carbon in the system. It is shown that reduction temperature and degree of phosphorus reduction vary depending on ratio of CO and CO₂ in the gas phase. At temperatures below 892 °C, phosphorus is not reduced and all iron is in metal phase. With an increase in amount of carbon in the system, phosphorus appears in metal phase. With an excess of carbon in the system, all phosphorus is in metal phase at temperature of 892 °C. Thus, with a certain amount of carbon in the system and, correspondingly, with a certain ratio of CO and CO₂ in gas phase, selective reduction of iron is possible without phosphorus reduction even at temperature of 1100 °C. Comparison of experimental results with results of thermodynamic calculation confirms possibility of se-

lective reduction of iron without phosphorus reduction only by carbon monoxide.

Keywords: oolitic ore, selective reduction, metallization, phosphorus reduction, reduction degree, reduction temperature, thermodynamic modeling.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-560-567

REFERENCES

1. Vegman E.F., Zharebin B.N., Pokhvisnev A.N., Yusfin Yu.S., Kurunov I.F., Paren'kov A.E., Chernousov P.I. *Metallurgiya chuguna* [Cast iron metallurgy]. Yusfin Yu.S. ed. Moscow: Metallurgiya, 1978, 480 p. (In Russ.).
2. Mirko V.A., Kabanov Yu., Naidenov V. Current state of deposits of brown iron ore in Kazakhstan. *Promyshlennost' Kazakhstana*. 2002, no. 1, pp. 79–82. (In Russ.).
3. Smirnov L.A., Babenko A.A. Introduction of Lisakovsky concentrate in production as one of the directions for expanding iron ore base of the Urals and Siberia. In: *Mater. Mezhdunar. kongr. "300 let Ural'skoi metallurgii"* [Materials of Int. Congress "300 Years of the Ural Metallurgy"]. Ekaterinburg: izd. Ural'skogo universiteta, 2001, pp. 48–49. (In Russ.).
4. Cao Y.Y., Zhang Y.R., Sun T.C. Dephosphorization behavior of high-phosphorus oolitic hematite-solid waste containing carbon briquettes during the process of direct reduction-magnetic separation. *Metals*. 2018, vol. 11, no. 8, article 897.

5. Tiginov L.P., Anufrieva S.I., Bronitskaya E.S., Krivokoneva G.K., Sokolova V.N., Alikberov V.M., Sladkova G.A., Fainshtein G.G., Parovinchak M.S. Modern technological solutions for processing of iron ores of the Bakcharsky deposit. *Razvedka i okhrana nedr.* 2010, no. 2, pp. 37–43. (In Russ.).
6. Li K., Ni W., Zhu M., Zheng M., Li Y. Iron extraction from oolitic iron ore by a deep reduction process. *Journal of Iron and Steel Research Int.* 2011, vol. 18, no. 8, pp. 9–13.
7. Yu Y.F., Qi C.Y. Magnetizing roasting mechanism and effective ore dressing process for oolitic hematite ore. *Journal of Wuhan University of Technology: Material Science.* 2011, vol. 26, no. 2, pp. 177–182.
8. Sun Y.S., Han Y.X., Gao P., Wang Z.H., Ren D.Z. Recovery of iron from high phosphorus oolitic iron ore using coal-based reduction followed by magnetic separation. *Int. Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials.* 2013, vol. 20, no. 5, pp. 411–419.
9. Xu C.Y., Sun T.C., Kou J., Li Y.L., Mo X.L., Tang L.G. Mechanism of phosphorus removal in beneficiation of high phosphorous oolitic hematite by direct reduction roasting with dephosphorization agent. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* 2012, vol. 22, no. 11, pp. 2806–2812.
10. Li G.H., Zhang S.H., Rao M.J., Zhang Y.B., Jiang T. Effects of sodium salts on reduction roasting and Fe–P separation of high-phosphorus oolitic hematite ore. *Int. Journal of Mineral Processing.* 2013, vol. 124, pp. 26–34.
11. Karelin V.G., Zainullin L.A., Epishin A.Yu., Artov D.A. Features of pyro-, hydrometallurgical technology of dephosphorization of brown iron ore of the Lisakovskoye deposit. *Stal'.* 2015, no. 3, pp. 8–11. (In Russ.).
12. Wang H.H., Li G.Q., Zhao D., Ma J.H., Yang J. Dephosphorization of high phosphorus oolitic hematite by acid leaching and the leaching kinetics. *Hydrometallurgy.* 2017, vol. 171, pp. 61–68.
13. Jin Y., Jiang T., Yang Y., Li Q., Li G., Guo Y. Removal of phosphorus from iron ores by chemical leaching. *Journal of Central South University of Technology.* 2006, vol. 13, no. 6, pp. 673–677.
14. Wang J., Shen S., Kang J., Li H., Guo Z. Effect of ore solid concentration on the bioleaching of phosphorus from high-phosphorus iron ores using indigenous sulfur-oxidizing bacteria from municipal wastewater. *Process Biochemistry.* 2010, vol. 45, no. 10, pp. 1624–1631.
15. Tang H., Guo Z., Zhao Z. Phosphorus removal of high phosphorus iron ore by gas-based reduction and melt separation. *Journal of Iron and Steel Research Int.* 2010, vol. 17, no. 9, pp. 1–6.
16. Yu W., Tang Q., Chen J., Sun T. Thermodynamic analysis of the carbothermic reduction of a high-phosphorus oolitic iron ore by FactSage. *Int. Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials.* 2016, vol. 23, no. 10, pp. 1126–1132.
17. Vatolin N.A., Moiseev G.K., Trusov B.G. *Termodinamicheskoe modelirovanie v vysokotemperaturnykh neorganicheskikh sistemakh* [Thermodynamic modeling in high-temperature inorganic systems]. Moscow: Metallurgiya, 1994, 352 p. (In Russ.).
18. Gamov P.A., Mal'kov N.V., Roshchin V.E. Thermodynamic modeling of metal reduction from titanium-magnetite concentrates of the Suroyamskoye field. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya.* 2018, vol. 18, no. 2, pp. 21–28. (In Russ.).
19. Okamoto H. The Fe–P (iron-phosphorus) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams.* 1990, vol. 11, no. 4, pp. 404–412.
20. Kubaschewski O., Alcock C.B. *Metallurgical Thermochemistry.* Oxford, New York: Pergamon Press, 1967. (Russ. ed.: Kubaschewski O., Alcock C.B. *Metallurgicheskaya termokhimiya.* Moscow: Metallurgiya, 1982, 392 p.).

Information about the authors:

S.P. Salikhov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Pyrometallurgical Processes” (salikhovsp@susu.ru)

B. Suleimen, Postgraduate of the Chair “Pyrometallurgical Processes” (bakytsuleimen@mail.ru)

V.E. Roshchin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Pyrometallurgical Processes” (roshchinve@susu.ru)

Received December 13, 2019

Revised January 24, 2020

Accepted January 24, 2020

УДК 669.168

ТЕМПЕРАТУРЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ*

Заякин О.В., д.т.н., заведующий лабораторией стали и ферросплавов (zferro@mail.ru)

Ренёв Д.С., младший научный сотрудник (sense199@mail.ru)

Институт металлургии УрО РАН
(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

Аннотация. Термогравиметрическим методом определены температуры начала кристаллизации сплавов системы Fe–Ni–Cr–C–Si в зависимости от концентрации хрома и никеля. Комплексные ферросплавы содержат 0,2 – 21,0 % Ni (при Cr = 25 ÷ 28 %) и 0,5 – 45,0 % Cr (при Ni = 10 ÷ 11 %); примерно 2,0 % C и 0,3 % Si; остальное железо и примеси. Эти ферросплавы относятся к категории легкоплавких сплавов и обладают рациональными (1320 – 1400 °C) температурами кристаллизации с точки зрения применения для обработки стали в ковше. Повышение до 45 % содержания хрома в таких сплавах сопровождается интенсивным ростом температур начала кристаллизации.

Ключевые слова: температура плавления, хром, никель, ферросплав.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-568-570

Перспективным направлением получения ферросплавов, обладающих рациональными служебными характеристиками, является создание комплексных сплавов [1]. Для исследований выбраны образцы комплексных хромоникелевых ферросплавов, ориентированные на использование в интенсивно развивающемся производстве сталей нержавеющей марок [2]. Одним из факторов, сдерживающих массовое производство и потребление новых видов ферросплавов, является отсутствие сведений о потребительских характеристиках этих материалов [3], к которым в числе первых относятся температуры кристаллизации (плавления) [4]. Интервал плавления – одно из основных свойств ферросплавов, влияющих как на технологию их получения, так и на дальнейшее использование. Ранее была предложена схема, позволяющая условно разделять все ферросплавы на три группы: легкоплавкие, тугоплавкие, сверхтугоплавкие. Чтобы отнести ферросплав к той или иной группе, необходимо сопоставить температуру T_{ϕ} начала кристаллизации ферросплава, температуру T_{ν} стали в ковше и температуру T_c конца кристаллизации: для легкоплавкого сплава $T_{\phi} < T_c$, для тугоплавкого $T_c < T_{\phi} < T_{\nu}$, для сверхтугоплавкого $T_{\phi} > T_{\nu}$. По данным работы [5] оптимальная температура начала кристаллизации ферросплавов, предназначенных для обработки стали, не должна превышать 1400 °C.

Температуру кристаллизации сплавов определяли методом фиксирования температурных кривых при охлаждении расплавов [6] на высокотемпературной

лабораторной установке. Образцы получены методом сплавления феррохрома и химреактивов (железа, никеля, кремния). Образцы помещали в алундовые тигли. Температуру измеряли вольфрам-ренийевыми термодатчиками ВР-5/20 с алундовыми наконечниками при помощи самописца Термодат-19М4. Во время замеров наконечник одной термодатчицы находился в центре расплава, а наконечник другой – в рабочем пространстве печи в непосредственной близости от тигля с расплавом.

Рабочее пространство печи нагревали на 50 – 100 °C выше предполагаемой температуры плавления сплава, после чего охлаждали со скоростью 10 – 15 °C/мин, при этом на кривых охлаждения фиксировали площадки. Первая площадка на кривой охлаждения соответствует температуре начала кристаллизации, вторая – температуре конца кристаллизации. Каждое измерение повторяли не менее трех раз. Ошибка измерения температуры не превышала 0,4 %. Содержание элементов в образцах определяли методами оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (OPTIMA 2100 DV) и инфракрасно-абсорбционного анализа (LECO CS-230) с использованием оборудования ЦКП «Урал-М». Химический состав исследуемых образцов представлен в таблице.

В образцах 1 – 5 системы Fe–Ni–Cr–C–Si изменяли содержание никеля при относительно постоянном содержании хрома, углерода и кремния. Показано, что при увеличении концентрации никеля во всем рассматриваемом интервале (0,2 – 21,0 %) наблюдается стабильное снижение (от 1387 до 1318 °C) температуры начала кристаллизации образцов с интенсивностью примерно 3,3 °C/% Ni.

* Работа выполнена по Государственному заданию Института металлургии УрО РАН в рамках Программы фундаментальных исследований государственных академий и по проекту РФФИ № 19-03-00451.

Химический состав исследуемых образцов

Chemical composition of the test samples

Образец	Содержание*, % (по массе)		$T_{\text{ф}}, ^\circ\text{C}$
	Ni	Cr	
1	0,2	26,1	1387
2	5,7	24,6	1346
3	11,0	27,5	1334
4	16,1	27,2	1324
5	21,1	24,5	1318
6	11,2	0,5	1371
7	10,8	36,7	1365
8	9,6	45,6	1400
9	10,0	55,0	1445

* Во всех образцах содержится примерно 2,0 % C и 0,3 % Si; остальное – железо и примеси.

В образцах 3, 6 – 9 изменяли количество хрома за счет концентрации железа. Выявлено, что повышение содержания хрома до 28 % в рассматриваемых комплексных ферросплавах приводит к плавному (1,4 $^\circ\text{C}/\%$ Cr) снижению температур начала кристаллизации с 1371 до 1334 $^\circ\text{C}$, а дальнейшее увеличение содержания хрома до 55 %, напротив, сопровождается интенсивным (4,0 $^\circ\text{C}/\%$ Cr) ростом (до 1445 $^\circ\text{C}$) температур начала кристаллизации. Качественно такая зависимость может объясняться поведением линии ликвидуса на диаграмме равновесного состояния двухкомпонентной системы Fe–Cr [7]. Согласно этой диаграммы увеличение содержания хрома до 21 % сопровождается снижением температуры ликвидуса на 25 $^\circ\text{C}$, а дальнейшее повышение концентрации хрома приводит к росту температуры ликвидуса бинарного сплава.

Рассматриваемые комплексные сплавы с содержанием хрома более 45 % относятся к категории легкоплавких сплавов, так как обладают температурами

кристаллизации существенно ниже температуры конца кристаллизации обрабатываемой стали. Повышение (до 55 %) содержания хрома приводит к нежелательному увеличению (до 1445 $^\circ\text{C}$) температуры начала кристаллизации комплексного сплава.

Выводы

Комплексные ферросплавы, содержащие 0,2 – 21,0 % Ni (при Cr = 25 ÷ 28 %) и 0,5 – 45,0 % Cr (при Ni = 10 ÷ 11 %); примерно 2,0 % C и 0,3 % Si, остальное – железо и примеси, относятся к категории легкоплавких сплавов и обладают рациональными (1320 – 1400 $^\circ\text{C}$) температурами кристаллизации с точки зрения их применения для обработки стали в ковше.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Machulec B., Bialik W., Gil S. Application of the mining industry wastes as raw material for melting of the complex ferrous alloys // Archives of Metallurgy and Materials. 2018. Vol. 63. No. 2. P. 975 – 979.
2. Pariser H.H., Backeberg N.R., Masson O.C.M., Bedder J.C.M. Changing nickel and chromium stainless steel markets – A review // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118. No. 6. P. 563 – 568.
3. Bao Y.-P., Zhang C.-J., Wang M. Situation and prospect on investigation of ferroalloy reduction during steelmaking // Chinese Journal of Engineering. 2018. Vol. 40. No. 9. P. 1017 – 1026.
4. Жучков В.И., Заякин О.В., Мальцев Ю.Б. Изучение температур плавления и плотности никельсодержащих ферросплавов // Расплавы. 2001. № 1. С. 7 – 9.
5. Жучков В.И., Носков А.С., Завьялов А.Л. Растворение ферросплавов в жидком металле. – Свердловск: изд. УрО АН СССР, 1990. – 134 с.
6. Физико-химические методы исследования металлургических процессов / П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев, М.Г. Крашенинников и др. – М.: Металлургия, 1988. – 511 с.
7. Ферросплавы / В.Г. Мизин, Н.А. Чирков, В.С. Игнатьев и др. – М.: Металлургия, 1992. – 415 с.

Поступила в редакцию 4 июня 2019 г.

После доработки 10 октября 2019 г.

Принята к публикации 22 октября 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 7, pp. 568–570.

CRYSTALLIZATION TEMPERATURES OF COMPLEX FERROALLOYS

O.V. Zayakin, D.S. Renev

Institute of Metallurgy, UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Thermo-gravimetric method was used to determine the temperature of crystallization onset of alloys of the Fe–Ni–Cr–C–Si system depending on concentration of chromium and nickel. It was shown that complex ferroalloys containing 0.2 – 21.0 % Ni (at Cr = 25 – 28 %); 0.5 – 45.0 % Cr (at Ni = 10 – 11 %); 2.0 % C and 0.3 % Si, iron, and impurities belong to the category of low-melting alloys and have rational values (1320 – 1400 $^\circ\text{C}$) of crystallization temperatures in terms of their use for steel processing in the ladle. An increase of the chromium content to more than 45 % in these alloys is accompanied by an intense increase of their temperatures of the crystallization onset.

Keywords: melting point, chromium, nickel, ferroalloy.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-568-570

REFERENCES

1. Machulec B., Bialik W., Gil S. Application of the mining industry wastes as raw material for melting of the complex ferrous alloys. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018, vol. 63, no. 2, pp. 975–979.
2. Pariser H.H., Backeberg N.R., Masson O.C.M., Bedder J.C.M. Changing nickel and chromium stainless steel markets – A review. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018, vol. 118, no. 6, pp. 563–568.

3. Bao Y.-P., Zhang C.-J., Wang M. Situation and prospect on investigation of ferroalloy reduction during steelmaking. *Chinese Journal of Engineering*. 2018, vol. 40, no. 9, pp. 1017–1026.
4. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Mal'tsev Yu.B. Study of melting temperatures and density of ferroalloys containing nickel. *Rasplavy*. 2001, no. 1, pp. 7–9. (In Russ.).
5. Zhuchkov V.I., Noskov A.S., Zav'yalov A.L. *Rastvorenie ferrosplavov v zhidkom metalle* [Dissolution of ferroalloys in liquid metal]. Sverdlovsk: UrO AN SSSR, 1990, 134 p. (In Russ.).
6. Arsent'ev P.P., Yakovlev V.V., Krashennnikov M.G. etc. *Fiziko-khimicheskie metody issledovaniya metallurgicheskikh protsessov* [Physico-chemical methods of metallurgical processes study]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 511 p. (In Russ.).
7. Mizin V.G., Chirkov N.A., Ignat'ev V.S. etc. *Ferrosplavy* [Ferroalloys]. Moscow: Metallurgiya, 1992, 415 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was carried out under the State Assignment of the IMET UB RAS within the framework of the Program of Fundamental Studies of State Academies and within the RFBR project No. 19-03-00451.

Information about the authors:

O.V. Zayakin, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Steel and Ferroalloys (zferro@mail.ru)

D.S. Renev, Junior Researcher (sense199@mail.ru)

Received June 4, 2019

Revised October 10, 2019

Accepted October 22, 2019

К 80-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ВИКТОРА НИКОЛАЕВИЧА ПУСТОВОЙТА



21 июня исполняется 80 лет заслуженному деятелю науки Российской Федерации, доктору технических наук, профессору Виктору Николаевичу Пустовойту.

В.Н. Пустовойт родился 21.06.1940 г. в городе Ростов-на-Дону. Именно в этот год Ростовский-на-Дону институт сельскохозяйственного машиностроения (РИСХМ) отмечал свой первый юбилей – 10 лет со дня основания. В 1957 году Виктор Николаевич поступил в РИСХМ (с 1992 г. это Донской государственный технический университет) на только что открытую, чрезвычайно актуальную и востребованную специальность «Приборы точной механики», в 1962 году его окончил и был оставлен на родной кафедре приборостроения для работы в должности ассистента. Вся дальнейшая плодотворная научная и образовательная деятельность В.Н. Пустовойта связана с родным городом и alma mater РИСХМом-ДГТУ.

Защитив в 1968 г. кандидатскую диссертацию, Виктор Николаевич попробовал себя на административном поприще: работал заместителем декана и деканом приборостроительного факультета. Однако в 1975 году профессор П.И. Русин, заведовавший кафедрой «Металловедение», решил омолодить и укрепить коллектив кафедры и В.Н. Пустовойт, не сомневаясь, принял его предложение. С тех пор он полностью посвятил свою жизнь науке о материалах. Организаторский талант

Виктора Николаевича помог ему создать на кафедре лабораторию термомангнитной обработки и объединить вокруг этой перспективной научной идеи будущих докторов наук Ю.М. Домбровского и В.А. Блиновского, будущего директора инструментального завода Ю.А. Корнилова и других молодых ученых. В.Н. Пустовойт возглавил новое научное направление, в рамках которого в 1980 году была защищена его докторская диссертация по специальности «Металловедение и термическая обработка металлов» и сформировалась известная научная школа. Со временем диапазон научных интересов В.Н. Пустовойта значительно расширился, а круг его учеников существенно вырос. В 1988 году В.Н. Пустовойт возглавил кафедру «Металловедение» и очень скоро осознал, что научные интересы и кадровый потенциал кафедры уже переросли ее старое название. Она была переименована в кафедру «Физическое и прикладное материаловедение» и это стало новым этапом в творческой и научной деятельности не только ее руководителя, но и всего коллектива. В 1990-х годах, несмотря на политические кризисы, экономические и хозяйственные трудности в жизни страны, руководителю кафедры удалось сохранить материальную приборную базу и укрепить кадровый состав. Это позволило сформировать на кафедре новое мощное научное направление по обработке материа-

лов концентрированными потоками энергии, которое объединило термомагнитную, лазерную, плазменную обработку и импульсный концентрированный высокочастотный нагрев. На рубеже веков в рамках нового научного направления были защищены 4 докторских и 6 кандидатских диссертаций, выполнено несколько крупных работ по государственным программам и грантам, кафедра получила образовательную лицензию и стала выпускающей. Грантом Президента РФ 2006 – 2007 гг. научная школа профессора В.Н. Пустовойта была признана ведущей в области материаловедения.

Виктор Николаевич Пустовойт руководил кафедрой «Физическое и прикладное материаловедение» в течение 30 лет с 1988 по 2018 гг. За этот период его вклад в экономику и промышленность страны и региона выразился не только многомиллионными суммами выполненных хозяйственных работ и научных программ, но и подготовкой более двух сотен профессиональных материаловедов – специалистов, бакалавров, магистров, которые успешно трудятся на предприятиях и в организациях города, области, страны.

Творческий диапазон деятельности В.Н. Пустовойта весьма широк: термическая обработка при высокочастотном нагреве, создание теоретических и технологических основ методов термической обработки стали в магнитном поле, комбинированные методы упрочнения стали, гипернеравновесные фазовые переходы в металлических материалах, процессы структурной

самоорганизации при экстремальном тепловом воздействии и создание на этой основе новых технологий упрочнения, создание высокопрочных композиционных материалов, разработка принципиально новых подходов к созданию сталей для броневой защиты и другие. Им опубликовано более 450 научных работ, в том числе 3 монографии, 20 патентов на изобретения, издано 18 учебных пособий, подготовлено 16 кандидатов и 4 доктора технических наук.

В.Н. Пустовойт в настоящее время ведет активную научно-педагогическую деятельность, читает лекции, руководит лабораторным практикумом и дипломным проектированием для бакалавров и магистров по направлению «Материаловедение и технологии материалов», является научным консультантом двух докторантов и научным руководителем трех аспирантов. Принимает активное участие в организационной работе университета: руководит Центром структурного анализа и экспертизы материалов, является советником при ректорате университета, членом диссертационного совета в Южно-российском государственном технологическом университете (г. Новочеркасск), членом редакционной коллегии журнала «Известия ВолгГТУ» (г. Волгоград). В течение многих лет Виктор Николаевич является автором нашего издания.

Редакционная коллегия и редакция журнала сердечно поздравляют Виктора Николаевича и желают ему здоровья и творческого долголетия!

НАУКОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЖУРНАЛА

В 2017 году международная база данных Scopus возобновила индексирование журнала «Известия ВУЗов. Черная металлургия». На инфографике отражены текущие показатели.

Данные предоставлены сайтами www.scopus.com и www.scimagojr.com.



Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Протопопов Е.В., *заместитель главного редактора*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

Бащенко Л.П., *заместитель ответственного секретаря*

Потапова Е.Ю., *заместитель главного редактора по развитию*

Запольская Е.М., *ведущий редактор*

Киселева Н.Н., *ведущий редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

Острогорская Г.Ю., *менеджер по работе с клиентами*

Подписано в печать 12.08.2020. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 11,0. Заказ 11105. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4.
Тел./факс: (499) 236-76-17, 236-76-35

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

SMELTING OF STEEL SEMI-PRODUCT IN BOF AND EAF UNDER MAGNESIAN SLAGS

POSSIBILITY OF USING YTTRIUM OXIDE POWDER AS A STRENGTHENING PHASE FOR CENTRIFUGAL CASTING OF CORROSION-RESISTANT STEELS

WELDING OF DIFFERENTIALLY HEAT-STRENGTHENED RAILS. LABORATORY STUDIES

ENVIRONMENTAL POLICY OF NOVOKUZNETSK IN THE CONTEXT OF MODERN REQUIREMENTS FOR METALLURGICAL INDUSTRY DEVELOPMENT

TECHNOLOGICAL SUITABILITY OF SEMI-COKE AS A CARBON REDUCER IN PRODUCTION OF MANGANESE AND SILICON ALLOYS

INCREASING ENVIRONMENTAL SAFETY BY REDUCING TECHNOGENIC LOAD IN MINING REGIONS

LIQUID-PHASE BORIDING OF HIGH-CHROMIUM STEEL

STRESS-STRAIN STATE OF METAL IN DEFORMATION ZONE DURING PRODUCTION OF STEEL SECTION BILLETS ON THE UNIT OF COMBINED CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION. REPORT 1

EXPERIMENTAL STUDY OF FRACTIONAL COMPOSITION OF PIECES OF BRITTLE MATERIAL DURING CRUSHING IN A SINGLE-ROLL CRUSHER WITH BLOCK STOP ON THE ROLL

SELECTIVE REDUCTION OF IRON AND PHOSPHORUS FROM OOLITIC ORE

CRYSTALLIZATION TEMPERATURES OF COMPLEX FERROALLOYS

TO THE 80TH ANNIVERSARY OF VIKTOR NIKOLAEVICH PUSTOVOIT