

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 63 Номер 5 2020



СИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



ГОРДИМСЯ ПРОШЛЫМ • РАЗВИВАЕМСЯ В НАСТОЯЩЕМ • СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 5, 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 Ариэль, 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)
КОСЫГЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)
КУРГАНОВА Ю.А. (МГУ 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)
ПОДГОРДНЕЦКИЙ 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)

РАПЕВ 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 Циньхуа, г. Шэньжень, 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. (ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», 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@isis.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Новокузнецк, 7,
Кемеровской обл., ул. Кирова, д. 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
Tsnetmetobrabotka", 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 effi-
ciency 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 "Metallur-
gical 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,
Sidney, 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 (OJSC "ZSMK", 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@sisis.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Novokuznetsk, Kemerovo region,
Kirova str., 42
Siberian State Industrial University,
Tel.: +7 (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsiu.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

Протопопов Е.В. СибГИУ – 90! Гордимся прошлым, развиваемся в настоящем, создаем будущее!	291
--	-----

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Протопопов Е.В., Числавлев В.В., Темлянцев М.В., Головатенко А.В. Повышение эффективности рафинирования рельсовой стали в промежуточных ковшах МНЛЗ на основе рациональной организации гидродинамических процессов	298
Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н., Башченко Л.П. Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Промышленное опробование	305
Фастыковский А.Р., Никитин А.Г., Беляев С.В., Добрянский А.В. Особенности освоения технологии прокатки-разделения на действующем непрерывном мелкосортном стане	313
Уманский А.А., Дорофеев В.В., Думова Л.В. Разработка теоретических основ энергоэффективного производства железнодорожных рельсов с повышенными эксплуатационными свойствами	318
Приходько О.Г., Деев В.Б., Прусов Е.С., Куценко А.И. Влияние теплофизических характеристик сплава и материала литейной формы на скорость затвердевания отливок	327
Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В. Исследование технологических режимов эффективной металлизации оксидно-железосодержащих отходов металлургического производства	335

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Едильбаев А.И., Едильбаев Б.А. Марганцевые руды Кемеровской области – Кузбасса и методы их обогащения	344
--	-----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Осколкова Т.Н., Симачев А.С. Влияние импульсно-плазменного модифицирования титаном и бором поверхности твердого сплава VK10KS на его структуру и свойства	351
Зоря И.В., Полегаев Г.М., Старостенков М.Д., Ракитин Р.Ю., Кокханенко Д.В. Влияние примесей легких элементов на процесс кристаллизации никеля в области тройного стыка границ зерен: молекулярно-динамическое моделирование	357

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Рыбенко И.А., Роос Х.-Г. Метод и инструментальная система для моделирования и оптимизации технологических режимов процессов прямого восстановления металлов в агрегате струйно-эмульсионного типа	364
---	-----

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Зимин А.В., Золн И.А., Буркова И.В., Зимин В.В. Планирование развертывания сервисных активов, основанное на данных о применении ИТ-сервисов	373
---	-----

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

ГлушакOVA О.В., Черникова О.П., Стрекалова С.А. Интегральная оценка эффективности реализации корпоративных стратегий предприятиями черной металлургии	379
---	-----

ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ

Цымбал В.П., Буинцев В.Н., Кожемяченко В.И., Калашников С.Н., Сеченов П.А. Математическое моделирование в учебном процессе, исследованиях и малоэнергетических металлургических технологиях	389
---	-----

CONTENTS

E.V. Protopopov To the 90 th Anniversary of Siberian State Industrial University	291
---	-----

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

E.V. Protopopov, V.V. Chislavlev, M.V. Temlyantsev, A.V. Golovatenko Increasing efficiency of rail steel refining in CCM tundish based on rational organization of hydrodynamic processes	298
N.A. Kozyrev, R.A. Shevchenko, A.A. Usol'tsev, A.N. Prudnikov, L.P. Bashchenko Welding of differentially heat-strengthened rails. Industrial testing	305
A.R. Fastyskovskii, A.G. Nikitin, S.V. Belyaev, A.V. Dobryanskii Features of the rolling-separation technology development on operating continuous small-grade mill	313
A.A. Umanskii, V.V. Dorofeev, L.V. Dumova Theoretical foundations for energy-efficient production of railway rails with improved performance properties	318
O.G. Prikhod'ko, V.B. Deev, E.S. Prusov, A.I. Kutsenko Influence of thermophysical characteristics of alloy and mold material on castings solidification rate	327
A.E. Anikin, G.V. Galevskii, V.V. Rudneva Technological modes of efficient metallization of iron-oxide-containing waste from metallurgical production	335

ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

O.I. Nokhrina, I.D. Rozhikhina, A.I. Edil'baev, B.A. Edil'baev Manganese ores of the Kemerovo Region – Kuzbass and methods of their enrichment	344
--	-----

MATERIAL SCIENCE

T.N. Oskolkova, A.S. Simachev Influence of pulse-plasma modification of VK10KS solid alloy surface by titanium and boron on its structure and properties	351
I.V. Zorya, G.M. Poletaev, M.D. Starostenkov, R.Yu. Rakitin, D.V. Kokhanenko Effect of light elements impurity on process of nickel crystallization near the triple interface of grain boundaries: A molecular dynamics simulation	357

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

I.A. Rybenko, Roos Hans-Georg Technological modes of metals direct reduction in an aggregate of jet-emulsion type	364
---	-----

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

A.V. Zimin, I.A. Zolin, I.V. Burkova, V.V. Zimin Planning service assets deployment based on information about dynamics of IT services use	373
--	-----

ECONOMIC EFFICIENCY OF METALLURGICAL PRODUCTION

O.V. Glushakova, O.P. Chernikova, S.A. Strekalova Integral assessment of corporate strategies implementation efficiency of ferrous metallurgy enterprises	379
---	-----

ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ

V.P. Tsybmal, V.N. Buintsev, V.I. Kozhemyachenko, S.N. Kalashnikov, P.A. Sechenov Mathematical modeling in education process, research and low-energy metallurgical technologies	389
--	-----

УДК 66.094.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЭФФЕКТИВНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ОКСИДЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Аникин А.Е., к.т.н., доцент кафедры «Металлургия цветных металлов
и химическая технология» (kafcmet@sibsiu.ru)*

*Галевский Г.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Металлургия цветных металлов
и химическая технология»*

*Руднева В.В., д.т.н., профессор кафедры «Металлургия цветных металлов
и химическая технология»*

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

Аннотация. При проведении исследований в качестве оксиджелезосодержащих материалов использовали прокатную окалину и шламы газоочистки кислородно-конвертерного цеха № 1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК», в качестве углеродистых восстановителей – полукокс из бурых углей Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна (температура полукоксования 750 °С), коксовую мелочь ПАО «Кокс» и пыль установки сухого тушения АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Содержание общего железа, оксидов FeO и Fe₂O₃ составляет в окалине 73,3, 75,5 и 20,9 % в шламе – 41,2, 4,7 и 53,7 %. Шлам содержит также 4,3 % общего углерода и 20,6 % CaO. Буроугольный полукокс, коксовая мелочь и коксовая пыль содержат углерода и летучих веществ на сухую беззолую массу 94,05 и 9,5, 97,50 и 2,1, 97,47 и 1,6 %. Для металлизации шихт составов окалина, шлам – полукокс, коксовые мелочь, пыль с добавлением 10 % водорастворимого связующего – мелассы – прессовали прочные безобжиговые брикеты. Термодинамические спрогнозированы и технологически определены режимы металлизации исследуемых шихтовых композиций. Определены степень металлизации и содержание металлического железа, составляющие при использовании буроугольного полукокса 97,5 и 90,2 % для окалины, 97,5 и 71,3 % для шлама, коксовой мелочи 70,7 и 61,9 % для окалины, 68,9 и 48,4 % для шлама, коксовой пыли 72,1 и 62,6 % для окалины, 69,2 и 48,2 % для шлама. Установлена возможность достижения при металлизации брикетированной шихты окалина – буроугольный полукокс при температуре 1173 К и длительности 40 мин степени металлизации 97 – 98 % при содержании 92 – 93 % общего железа, 89,8 – 90,6 % металлического железа, 2,8 – 3,2 % FeO, 0,06 – 0,08 % серы, 0,016 – 0,018 % P, 1,7 – 1,9 % углерода, 1,0 – 1,2 % CaO, 0,25 – 0,35 % MgO.

Ключевые слова: металлизация, прокатная окалина, шламы газоочистки конвертерного производства, буроугольный полукокс, коксовая мелочь, коксовая пыль, металлизированные продукты для производства электростали.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-335-343

ВВЕДЕНИЕ

Все процессы металлизации (прямого восстановления железа) основаны на следующем принципе [1]. Исходное оксиджелезосодержащее сырье восстанавливают до состояния твердого губчатого железа, называемого также железом прямого восстановления (DRI – Direct Reduced Iron), или до горячбрикетированного железа (HBI – Hot Briquetted Iron) со степенью металлизации 85 – 95 %. При меньшей степени металлизации полученный продукт называется предварительно восстановленным (частично металлизированным).

Процессы восстановления в зависимости от вида используемого восстановительного агента подразделяются на газо- и твердофазные. В промышленных масштабах газодиффузионные процессы проводят в шахтных печах, ретортах и в псевдоожиженном (кипящем) слое. Твердофазное восстановление проводят во вращающихся

обжиговых печах, в печах с вращающимся подом или многоподовых.

По мнению авторов работы [2] к важнейшим характеристикам металлизированных продуктов относятся степень металлизации (90 – 94 %), содержание серы, фосфора, пустой породы (SiO₂) (не более 0,010, 0,015, 5,000 %), содержание углерода и азота (1 – 2 и 0,02 – 0,14 %), насыпная масса (не менее 1,8 т/м³).

Металлизация мелкозернистых и порошкообразных оксиджелезосодержащих отходов является важным направлением в металлургии. По данным Всемирной ассоциации производителей стали (World Steel Association) производство железа прямого восстановления за последние 10 лет выросло в мире на 18 %, в России – на 66 %, что говорит о чрезвычайно динамичном развитии этого направления. Особенно актуальной металлизация является для минизаводов в связи с отсутствием в их составе агломерационного производства, позволяю-

шего металлургическим предприятиям полного цикла перерабатывать прокатную окалину, шламы доменного и сталеплавильного производств и другие оксиджелезосодержащие отходы. Актуальность проблемы обусловлена значительным количеством минизаводов в мире – порядка одной тысячи, и, соответственно, большим объемом образования оксиджелезосодержащих отходов.

Вопросам исследования и технологического опробования различных вариантов металлизации железосодержащего сырья и отходов посвящено большое количество работ, отражающих современную научно-экспериментальную практику и достижения. Исследованные технологические варианты весьма разнообразны и отличаются по железосодержащему сырью (железная руда, концентрат, шламы, прокатная окалина, пыли и др.), углеродистым восстановителям (угли разных технологических марок, полукокс, отходы коксования, окускования), способам компактирования мелкозернистых и порошковых железоуглеродных композиций (окачивание, брикетирование), используемому для металлизации оборудованию, технологическому назначению продуктов металлизации (гранулированное железо, металлизированные рудоугольные окатыши для выплавки электростали и синтетического чугуна, рудофлюсовые окатыши и др.) [3 – 13].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящей работы является научное обоснование и экспериментальное исследование процессов металлизации оксида железа (III) и оксиджелезосодержащих отходов металлургического производства (прокатная окалина, шламы газоочистки) с использованием различных углеродистых восстановителей (коксовая мелочь, пыль сухого тушения кокса, буроугольный полукокс): термодинамическое моделирование процессов, определение температурно-временных условий эффективной металлизации, физико-химическая аттестация продуктов металлизации.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении исследований в качестве оксиджелезосодержащих материалов использовали оксид железа Fe_2O_3 марки «Х.Ч.», прокатную окалину АО «ЕВРАЗ ЗСМК», шламы газоочистки кислородно-конвертерного цеха № 1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (шламы ККЦ), в качестве углеродистых восстановителей использовали полукокс из бурых углей Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна (БПК), коксовую мелочь ПАО «Кокс» (КМ), пыль установок сухого тушения кокса АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (КП). Результаты физико-химической аттестации этих материалов подробно описаны в работах [5, 14]. Констатируем, что со-

держание общего железа в окалине составляет 73,3 %, в шламе – 41,2 %. При этом содержание соединений FeO и Fe_2O_3 составляет в окалине 75,5 и 20,9 %, в шламе 4,7 и 53,7 %. Установлено, что в окалине на порядок ниже содержание серы и фосфора – 0,036 и 0,019 % соответственно против 0,21 и 0,15 % в шламе. Шлам содержит также 20,6 % CaO и 4,3 % общего углерода. Гранулометрические составы окалины и шлама существенно отличаются: содержание классов крупности +1,0 и –0,016 мм составляет в окалине 63,3 и 0 %, в шламе – 14,8 и 44,5 %. Истинная плотность окалины составляет 4,6 – 4,9 г/см³, шлама – 3,5 – 5,0 г/см³. Отмечается, что содержание углерода и выход летучих веществ на сухую беззольную массу составляет 94,05 и 9,50 % БПК; 97,50 и 2,10 % КМ; 97,47 и 1,60 % КП. Зольность на сухую массу БПК составляет 9,2 %, что ниже, чем у КМ и КП (12,1 и 14,1 %). Содержание серы на сухую массу в БПК составляет 0,2 %, что ниже, чем у КМ и КП (0,56 и 0,41 %). Содержание фосфора на сухую массу в БПК составляет 0,007 %, КМ – 0,050 % и КП – 0,053 %. Реакционная способность БПК по оксиду углерода CO_2 при температуре 1000 °С составляет 3,72 см³/(г·с), что выше, чем у КМ и КП (1,08 и 0,33 см³/(г·с)). Собственное удельное электросопротивление БПК составляет 25,0 Ом·см, КМ – 0,0196 Ом·см и КП – 0,0136 Ом·см.

Гранулометрический состав характеризуется следующим распределением по классам: БПК 3,0 – 1,0 мм 37,9 %, 1,0 – 0,5 мм 16,5 %, менее 0,5 мм 45,1 %; КМ более 3 мм 47,0 %; 3,0 – 1,0 мм 20,8 %, 1,0 – 0,5 мм 17,4 %, менее 0,5 мм 14,8 %; КП 3,0 – 1,0 мм 8,4 %, 1,0 – 0,5 мм 20,0 %, менее 0,5 мм 71,3 %.

Для брикетирования все исходные материалы измельчали в виброистирателе до класса менее 0,5 мм. Смеси для брикетирования составляли с учетом стехиометрического соотношения оксида железа к углероду при расходе водорастворимого связующего (мелассы), равного 10 % от массы смеси. Подготовленные порошковые композиции перемешивали в двухшнековом смесителе. Брикетирование смесей осуществляли в необогреваемых цилиндрических стальных матрицах диам. 20 мм на гидравлическом прессе с усилием до 200 тс. Давление прессования составляло 30 МПа. Сушку отпрессованных брикетов во избежание их растрескивания осуществляли в течение одного часа с подъемом температуры от 100 (в начале) до 130 °С (в конце). Прочность на сбрасывание брикетов составила 98 – 99 % и сохранялась при выдержке в песке при температуре 900 °С в течение 30 мин.

Экспериментальные исследования проводили в два этапа.

На первом этапе исследовали металлизацию брикетов из оксида железа Fe_2O_3 марки «Х.Ч.» и углеродистого восстановителя (БПК, КП). Массовое соотношение между оксидом железа Fe_2O_3 и углеродом С соответствовало стехиометрическому, т.е. 83,6 % Fe_2O_3

и 18,4 % С. Металлизацию осуществляли путем термической обработки брикетов при различных температурах в токе аргона в лабораторной трубчатой электропечи мощностью 1,8 кВт и диапазоном автоматического регулирования температуры от 400 до 1250 °С.

Расход аргона составлял 1,7 см³/ч. Брикеты помещали в металлическую лодочку с засыпкой из корундовой крошки для предотвращения приваривания полученных продуктов. Затем лодочку с брикетами устанавливали в корундовую трубу диам. 0,032 и длиной 0,360 м, расположенную в предварительно нагретой до заданной температуры печи. Трубу после этого закрывали с обеих сторон резиновыми пробками с металлическими трубками для подвода аргона и отвода газообразных продуктов металлизации и аргона. После окончания заданного времени металлизации печь отключали. Продукты металлизации эвакуировали из печи и помещали в корундовый стакан, который плотно закрывался резиновой пробкой и помещался в холодную воду для быстрого охлаждения. Это позволяло предотвратить вторичное окисление кислородом воздуха полученного металлизированного продукта.

На втором этапе исследовали металлизацию брикетов из прокатной окалины и шламов ККЦ, содержащих БПК, КМ, КП. Брикеты разгружали в графитовый контейнер, подвергали термической обработке в камерной электропечи сопротивления СНО-3.6.2.5/1.5 с дисилицидмолибденовыми нагревателями в атмосфере воздуха, после чего охлаждали в токе азота.

На обоих этапах исследования степень металлизации рассчитывали по результатам определения содержания общего ($Fe_{\text{общ}}$) и металлического ($Fe_{\text{мет}}$) железа, выполненного в соответствии с ГОСТ 23.581.18 – 81 (изм. 1987 г.) и ГОСТ 23.581.11 – 79 (изм. 1986 г.). Методы определения в продуктах металлизации веществ FeO, S, P, C, CaO, MgO описаны в работе [14].

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ

ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА В СИСТЕМЕ Fe – O – C – H

Термодинамический анализ проведен с целью прогнозирования условий восстановления железа (соотношения компонентов и температуры) и определения равновесной степени восстановления. В связи с использованием в качестве железосодержащего сырья окалины и обезвоженных шламов, содержащих 73,3 и 41,2 % $Fe_{\text{общ}}$, и буроугольного полукокса с содержанием летучих 8,5 – 10,0 %, объектом анализа была система Fe – O – C – H. В последнее время отмечается повышенный интерес к исследованию этой системы в связи с технологическим опробованием в восстановительных процессах альтернативных коксу углеродистых материалов [15, 16]. Сопоставительный анализ восстановительной способности монооксида углерода и водорода к оксидам железа [17] показал, что восстановление с участием этих газов происходит при низких (менее

1083 К) и высоких (более 1083 К) температурах. При этом восстановительная способность водорода выше во всем исследуемом интервале температур. При температуре 773 К оксид углерода CO может восстановить оксиды железа только до Fe_3O_4 , в то время как водород восстанавливает все оксиды до железа. Авторы работ [18, 19], исследовавшие параметры окислительно-восстановительных процессов в системе Fe – O – C – H, отмечают, что степень металлизации 90 % достигается при температурах 1100 и 1170 К при содержании водорода в газовой фазе 40 и 10 % соответственно.

Расчеты выполняли с использованием программы компьютерного моделирования «PLASMA» высокотемпературных сложных химических равновесий константным методом, имеющей встроенную базу данных продуктов взаимодействия для оксидо-, боридо-, карбидо- и нитридообразующих систем. При расчетах рассматривали область температур 800 – 1500 К при давлении в системе 0,1 МПа. Исходными данными служили константы равновесия реакций образования соединений из элементов. При проведении расчетов учитывали возможность образования в газовой фазе O, O₂, H, H₂, CO, CO₂, H₂O, CH₄, C₂H₂, в конденсированной – Fe₂O₃, Fe₃O₄, FeO, Fe, C. Выбранные соотношения исходных компонентов определяли стехиометрией реакции $Fe_2O_3 + 3C \rightarrow 2Fe + 3CO$, составом шихтовых материалов и составили Fe:O:C:H = 2:3:2,4:3,2 (1) и 2:3:2,7:3,6 (2). Результаты расчетов равновесных составов представлены на рис. 1 – 3.

Анализ результатов позволяет сделать следующие технологически значимые выводы:

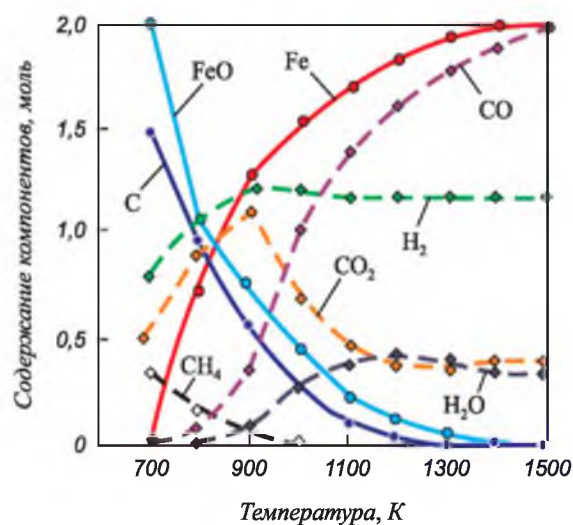


Рис. 1. Зависимость равновесных составов системы Fe – O – C – H от температуры при соотношении Fe:O:C:H = 2:3:2,4:3,2 и давлении $P = 0,1$ МПа:

— и --- — конденсированные и газообразные продукты

Fig. 1. Dependence of equilibrium compositions of the Fe – O – C – H system on temperature at ratio Fe:O:C:H = 2:3:2,4:3,2 and pressure $P = 0.1$ MPa:

— and --- — condensed and gaseous products

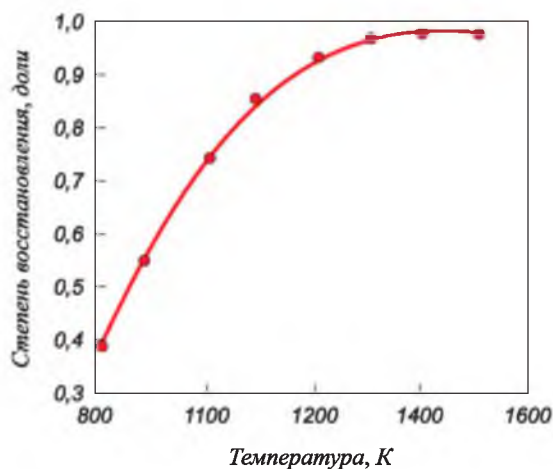


Рис. 2. Зависимость равновесной степени восстановления от температуры при соотношении Fe:O:C:H = 2:3:2.4:3.2 и давлении $P = 0,1$ МПа

Fig. 2. Dependence of equilibrium reduction degree on temperature at ratio Fe:O:C:H = 2:3:2.4:3.2 and pressure $P = 0.1$ MPa

– равновесная степень восстановления железа из его оксида Fe_2O_3 выше 0,9 достигается при температуре 1200 К и составляет 0,925, а максимальная – 0,967 при 1300 – 1500 К (рис. 1, 2);

– в восстановлении железа принимает участие оксид углерода СО и водород: при температуре 1200 К конденсированной фазе состава 89,6 % Fe; 9,3 % FeO; 1,1 % С соответствует газовая фаза, содержащая 46,0 % (об.) СО; 32,8 % (об.) H_2 ; 11,3 % (об.) H_2O ; 9,9 % (об.) CO_2 ;

– в связи с участием водорода в восстановлении в конденсированных продуктах присутствует свободный углерод, количество которого составляет 2,4 и 3,8 % при соотношении Fe:O:C:H = 2:3:2.4:3.2 (1) и 2:3:2.7:3.6 (2) (рис. 3), что предполагает использование в реальных технологических процессах шихты с некоторым недостатком (примерно 10 %) полукокса.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕТАЛЛИЗАЦИИ

И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование процесса металлизации оксида железа Fe_2O_3 проводили методом планируемого эксперимента, позволяющим найти зависимость степени металлизации полученного продукта от определяющих факторов в виде интерполяционных уравнений [20]. В качестве модели выбран неполный квадратный полином вида

$$\bar{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n (b_i x_i) + \sum_{i < j} (b_{ij} x_i x_j), \quad (1)$$

где $\bar{y}$ – параметр оптимизации; b_0, b_i, b_{ij} – коэффициенты; x_i – переменные факторы; $x_i x_j$ – двойные взаимодействия факторов.

Для математического описания процесса использовали полуреpliky полного факторного эксперимен-

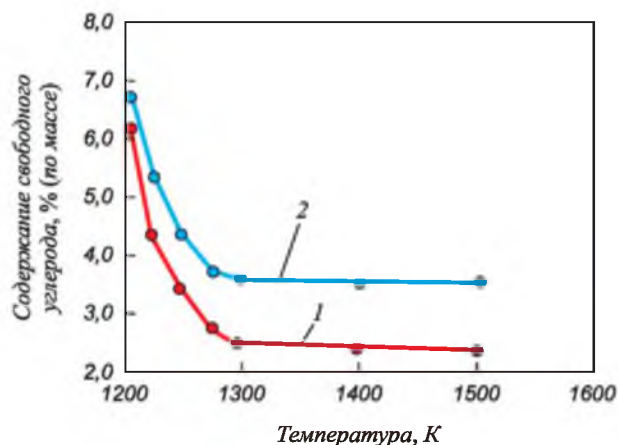


Рис. 3. Зависимость равновесного содержания в продуктах восстановления свободного углерода от температуры при соотношении Fe:O:C:H = 2:3:2.4:3.2 (1) и 2:3:2.7:3.6 (2)

Fig. 3. Dependence of equilibrium content of free carbon in reduction products on temperature at ratio Fe:O:C:H = 2:3:2.4:3.2 (1) and 2:3:2.7:3.6 (2)

та 2^{4-1} с генерирующим соотношением $x_4 = x_1 x_2 x_3$. Разрешающая способность плана равна четырем, т.е. план оценивает все главные эффекты факторов и все двойные взаимодействия. Факторы, влияние которых учитывали, и интервалы их варьирования приведены в табл. 1. В качестве функции y отклика была выбрана степень металлизации η , %.

В первой серии опытов степень металлизации варьировали в пределах 3,05 – 100,0 %, во второй – 1,1 – 96,7 %. Максимальная степень металлизации достигается при применении восстановителя с реакционной способностью по оксиду углерода CO_2 3,72 см³/(г·с) и выходом летучих веществ 9,5 % при проведении термической обработки брикетов при температуре 900 °С в течение 50 мин.

Обработку результатов проводили по схеме с равномерным дублированием опытов. По критерию Кохрена G во всех экспериментах проверяли однородность дисперсий, далее рассчитывали оценку дисперсий выходного параметра $S_{[y]}^2$ и коэффициентов уравнений регрессии $S_{[b]}^2$, определяли коэффициенты уравнений регрессии b_0, b_i, b_{ij} и с помощью критерия Стьюдента t оценивали их значимость. Проверку адекватности полученных моделей проводили с использованием критерия Фишера F . Результаты расчетов приведены в табл. 2. Во всех случаях с 95 %-ой степенью вероятности установлена адекватность полученных интерполяционных полиномов ($F_{\text{табл}} > F_{\text{экс}}$) описываемым процессам металлизации. Это свидетельствует об учете всех основных влияющих на процесс факторов.

Зависимость степени металлизации от условий ее проведения описывается уравнениями:

$$y_1 = 48,81 + 1,42x_1 + 43,1x_2 + 4,0x_3 - 0,4x_1x_3 - 3,2x_2x_3; \quad (2)$$

Переменные факторы, выбранные для исследования процесса металлизации

Table 1. Variables selected to investigate metallization process

Факторы	Уровни факторов			Интервал варьирования
	–1 (нижний)	0	+1 (верхний)	
Первая серия				
x_1 – выход летучих веществ из восстановителя, V^{daf} , %	0,60	5,05	9,50	4,45
x_2 – температура, t , °C	600	750	900	150
x_3 – длительность металлизации, τ , мин	25,0	37,5	50,0	12,5
x_4 – давление прессования при брикетировании, P , МПа	10	25	40	15
Вторая серия				
x_1 – реакционная способность восстановителя по оксиду углерода CO_2 , K , см ³ /(г·с)	0,330	2,025	3,720	1,695
x_2 – температура, t , °C	700	800	900	100
x_3 – длительность металлизации, τ , мин	15,0	27,5	40,0	12,5
x_4 – давление прессования при брикетировании, P , МПа	10	25	40	15

Коэффициенты уравнений регрессий, описывающих процесс металлизации

Table 2. Coefficients of regression equations describing metallization process

Пара- метр отклика	Значимые коэффициенты полиномов																		
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{23}	b_{24}	b_{34}	$G_{\text{табл}}$	$G_{\text{эксп}}$	$S^2_{(y)}$	$S^2_{(b)}$	$\pm b$	$S^2_{\text{ад}}$	$F_{\text{табл}}$	$F_{\text{экс}}$
y_1 [η]	48,81	1,42	43,10	4,00	–	–	–0,47	–	–3,20	–	–	0,6798	0,1515	0,05	0,0063	0,219	0,0041	4,5	0,082
y_2 [η]	42,53	14,09	27,26	8,01	–	–	–1,59	–	–8,04	–	–	0,6798	0,1411	0,23	0,0290	0,472	0,0041	4,5	0,082

$$y_2 = 42,53 + 14,09x_1 + 27,26x_2 + 8,01x_3 - 1,59x_1x_3 - 8,04x_2x_3. \quad (3)$$

После перевода моделей от безразмерных координат к натуральным переменным получены следующие зависимости:

$$\eta_1 = -183,40 + 0,62V^{daf} + 0,37t + 1,86\tau - 0,008V^{daf}\tau - 0,002t\tau; \quad (4)$$

$$\eta_2 = -430,28 + 10,52K + 0,55t + 8,80\tau - 0,08K\tau - 0,01t\tau. \quad (5)$$

На рис. 4, 5 приведены графические зависимости степени металлизации от реакционной способности восстановителя и температуры при длительности металлизации 50 мин (рис. 4) и от реакционной способности восстановителя и длительности металлизации при температуре 900 °C (рис. 5).

Степень металлизации в первой серии является функцией трех факторов: x_1 – выхода летучих веществ

из восстановителя; x_2 – температуры; x_3 – длительности металлизации. Первым по значению фактором является температура. Так, при одинаковой длительности металлизации повышение температуры с 600 до 900 °C приводит к увеличению значения η с 5,6 до 98,1 %. Вторым по значению фактором является длительность металлизации (при его изменении от 25 до 50 мин). Третьим по значению фактором является выход летучих веществ из восстановителя (при его изменении от 0,6 до 9,5 %). Степень металлизации во второй серии является функцией трех факторов: x_1 – реакционной способности восстановителя; x_2 – температуры; x_3 – длительности металлизации. Первым по значению фактором является температура. Так, при одинаковой длительности металлизации повышение температуры с 700 до 900 °C приводит к увеличению значения η с 1,1 до 96,7 %. Вторым по значению фактором является реакционная способность восстановителя. При восстановлении оксида железа (III) углеродистым восстановителем с реакционной способностью 3,72 $см^3/(г \cdot с)$ при температуре 900 °C и длительности металлизации 40 мин $\eta = 96,9$ %, тогда как при использовании углеро-

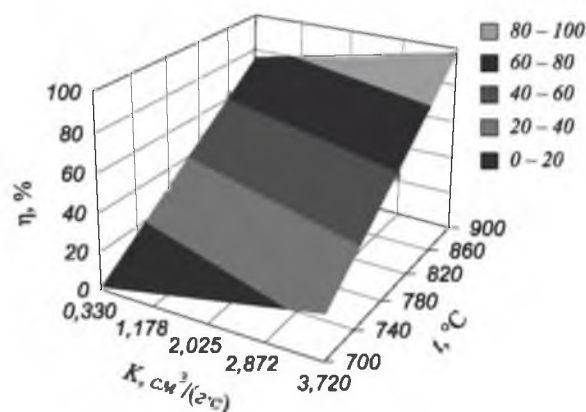


Рис. 4. Графическое представление зависимости $[\eta_2] = f(K, t)$ при $\tau = 50$ мин

Fig. 4. Graphical representation of dependence $[\eta_2] = f(K, t)$ at $\tau = 50$ min

дистого восстановителя с реакционной способностью $0,33 \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с})$ при тех же условиях – $47,8 \%$. Третьим по значению фактором является длительность металлизации (при его изменении от 15 до 40 мин).

Таким образом, для получения металлизированных продуктов требуемого качества процесс металлизации следует осуществлять при температуре 900°C (фактор x_2), длительности металлизации 40 мин (фактор x_3) и реакционной способности углеродистого восстановителя по оксиду углерода CO_2 $3,72 \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с})$ (фактор x_1).

Оптимальные значения технологических факторов и основные характеристики полученных при этом металлизированных продуктов приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Оптимальные значения технологических факторов процесса металлизации и основные характеристики металлизированных продуктов

Table 3. Optimum values of process factors of metallization process and main characteristics of metallized products

Параметры процесса металлизации и характеристики металлизированного продукта	Значение параметров
$t, ^\circ\text{C}$	900
$\tau, \text{мин}$	40
$K, \text{см}^3/(\text{г} \cdot \text{с})$	3,72
$P, \text{МПа}$	40
$\eta, \%$	96,7
Крупность металлизированных брикетов, мм	20
Содержание в металлизированном продукте, %:	
$\text{Fe}_{\text{общ}}; \text{Fe}_{\text{мет}}; \text{FeO}$	86,1; 83,4; 3,5
$\text{S}, \text{P}, \text{C}$	0,04; 0,001; 3,0
CaO, MgO	0,9; 0,1

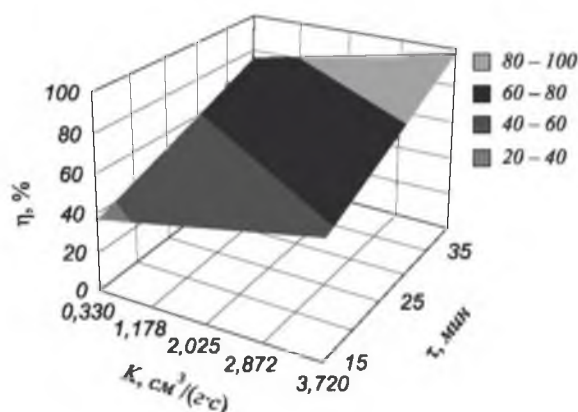


Рис. 5. Графическое представление зависимости $[\eta_2] = f(K, \tau)$ при $t = 900^\circ\text{C}$

Fig. 5. Graphical representation of dependence $[\eta_2] = f(K, \tau)$ at $t = 900^\circ\text{C}$

Металлизацию брикетированных композиций окалины + БПК, КМ, КП и шлам + БПК, КМ, КП проводили при температуре 900°C в течение 40 мин. Основные качественные характеристики полученных металлизированных продуктов приведены в табл. 4.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что содержание $\text{Fe}_{\text{мет}}$ в продукте максимально (от 71,3 до 90,2 %) при использовании в качестве углеродистого восстановителя БПК. Максимальное (90,2 %) содержание $\text{Fe}_{\text{мет}}$ в продукте достигается при металлизации окалины с использованием в качестве восстановителя БПК. При металлизации окалины с использованием в качестве восстановителя КМ содержание $\text{Fe}_{\text{мет}}$ в продукте составило 61,9 %, с использованием КП – 62,6 %.

Полученные результаты указывают на явное технологическое преимущество БПК перед другими углеродистыми восстановителями. Брикетированные композиции, содержащие окалину, могут быть использованы для получения губчатого железа. Брикетированные композиции, включающие шлам, могут быть использованы только для частичной металлизации, независимо от вида применяемого углеродистого восстановителя.

Таким образом, БПК является наиболее предпочтительным углеродистым восстановителем для реализации процесса металлизации. Полученные результаты подтверждают возможность получения как губчатого железа для сталеплавильного производства, так и частично металлизированных материалов для доменных печей методом твердофазного восстановления железа из оксиджелезосодержащих материалов и отходов с исходным содержанием общего железа от 41,2 до 73,3 %.

Выводы

Проведено термодинамическое моделирование процессов металлизации исследуемого сырья. В системе $\text{Fe}-\text{O}-\text{C}-\text{H}$ равновесная степень восстановления

Качество металлизированных продуктов при использовании различных углеродистых восстановителей и техногенного оксиджелезосодержащего сырья

Table 4. Quality of metallized products at using various carbonaceous reducing agents and technogenic iron-oxide-containing raw materials

Состав брикетированных композиций	η , %	Содержание в металлизированном продукте, %							
		Fe _{общ}	Fe _{мет}	FeO	S	P	C	CaO	MgO
Окалина + БПК	97,5	92,5	90,2	3,0	0,07	0,017	1,8	1,1	0,3
Окалина + КМ	70,7	87,5	61,9	33,0	0,14	0,025	3,8	0,3	0,3
Окалина + КП	71,1	88,0	62,6	32,8	0,11	0,026	3,6	0,4	0,3
Шлам + БПК	97,5	73,1	71,3	2,3	0,21	0,121	1,8	17,4	0,4
Шлам + КМ	68,9	70,2	48,4	28,1	0,28	0,130	3,8	16,6	0,3
Шлам + КП	69,2	69,7	48,2	27,7	0,25	0,131	3,6	16,7	0,3

железа из его оксида Fe_2O_3 при температуре 1200 К составляет 0,925, при 1300 – 1500 К достигает максимального значения – 0,967. Восстановление железа термодинамически возможно оксидом углерода СО и водородом. При температуре 1200 К конденсированные и газообразные продукты восстановления имеют следующие составы: 89,6 % (об.) Fe; 9,3 % FeO; 1,1 % C; 46,0 % CO; 32,8 % H_2 ; 11,3 % H_2O ; 9,9 % CO_2 . В связи с участием водорода в восстановлении в конденсированных продуктах присутствует свободный углерод в количестве 2,4 и 3,8 % при соотношении $\text{Fe}:\text{O}:\text{C}:\text{H} = 2:3:2,4/2,7:3,2/3,6$, что свидетельствует о целесообразности использования для металлизации шихт с недостатком (примерно 10 %) полукокса. Экспериментально исследованы процессы металлизации шихт составов: оксидсодержащие компоненты (оксид железа Fe_2O_3 , окалина, шлам) – буроугольный полукок, коксовые мелочь и пыль. Проведена металлизация при температуре 1173 К и длительности 40 мин и выполнен сопоставительный анализ ее показателей для брикетированных шихт шести видов: окалина – буроугольный полукок, коксовые мелочь и пыль, шлам – буроугольный полукок, коксовые мелочь и пыль. Определены степень металлизации и содержание металлического железа, составляющие при использовании буроугольного полукокса 97,5 и 90,2 % для окалины, 97,5 и 71,3 % для шлама, коксовой мелочи 70,7 и 61,9 % для окалины, 68,9 и 48,4 % для шлама, коксовой пыли 72,1 и 62,6 % для окалины, 69,2 и 48,2 % для шлама. Получены математические модели, описывающие зависимость степени металлизации от температуры, ее длительности, реакционной способности восстановителя и содержания в нем летучих веществ. Установлены оптимальные температурно-временные условия металлизации брикетированной шихты окалина – буроугольный полукок с реакционной способностью $3,72 \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с})$: температура 1173 К при длительности 40 мин. Установлены физико-химические преимущества буроугольного

полукокса по сравнению с традиционными углеродистыми восстановителями. Проведена физико-химическая аттестация продуктов металлизации, включающая исследование их фазового, химического, гранулометрического составов и морфологии. Продукты металлизации брикетированной шихты окалина – буроугольный полукок по степени металлизации, содержанию серы, фосфора, углерода, пустой породы соответствуют требованиям, предъявляемым к металлизированным продуктам для производства электростали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Люнген Х.Б., Петере М., Шмеле П. Производство чугуна // Черные металлы. 2010. № 9. С. 52 – 66.
2. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа. – М.: Металлургия, 2007. – 320 с.
3. Kirschen M., Badr K., Pfeifer H. Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry // Energy. 2011. Vol. 36. No. 10. P. 6146 – 6155.
4. Takamatsu N., Nobuhiko T., Hatanaka A., Kaku H., Saitoh G. Development of iron-making technology // Nippon Steel Technical Report. 2012. No. 101. P. 79 – 88.
5. Dinel't V.M., Strakhov V.M., Livenets V.I., Nikishanin M.S., Anikin A.E., Surovtseva I.V. Production of unroasted briquets based on small lignite semicoke particles from Kansko-Achinsk coal // Coke and Chemistry. 2008. Vol. 51. No. 9. P. 370 – 375.
6. Dinel't V.M., Anikin A.E., Strakhov V.M. Reduction of iron ore by means of lignite semicoke // Coke and chemistry. 2011. Vol. 54. No. 5. P. 165 – 168.
7. Zhang Yang, Man Rui-lin, Ni Wang-dong, Wang Hui. Selective leaching of base metals from copper smelter slag // Hydrometallurgy. 2010. Vol. 103. No. 1-4. P. 25 – 29.
8. Zhang Y.Y. Development prospect of rotary hearth furnace process in China // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 746. P. 533 – 538.
9. Nokhrina O.I., Rozhihina I.D., Hodosov I.E. The use of coal in a solid phase reduction of iron oxide // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 91. No. 1. Article 012045.
10. Golodova M.A., Rozhihina I.D., Nokhrina O.I., Rybenko I.A. A study on reduction processes of elements in the system $\text{V}_2\text{O}_5\text{--Si}$ // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 150. No. 1. Article 012006.

11. Wiesinger H. Status, realized improvements and future potentials of the Corex technology // *Stahl und Eisen*. 2002. Vol. 122. No. 6. P. 23 – 28.
12. Tsybmal V.P., Kozhemyachenko V.I., Rybenko I.A. etc. Background and principles of self-organizing jet-emulsion metallurgical unit // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 150. No. 1. Article 012018.
13. Ровин С.П., Калининченко А.С., Ровин Л.Е. Возвращение дисперсных металлоотходов в производство // *Литье и металлургия*. 2019. № 1. С. 45 – 48.
14. Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В. Исследование физико-химических характеристик оксиджелезосодержащего техногенного сырья // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2018. № 9. С. 107 – 112.
15. Дигонский С.В., Тен В.В. Неизвестный водород. – СПб.: Наука, 2006. – 292 с.
16. Дигонский С.В. Газофазные процессы синтеза и спекания тугоплавких веществ (карбид кремния, пирографит, алмаз, кубический нитрид бора). – М.: ГЕОС, 2013. – 464 с.
17. Вяткин Г.П., Михайлов Г.Г., Кузнецов Ю.С., Качурина О.И. Системный анализ процессов восстановления оксидов железа в атмосфере водяного газа в присутствии углерода // *Вестник ЮУрГУ. Металлургия*. 2012. № 15. С. 53 – 59.
18. Якушевич Н.Ф., Строкина И.В., Полях О.А. Термодинамические закономерности фазово-химического равновесия в системе Fe–C–O₂–H₂ // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2012. № 4. С. 9 – 17.
19. Якушевич Н.Ф., Строкина И.В., Полях О.А. Определение параметров окислительно-восстановительных процессов в системе Fe–C–O₂–H₂ // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2011. № 8. С. 13 – 18.
20. Вершинин В.И., Перцев Н.В. Планирование и математическая обработка результатов химического эксперимента. – Омск: Изд-во ОмГУ, 2005. – 108 с.

Поступила в редакцию 28 января 2020 г.

После доработки 21 февраля 2020 г.

Принята к публикации 25 февраля 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 5, pp. 335–343.

TECHNOLOGICAL MODES OF EFFICIENT METALLIZATION OF IRON-OXIDE-CONTAINING WASTE FROM METALLURGICAL PRODUCTION

A.E. Anikin, G.V. Galevskii, V.V. Rudneva

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo region, Russia

Abstract. During the research, rolled scale and gas cleaning slimes from oxygen-converter workshop No. 1 of JSC “EVRAZ ZSMK” were used as iron-oxide-containing materials. Semi-coke from brown coals of the Berezhovskoye deposit of the Kansk-Achinsk basin (temperature of semi-coking is 750 °C), coke fines of PJSC “Coke” and dust from coke dry-quenching plant of JSC “EVRAZ ZSMK” were used as carbon reducing agents. Total iron, FeO and Fe₂O₃ oxides amount to 73.3, 75.5 and 20.9 % in scale, 41.2, 4.7 and 53.7 % in sludge, respectively. Sludge also contains 4.3 % of total carbon and 20.6 % of CaO. Brown-coal semi-coke, coke fines and coke dust contains carbon and volatiles 94.05 and 9.5 %, 97.50 and 2.1 %, 97.47 and 1.6 % on dry ashless weight, respectively. For metallization of furnace charges with composition: scale, slime–semi-coke, coke fines, dust with addition of 10 % water-soluble binding–molasses, strong unroasted briquettes were pressed. Metallization modes of analyzed charge compositions were thermodynamically predicted and technologically determined. Metallization degree and metal iron content at usage of brown-coal semi-coke were found to be 97.5 and 90.2 % for scale, 97.5 and 71.3 % for sludge; of coke fines: 70.7 and 61.9 % for scale, 68.9 and 48.4 % for sludge; of coke dust: 72.1 and 62.6 % for scale, 69.2 and 48.2 % for sludge. The possibility of achievement the metallization degree of 97.0 – 98.0 % was established for briquetted charge from scale – brown-coal semi-coke with 92.0 – 93.0 % of total iron, 89.8 – 90.6 % of metallic iron, 2.8 – 3.2 % of FeO, 0.06 – 0.08 % of S, 0.016 – 0.018 % of P, 1.7 – 1.9 % of C, 1.0 – 1.2 % of CaO and 0.25 – 0.35 % of MgO at 1173 K and duration of 40 min.

Keywords: metallization, rolling scale, gas cleaning slimes of converter production, brown-coal semi-coke, coke fines, coke dust, metallized products for production of electric steel.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-335-343

REFERENCES

1. Lyungen Kh.B., Peters M., Shmele P. Production of pig iron. *Chernye metally*. 2010. no. 9. pp. 52–66. (In Russ.).

2. Yusfin Yu.S., Pashkov N.F. *Metallurgiya zheleza* [Iron metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 2007, 320 p. (In Russ.).
3. Kirschen M., Badr K., Pfeifer H. Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry. *Energy*. 2011. vol. 36. no. 10. pp. 6146–6155.
4. Takamatsu N., Nobuhiko T., Hatanaka A., Kaku H., Saitoh G. Development of iron-making technology. *Nippon Steel Technical Report*. 2012. no. 101. pp. 79–88.
5. Dinel't V.M., Strakhov V.M., Livenets V.I., Nikishanin M.S., Anikin A.E., Surovtseva I.V. Production of unroasted briquets based on small lignite semicoke particles from Kansk-Achinsk coal. *Coke and Chemistry*. 2008. vol. 51. no. 9. pp. 370–375.
6. Dinel't V.M., Anikin A.E., Strakhov V.M. Reduction of iron ore by means of lignite semicoke. *Coke and Chemistry*. 2011. vol. 54. no. 5. pp. 165–169.
7. Zhang Yang, Man Rui-lin, Ni Wang-dong, Wang Hui. Selective leaching of base metals from copper smelter slag. *Hydrometallurgy*. 2010. vol. 103. no. 1-4. pp. 25–29.
8. Zhang Y.Y. Development prospect of rotary hearth furnace process in China. *Advanced Materials Research*. 2013. vol. 746. pp. 533–538.
9. Nokhrina O.I., Rozhihina I.D., Hodosov I.E. The use of coal in a solid phase reduction of iron oxide. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015. vol. 91. no. 1. article 012045.
10. Golodova M.A., Rozhihina I.D., Nokhrina O.I., Rybenko I.A. A study on reduction processes of elements in the system V₂O₅–Si. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. vol. 150. no. 1. article 012006.
11. Wiesinger H. Status, realized improvements and future potentials of the Corex technology. *Stahl und Eisen*. 2002. vol. 122. no. 6. pp. 23–28.
12. Tsybmal V.P., Kozhemyachenko V.I., Ryabenko I.A. etc. Background and principles of self-organizing jet-emulsion metallurgical unit. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. vol. 150. no. 1. article 012018.
13. Rovin S.P., Kalinichenko A.S., Rovin L.E. Return of dispersed metal waste to production. *Lit'e i metallurgiya*. 2019. no. 1. pp. 45–48. (In Russ.).
14. Anikin A.E., Galevskii G.V., Rudneva V.V. Study of physicochemical characteristics of iron-oxide-containing technogenic raw materials. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2018. no. 9. pp. 107–112. (In Russ.).

15. Digonskii S.V., Ten V.V. *Neizvestnyi vodorod* [Unknown hydrogen]. St. Petersburg: Nauka, 2006, 292 p. (In Russ.).
16. Digonskii S.V. *Gazofaznye protsessy sinteza i spekaniya tugo-plavkikh veshchestv (karbid kremniya, pirografit,almaz, kubicheskii nitrid bora)* [Gas-phase processes of synthesis and sintering of refractory substances (silicon carbide, pyrographite, diamond, cubic boron nitride)]. Moscow: GEOS, 2013, 464 p. (In Russ.).
17. Vyatkin G.P., Mikhailov G.G., Kuznetsov Yu.S., Kachurina O.I. System analysis of iron oxides reduction in atmosphere of water gas in presence of carbon. *Vestnik YuUrGU. Metallurgiya*. 2012, no. 15. pp. 53–59. (In Russ.).
18. Yakushevich N.F., Strokina I.V., Polyakh O.A. Thermodynamic laws of phase-chemical equilibrium in the Fe–C–O₂–H₂ system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 4, pp. 9–17. (In Russ.).
19. Yakushevich N.F., Strokina I.V., Polyakh O.A. Determination of parameters of redox processes in Fe–C–O₂–H₂ system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 8, pp. 13–18. (In Russ.).
20. Vershinin V.I., Pertsev N.V. *Planirovanie i matematicheskaya obrabotka rezul'tatov khimicheskogo eksperimenta* [Planning and mathematical processing of results of a chemical experiment]. Omsk: Izd-vo OmGU, 2005, 108 p. (In Russ.).

Information about the authors:

A.E. Anikin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Non-Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering"
(kafcmetsibsib.ru)

G.V. Galevskii, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Non-Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering"

I.V. Rudneva, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Non-Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering"

Received January 28, 2020

Revised February 21, 2020

Accepted February 25, 2020

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 25.05.2020. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,0. Заказ. 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

