

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 Ариэля, Израиль)
ЗОЛОТУХИН В.И. (Тульский государственный университет, г. Тула)
КОЛМАКОВ А.Г. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

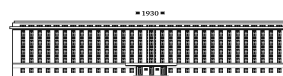
КОЛОКОЛЬЦЕВ В.М. (Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)
КОСТИНА М.В. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
КОСЫРЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)
КУРГАНОВА Ю.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)
КУРНОСОВ В.В. (Национальный 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 Циньхуа, 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. (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@sisis.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
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,
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., Темлянец 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., Башенко 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., Золин И.А., Буркова И.В., Зимин В.В. Планирование развертывания сервисных активов, основанное на данных о применении ИТ-сервисов	373
--	-----

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Глушакова 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., Калашиков 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 378.4

СибГИУ – 90!

*Гордимся прошлым,
развиваемся в настоящем, создаем будущее!*

Е.В. Протопопов, д.т.н., профессор, ректор (protopopov@sibsiu.ru)

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

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-291-297

23 июня 2020 года исполняется 90 лет со дня основания Сибирского государственного индустриального университета. Судьба университета тесно связана с развитием и становлением г. Новокузнецк и его промышленного потенциала и прежде всего Кузнецкого металлургического комбината (КМК) и Западно-Сибирского металлургического комбината (ЗСМК). Легендарный Кузнецкстрой стал мощным толчком развития города и Кузбасса в целом. Для строительства и работы на КМК требовались инженерные кадры и по инициативе академика И.П. Бардина – главного инженера Кузнецкстроя, на базе специальности «Металлургия черных металлов», реализуемой в Томском технологическом

институте, был создан Сибирский институт черных металлов (СИЧМ), переведенный осенью 1931 г. в город Сталинск (г. Новокузнецк). Именно СИЧМ стал первым созданным в Кузбассе высшим учебным заведением!

В 1932 г. в СИЧМе функционировало всего два факультета: металлургический и технологический, в состав которых входили кафедры металлургии чугуна, металлургии стали, обработки металлов давлением и термообработки, литейной кафедры, кафедр общей химии, общинженерных дисциплин, математики и физики. Осуществлялась четкая ориентация учебного процесса на потребности КМК: первые 49 выпускников инженеров-металлургов – специалисты в области



Протопопов Евгений Валентинович, ректор

Protopopov Evgenii Valentinovich, Rector



*А.А. Черникова, ректор
НИТУ «МИСиС», профессор, д.э.н.*

От имени коллектива НИТУ «МИСиС» и от себя лично поздравляю Вас и коллектив Сибирского государственного индустриального университета с 90-летием со дня основания!

История наших университетов тесно связана – Сибирский государственный институт черных металлов и Московский институт стали были созданы одновременно, в 1930 году. В тесном сотрудничестве мы вместе создавали отечественные научные школы, готовили профессиональные инженерные кадры для крепнущей индустрии нашей страны. В истории обоих университетов особую роль сыграли такие выдающиеся ученые, как академики И.П. Бардин и А.П. Самарин, профессор Б.Н. Жеребин и многие другие.

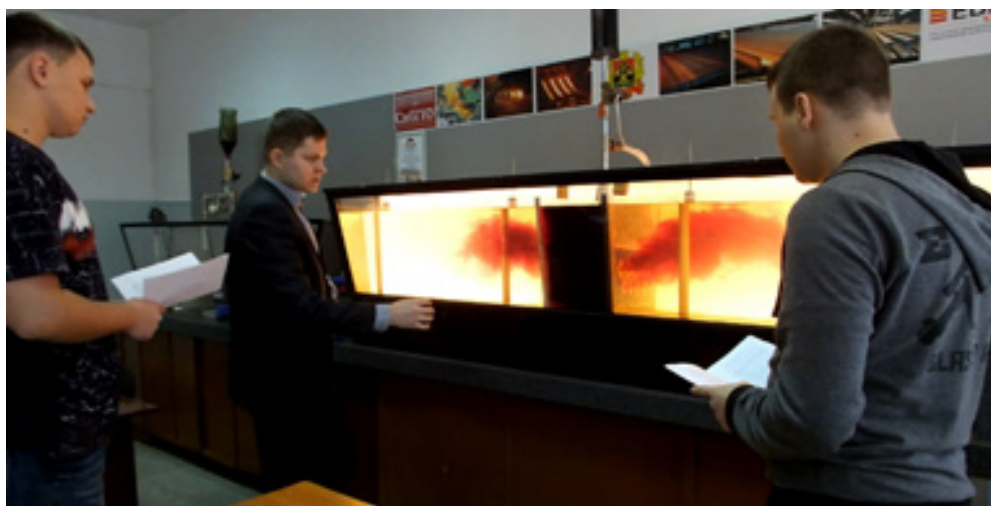
Основанный как центр подготовки инженерных кадров для металлургической промышленности, сегодня ваш университет является многопрофильным научно-образовательным центром, одним из ведущих вузов региона. Коллектив СибГИУ достойно продолжает традиции своих великих предшественников, активно занимаясь образовательной и научно-исследовательской деятельностью. Выпускники университета востребованы в экономической, научной, культурной и политической сферах страны, среди ваших выпускников – руководители крупнейших промышленных предприятий, видные государственные деятели.

Желаю коллективу Сибирского государственного индустриального университета новых успехов, достижения самых амбициозных целей, благополучия и многих лет плодотворной работы, приумножающей славные традиции отечественной науки и образования!

производства чугуна и стали прокатного производства открыли славную историю института – «кузницы инженерных кадров».

Многие годы институт оставался единственным в Сибири вузом, обеспечивающим высококвалифицированными кадрами металлургические предприятия Сибири, Дальнего Востока и Средней Азии. За первое десятилетие своего существования институтом подготовлено порядка примерно 700 инженеров-металлургов.

Великая Отечественная война стала «проверкой на прочность» для всего коллектива института. Не смотря на все тяготы военного времени, учебный процесс в СМИ не прекращался. Более того, в начале войны из Москвы в Новокузнецк был эвакуирован Московский институт стали, а перед учеными СМИ была поставлена задача оборонного значения – освоение на КМК производства броневой стали. Для ее решения, причем в кратчайшие сроки, были привлечены ведущие специалисты: сталеплавыльщики, прокатчики, термисты, теплотехники, литейщики. Например, в составе кафедры металлургии стали была экспериментальная 40-т мартеновская печь, где студенты и ученые отрабатывали новые технологии для оборонных заказов. Выплавка, разливка, прокатка и термообработка броневой стали, резка толстых слябов танковой брони, разработка технологий выплавки и отливки снарядов, технология изготовления мин, в том числе самых востребованных и широко используемых 82-мм, – вот некоторые «революционные» для того времени процессы, которые удалось успешно освоить СМИчам. Большой вклад в осуществление этих разработок внесли профессора и доценты Ю.В. Грдина, И.С. Назаров, Е.Я. Зарвин, Э.Х. Шамовский, Н.И. Куницын, А.А. Говоров и многие другие. В годы Великой Отечественной войны СМИ подготовил для промышленности 205 инжене-



Проведение исследований на лабораторно-экспериментальном стенде для изучения гидродинамических процессов в промежуточном ковше МНЛЗ

Conducting a research at the laboratory test bench for studying hydrodynamic processes in CCM tundish

ров, а из выплавленной стали КМК было произведено 50 тыс. танков из 108 тыс. по СССР, 45 тыс. из 95 тыс. самолетов, 100 млн из 220 млн снарядов.

В послевоенные годы в период активного восстановления народного хозяйства резко возросла потребность в инженерных кадрах. Бурное развитие угольной и горнорудной отраслей промышленности в Кузбассе потребовало подготовки горных инженеров. В СМИ открыты новые специальности горного профиля «Разработка месторождений полезных ископаемых» и «Горная электромеханика», а в 1948 г. создан горный факультет. В 1956 г. открыта специализация «Разработка угля гидравлическим способом» и создана единственная в то время в стране кафедра «Технология подземной добычи угля гидравлическим способом». В 50-е годы открыты новые специальности «Металлургические печи», «Физика металлов», «Автоматизация технологических процессов и производств». Интенсивным развитием института в различных направлениях ознаменованы 60-е годы. В 1960 г. созданы механический и строительный факультеты. В 1965 г. построено новое здание главного корпуса площадью 26 000 м². В 70-е годы в институте созданы литейный и электрометаллургический факультеты. В 1980 году за заслуги в подготовке квалифицированных специалистов для народного хозяйства и развитии научных исследований Сибирский металлургический институт имени Серго Орджоникидзе награжден правительством СССР орденом Трудового Красного Знамени. В 80-е годы в институте уже функционировало 44 кафедры, на которых работали более 700 преподавателей, среди них 11 профессоров и 293 кандидата наук. В 1983 г. в составе СМИ уже 12 факультетов: металлургический, электрометаллургический, литейный, технологический, механический, строительный, горный, общественных профессий, заочный факультет, вечерние – металлургический и механико-строительный факультеты в г. Новокузнецке, вечерний факультет в г. Прокопьевск. В 1989 г. создан факультет довузовской подготовки, функционировали уже 54 кафедры.

В период с 1973 по 1986 гг. введены в эксплуатацию новые корпуса института – металлургический и горно-технологический общей площадью 15 000 м², спортивный комплекс с плавательным бассейном, блок поточных аудиторий и два 9-ти этажных общежития.

В 90-е годы СМИ дважды сменил свой статус: в 1994 г. стал Сибирской государственной горно-металлургической академией (СибГГМА), а через 4 года, в 1998 г., – вторым в истории отечественной высшей школы получил статус индустриального университета и был переименован в Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ).

Такие серьезные трансформации института в университет стали возможны благодаря реализации целого комплекса мероприятий и административных решений, адекватных новым веяниям времени. В первую оче-



Е.А. Пахомова,
заместитель Губернатора
по вопросам образования и науки

В эти дни Сибирский государственный индустриальный университет отмечает 90-летие! Примите мои самые искренние пожелания новых открытий и свершений, уверенного движения по пути цифровизации и прогресса!

«Гордимся прошлым, развиваемся в настоящем, создаем будущее». Слоган вашего университета максимально точно говорит о богатой на победы истории вуза, желании соответствовать требованиям и вызовам сегодняшнего дня. Но самое важное и ценное – это нацеленность, устремлённое движение в ЗАВТРА.

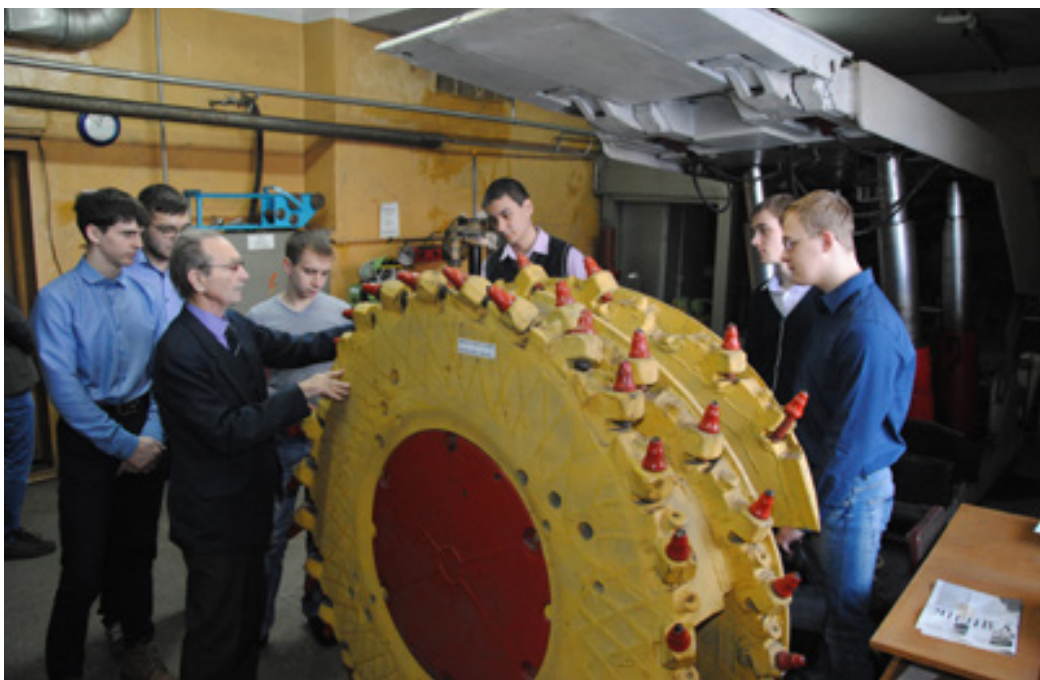
В эпоху кризисов, перемен и одновременно быстрого развития науки, техники, первостепенное значение для промышленности и экономики нашего родного Кузбасса приобретает подготовка кадров. К молодым инженерам, специалистам и научным работникам предъявляются высокие требования. Они должны уверенно ориентироваться в современных экономических условиях, уметь добиваться высоких личных и коллективных результатов в труде, а главное понимать, что учиться и совершенствоваться важно непрерывно всю жизнь!

С таким подходом вот уже 90 лет работает и преподавательский состав Сибирского государственного индустриального университета. Традиция постоянно «РАСТИ НАД СОБОЙ» здесь возведена в ранг закона.

Успехов и новых свершений, реализации намеченных планов и всего самого наилучшего. Пусть еще сотни и тысячи молодых людей с дипломом СибГИУ в руках и солидным багажом знаний уверенно чувствуют себя на рынке труда и со знанием дела окунаются в избранную профессию!

редь значительно изменился перечень специальностей и направлений подготовки, реализуемых в вузе. Если до 1990 г. СМИ реализовывал всего 20 специальностей, то в 1998 г. количество специальностей достигло 40. Вуз из металлургического трансформировался в политехнический (индустриальный), ориентированный в первую очередь на развивающийся многоотраслевой промышленный регион – Кузбасс.

XXI век – период серьезной проверки правильности взятого курса и результатов функционирования в изменившихся социально-экономических условиях, который СибГИУ успешно выдержал, подтвердив новый статус университета во время процедур комплексных оценок деятельности, государственной аккредитации в 2002, 2007, 2012, 2018 гг. и показав высокую эффективность работы по различным направлениям и результатам ежегодного мониторинга эффективности деятельности вузов России. В 2005 году университет стал лауреатом конкурса Министерства образования и науки



На занятии по изучению работы горных машин

At a lesson on mining machines operation

РФ «Внутривузовские системы обеспечения качества подготовки специалистов», имеющим статус Премии Министерства образования и науки РФ в области качества, в 2014 г. дипломантом конкурса Европейской премии в области качества (EFQM) в номинации «Признанное Совершенство».

В настоящее время СибГИУ реализует программы среднего профессионального, высшего и дополнительного образования, осуществляет подготовку специалистов, бакалавров, магистров, аспирантов, докторантов.



Л.А. Смирнов,
д.т.н., профессор, академик РАН,
лауреат Государственных премий
СССР, Российской Федерации,
Правительства РФ

В этом году Сибирскому государственному индустриальному университету исполнилось 90 лет. В декабре 2020 г. исполняется 90 лет со дня создания Уральского научно-исследовательского института черных металлов – в настоящее время АО «Уральский институт металлов». Наши истории похожи – мы рождены эпохой индустриализации, энтузиазма и промышленного оптимизма.

Поэтому с особой радостью поздравляю весь коллектив СибГИУ, работающий под руководством ректора Е.В. Протопопова, с этой знаменательной датой! Желаю дальнейших творческих успехов в научных поисках, веры в будущее, новых идей и проектов!

В соответствии с лицензией университет может реализовывать 108 направлений подготовки по 25 УГСН (Укрупненным группам научных специальностей) 01.00.00 – Математика и механика, 03.00.00 – Физика и астрономия, 04.00.00 – Химия, 05.00.00 – Науки о земле, 07.00.00 – Архитектура, 08.00.00 – Техника и технологии строительства, 09.00.00 – Информатика и вычислительная техника, 11.00.00 – Электроника, радиотехника и системы связи, 13.00.00 – Электро- и теплоэнергетика, 15.00.00 – Машиностроение, 18.00.00 – Химические технологии, 20.00.00 – Техносферная безопасность и природообустройство, 21.00.00 – Прикладная геология, горное дело, нефтегазовое дело и геодезия, 22.00.00 – Технологии материалов, 23.00.00 – Техника и технологии наземного транспорта, 27.00.00 – Управление в технических системах, 37.00.00 – Психологические науки, 38.00.00 – Экономика и управление, 39.00.00 – Социология и социальная работа, 40.00.00 – Юриспруденция, 42.00.00 – Средства массовой информации и информационно-библиотечное дело, 43.00.00 – Сервис и туризм, 44.00.00 – Образование и педагогические науки, 45.00.00 – Языкознание и литературоведение, 46.00.00 – История и археология, в том числе: среднего профессионального образования – 17; высшего образования: бакалавриат – 43; специалитет – 5; магистратура – 30; аспирантура – 13, докторантура по 9 научным специальностям.

За время своего существования вуз подготовил более 95 000 специалистов, в том числе почти 30 000 – выпускники металлургических и 12 000 горных специальностей и направлений подготовки. Многие из них



*С.Ю. Балакирева,
начальник департамента
образования и науки
Кемеровской области*

От всей души поздравляю вас со знаменательной датой – 90-летним юбилеем со дня основания Сибирского государственного индустриального университета!

За это время Alma mater для десятков тысяч студентов несколько раз изменяла свое имя, но прочными, как высоколегированная сталь, надежными, как современная шахтовая крепь, всегда были и остаются ваши вузовские традиции. Я сейчас говорю и о строгом взвешенном отборе на этапе зачисления, и о высоких требованиях к знаниям студентов в процессе учебы. Выпускник СибГИУ – это без преувеличения бренд!

Заслугу преподавателей в этом вопросе невозможно переоценить. Огромное спасибо всем ветеранам-педагогам и тем, кто сейчас вкладывает душу, знания и опыт в подрастающих инженеров, экономистов, управленцев. Сейчас очень непростое время, а значит, появляется еще большая потребность в талантливых, неординарно мыслящих молодых профессионалах. Цифровизация, технологии XXI века, современные подходы к ведению и развитию крупных предприятий, средних и малых производств Кузбасса – задачи, которые предстоит решать сегодняшним студентам.

В этот особенный день желаю руководству и преподавательскому составу СибГИУ успехов в их труде, новых ярких побед, гордости за своих студентов! А молодым людям, которые выбрали или только планируют поступать в этот университет, желаю учиться с вдохновением, обрести глубокие знания и обязательно стать востребованными профессионалами! Здоровья, благополучия, огромного счастья и всего самого наилучшего!

С юбилеем!

составляют основу инженерного и руководящего корпуса предприятий горно-металлургического комплекса нашего города и Кузбасса.

Мы гордимся нашими выпускниками, которые в разные годы становились крупными государственными и политическими деятелями, руководителями отраслевых министерств, директорами комбинатов, заводов, научных учреждений, учеными, имеющими мировую известность.

В настоящее время СибГИУ представляет собой современный учебно-научный комплекс, расположенный в центре г. Новокузнецк, его площадь составляет 17,5 га, образовательный и научный процесс организован в помещениях общей площадью примерно 130 тыс. м². Комплекс включает 10 институтов: Институт металлургии и материаловедения; Институт машиностроения и транспорта; Институт горного дела и геосистем; Архитектурно-строительный институт; Институт информационных технологий и автоматизи-

рованных систем; Институт экономики и менеджмента; Институт педагогического образования; Институт дополнительного образования; Институт открытого образования; Институт физической культуры, здоровья и спорта; Университетский колледж. В структуре университета 34 учебно-научные лаборатории, 11 научно-образовательных центров, 2 научных центра, 4 научно-методических центра, 4 центра инновационного консалтинга, Центр сертификации, проектно-внедренческий центр инновационных технологий, Центр коллективного пользования «Материаловедение», Центр коллективного пользования «Прототипирование и аддитивные технологии», Студенческий бизнес-инкубатор, экспериментальная лаборатория автоматизированных энергогенерирующих технологий.

СибГИУ является стратегическим партнером Кузбасского технопарка – одного из самых крупных региональных технопарков в России. В 2019 году университет вошел в состав Научно-образовательного центра мирового уровня «Кузбасс», созданного на основе Постановления Правительства Российской Федерации от 30 апреля 2019 г. № 537 «О мерах государственной поддержки научно-образовательных центров мирового уровня на основе интеграции образовательных организаций высшего образования и научных организаций и их кооперации с организациями, действующими в реальном секторе экономики».

В университете функционирует 3 диссертационных совета по 9 научным специальностям: 01.04.07 – Физика конденсированного состояния; 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (металлургического производства); 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в металлургии); 05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах; 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов; 05.16.04 – Литейное производство; 05.16.05 – Обработка металлов давлением.

Реализацию фундаментальных и прикладных исследований осуществляет 14 научных школ:

- «Развитие теории и разработка ресурсо- и энергосберегающих технологий производства черных металлов с использованием техногенных отходов»,
- «Энерго- и ресурсосберегающие технологии нагрева и обработки давлением металлов и сплавов»,
- «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий»,
- «Создание интенсивных нетрадиционных информационно-материальных технологий добычи и переработки минерального сырья»,
- «Теория структуры механических систем и практика ее использования при синтезе сложных машин, включая горные и металлургические»,



*Л.И. Леонтьев,
академик РАН,
советник, д.т.н., профессор,
главный научный сотрудник
Института металлургии УрО РАН,
Главный редактор журнала*

Редакционный совет и редакция журнала «Известия вузов. Черная металлургия» поздравляют коллег с 90-летним юбилеем Сибирского государственного индустриального университета и желают дальнейшего динамичного развития и успехов. Так держать!

- «Создание и применение наноматериалов в металлургии, химической технологии и машиностроении»,
- «Теория и практика электрометаллургии стали и ферросплавов»,
- «Теория и практика систем автоматизации управления на базе натурно-модельного подхода»,
- «Математическое моделирование, создание прикладных инструментальных систем и новых металлургических процессов и агрегатов на принципах самоорганизации»,
- «Новые металлические материалы и технологии их обработки»,
- «Информационно-материальные технологии в электромеханических системах горно-металлургического комплекса»,
- «Экономика, организация производства, планирование и управление на предприятиях»,

– «Закономерности формирования месторождений осадочного комплекса полезных ископаемых»,

– «Ресурсосберегающие технологии производства новых строительных материалов, строительства и реконструкции предприятий».

Сегодня в университете трудится 61 доктор наук и 187 кандидатов наук. Из числа научно-педагогических кадров университета 12 человек – заслуженные работники высшей школы Российской Федерации, 11 – заслуженные деятели науки Российской Федерации, 6 человек являются лауреатами Премии правительства Российской Федерации в области науки и техники, 48 преподавателей являются членами различных общественных академий.

СибГИУ является соучредителем журналов «Известия высших учебных заведений. Черная металлургия» (включен в международную реферативную базу данных Scopus) и «Фундаментальные проблемы современного материаловедения» (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»), издает журналы «Вестник Сибирского государственного индустриального университета», «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» и периодические издания: сборники научных трудов «Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии», «Вестник Российской академии естественных наук. За-



Наблюдение за работой 3D-принтера в лаборатории

Monitoring a 3D printer in the laboratory



Занятие в одной из аудиторий института металлургии и материаловедения

Lecture hall of the Institute of Metallurgy and Materials Science

падно-Сибирское отделение», «Современные вопросы теории и практики обучения в вузе».

По показателям публикационной активности РИНЦ из более 10 тыс. организаций России СибГИУ находится на 145 месте.

За последние 5 лет в реновацию университетского кампуса инвестировано более 250 млн. руб. В университете открыто 30 новых аудиторий и лабораторий. Объем средств от научной деятельности превысил 320 млн. руб., общее количество НИОКР более 450, грантов различного уровня, включая РФФИ, РНФ – 60. За 5 лет в университете защищено 73 диссертации, в том числе 54 кандидатских и 19 докторских. Авторскими коллективами ученых университета подготовлено 145 монографий и получено более 300 патентов на изобретения и полезные модели.

Основными научными и промышленными партнерами университета являются крупнейшие научно-исследовательские институты, высшие учебные заведения и промышленные предприятия Кузбасса и России: ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», ФГБНУ «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН», ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН», ФГБНУ «Институт физики прочности и материаловедения СО РАН», АО «Уральский институт металлов», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», ФГАОУ

ВО «Сибирский федеральный университет», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», ООО «Евразхолдинг», АО «Объединенная компания РУСАЛ», ООО «УК «Сибирская горно-металлургическая компания», АО «Кузнецкие ферросплавы», ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой», ОАО «Новокузнецкий завод резервуарных металлоконструкций им. Н.Е. Крюкова», ОАО «Гурьевский металлургический завод» и многие другие.

В числе основных стратегических партнеров СибГИУ ведущие университеты и образовательные центры мира: Ляонинский университет науки и технологии, Даляньский университет иностранных языков, Университет Вэньчжоу (КНР), Кембридж Ассессмент Оверсиз Лимитед (Великобритания); передовые научные и инжиниринговые центры ближнего зарубежья: Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана, Карагандинский государственный технический университет, ТОО «Горное бюро» (Республика Казахстан), Кыргызско-Узбекский университет (Киргизия).

Свой 90-летний юбилей научно-педагогический коллектив университета встречает полный планов, новых идей и перспектив на дальнейшее развитие!

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАФИНИРОВАНИЯ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШАХ МНЛЗ НА ОСНОВЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Протопопов Е.В.¹, д.т.н., профессор кафедры металлургии
черных металлов (protopopov@sibsiu.ru)

Числавлев В.В.¹, к.т.н., старший преподаватель кафедры металлургии черных металлов

Темлянец М.В.¹, д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики
и экологии (uchebn_otdel@sibsiu.ru)

Головатенко А.В.², к.т.н., директор по рельсовому
производству (Aleksey.Golovatenko@evraz.com)

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

² АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
(654043, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ш. Космическое, 16)

Аннотация. Качество и эксплуатационные свойства рельсов определяют срок их эксплуатационной службы в пути. Основными определяющими качества стали параметрами являются химическая неоднородность и неметаллические включения в металле. Эффективность гомогенизации металлического расплава и его рафинирования от неметаллических включений в промежуточном ковше МНЛЗ в значительной степени определяется организацией гидродинамических процессов, внутренней геометрией ковша, наличием дополнительных огнеупорных элементов. С применением физического и математического моделирования проведено исследование влияния дополнительных огнеупорных элементов различных конфигураций промежуточного ковша на процессы движения расплава. Физическое моделирование гидродинамических процессов в промежуточном ковше с учетом соблюдения условий подобия проведено на специально созданном лабораторно-экспериментальном комплексе. Численные эксперименты проведены с использованием методов вычислительной гидродинамики (конечных объемов) на трехмерной турбулентной математической модели с однофазным представлением течения металлического расплава в промежуточном ковше. Для оценки эффективности гомогенизации расплава по результатам физического и математического моделирования разработана новая методика, основанная на анализе распределения времени пребывания жидкости в проточном реакторе непрерывного действия. По результатам экспериментов предложена конфигурация внутреннего объема промежуточного ковша четырехручьевого МНЛЗ. Рассмотрена конструкция, обеспечивающая эффективную гомогенизацию расплава рельсовой стали и его рафинирование от неметаллических включений. Разработана и в промышленных условиях апробирована конструкция полнопрофильных перегородок, которые обеспечивают рациональную организацию потоков расплава, его гомогенизацию и эффективное рафинирование рельсовой стали от неметаллических включений в промежуточном ковше. Промышленные исследования реализованы в условиях четырехручьевого машины непрерывного литья заготовок № 1 электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Ключевые слова: рельсовая сталь, разливка, машина непрерывного литья заготовок, неметаллические включения, неоднородность, промежуточный ковш, расплав.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-298-304

ВВЕДЕНИЕ

Развитие железнодорожного транспорта и рост протяженности высокоскоростных железных дорог предъявляют все более высокие требования к качеству и эксплуатационным свойствам рельсов в условиях конкуренции среди мировых производителей рельсовой металлопродукции [1, 2].

В соответствии с современными представлениями [3 – 7] химическая неоднородность и неметаллические включения в металле являются основными параметрами, определяющими металлургическое качество стали и срок эксплуатационной службы рельсов в пути.

При существующих схемах выплавки, выпечной обработки и разливки рельсовой стали одним из важнейших технологических агрегатов на пути движения расплава является промежуточный ковш (ПК) машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Организация гидродинамических процессов, эффективность гомогенизации металлического расплава и его рафинирования от неметаллических включений в промежуточном ковше в значительной степени определяются внутренней геометрией ковша, наличием дополнительных огнеупорных элементов (перегородок, порогов и т.д.), которые обуславливают характеристики движения металлического расплава и,

соответственно, распределение и удаление неметаллических включений [8 – 15].

Цель настоящей работы – с применением физического и математического моделирования провести комплексное исследование влияния дополнительных огнеупорных элементов различных конфигураций (порогов, струегасителей, перегородок) промежуточного ковша на процессы движения расплава и по результатам экспериментов разработать рациональную конструкцию и конфигурацию внутреннего объема промежуточного ковша четырехручьевого МНЛЗ, которые обеспечат эффективную гомогенизацию расплава рельсовой стали и его рафинирование от неметаллических включений.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Физическое моделирование с учетом соблюдения условий подобия проводили на специально созданном лабораторно-экспериментальном комплексе кафедры металлургии черных металлов ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (рис. 1) [16]. Лабораторно-экспериментальный комплекс содержит элементы: модель промежуточного ковша (1), стопор (2), трубу подвода моделирующей жидкости (3), резервуар для красителя (солевого раствора) (4), электромагнитный клапан (нормально закрытый) для подачи индикатора (5), кран (6), вентиль, регулирующий расход моделирующей жидкости (7), модели рафинирующих устройств (8 – 11), электромагнитный клапан (нормально открытый) для отвода моделирующей жидкости (12), расходомеры (13), линии отвода моделирующей жидкости (14), датчики кондуктометра (15), датчики уровня моделирующей жидкости (16).

Основным элементом установки является физическая модель промежуточного ковша, выполненная из прозрачного органического стекла в масштабе 1:2,5.

При проведении экспериментов в качестве моделирующей жидкости использовали техническую воду, а для визуализации движения потоков осуществляли ввод в струю водного раствора перманганата калия с концентрацией приблизительно 3 г/л. При проведении моделирования проводили непрерывную видеофиксацию протекающих процессов. Оценку степени гомогенизации жидкости, уточнение минимального времени пребывания моделирующей жидкости в объеме модели промежуточного ковша и определение объемов характерных зон осуществляли кондуктометрическим методом. В некоторых экспериментах в качестве индикатора использовали раствор хлорида натрия NaCl, при этом измерение электрической проводимости и содержания NaCl в растворе проводили солемером PS202, датчики которого устанавливали в разливочных стаканах модели промежуточного ковша.

Численные эксперименты проведены с использованием методов вычислительной гидродинамики (конечных объемов) на трехмерной турбулентной математической модели с однофазным представлением течения металлического расплава в промежуточном ковше [17]. В качестве расчетной области в связи с наличием вертикальной плоскости симметрии принята половина внутреннего объема промежуточного ковша, занимаемая жидким расплавом. Для построения конечноэлементной модели расчетная область разделена на 350 000 конечных объемов.

Для оценки эффективности гомогенизации расплава по результатам физического и математического моделирования разработана новая методика, основанная на анализе распределения времени пребывания жидкости в проточном реакторе непрерывного действия. В этом случае при определении объемов жидкого металла рассматривали зоны: застойную (отсутствует циркуляция расплава), идеального вытеснения (режим течения рас-

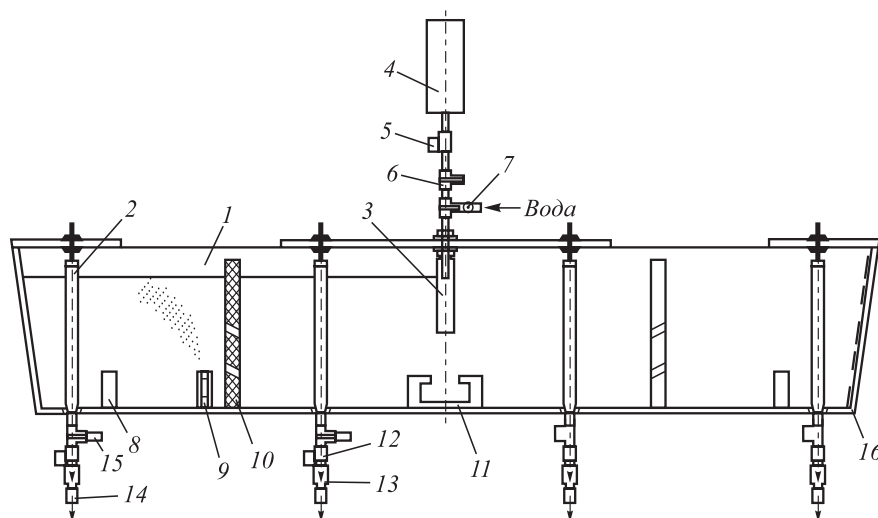


Рис. 1. Схема лабораторно-экспериментального комплекса для исследования гидродинамических процессов в промежуточном ковше

Fig. 1. Scheme of laboratory-experimental complex for study of hydrodynamic processes in the tundish

плава приближен к ламинарному), идеального смешения (область с равномерным перемешиванием расплава) [18, 19].

Дальнейшие экспериментальные исследования гидродинамических процессов в промежуточном ковше базовой конструкции осуществляли при использовании дополнительных огнеупорных элементов (порогов, струегасителей, перегородок) различных конфигураций. Исследовали гидродинамику расплава рельсовой стали для условий разливки заготовки сечением 300×360 мм со скоростью 0,7 м/мин с подачей металла в промежуточный ковш через защитную трубу.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как установлено, при базовом варианте конструкции промежуточного ковша время достижения металлом центральных и периферийных разливочных стаканов составляет 6 и 52 с соответственно (время соответствует реальным условиям металлургического процесса). Расплав из сталеразливочного ковша поступает в объем промежуточного ковша, достигает днища и разделяется, при этом формируются высокоскоростные потоки. Часть придонных потоков (так называемые «короткие пути») направляется к центральным разливочным стаканам на высоте 0 – 50 мм от днища

промежуточного ковша со скоростью порядка 0,13 м/с (рис. 2, б, эпюра 1). После достижения центральных разливочных стаканов скорости придонных потоков снижаются (рис. 2, б, эпюра 2). В зоне периферийных стопоров и торцевых стенок наблюдается наличие застойных зон, которые способствуют формированию температурной и химической неоднородности расплава стали. В то же время в рабочем пространстве промежуточного ковша (рис. 2, б) у торцевой стенки (область I), между периферийным и центральным стопорами (область II) наблюдаются характерные вихревые области интенсивного движения жидкости. В результате анализа длин линий тока, полученных при математическом моделировании (рис. 2, а), установлено, что более 60 % линий имеют длину 0 – 4,4 м и лишь 8 % линий имеют длину более 8,8 м, что подтверждает наличие большого количества так называемых «коротких путей» движения расплава. При этом минимальная длина линии тока составила 0,81 м, а максимальная – 40,35 м.

В соответствии с выполненными расчетами объем застойных зон в промежуточном ковше (базовый вариант конструкции) составляет примерно 28 %, при этом объемы зон идеального вытеснения и идеального смешения составляют примерно 5,5 и 66,5 % соответственно. Зафиксированная разница значений температуры на выходе из разливочных стаканов составляет 5,5 °С.

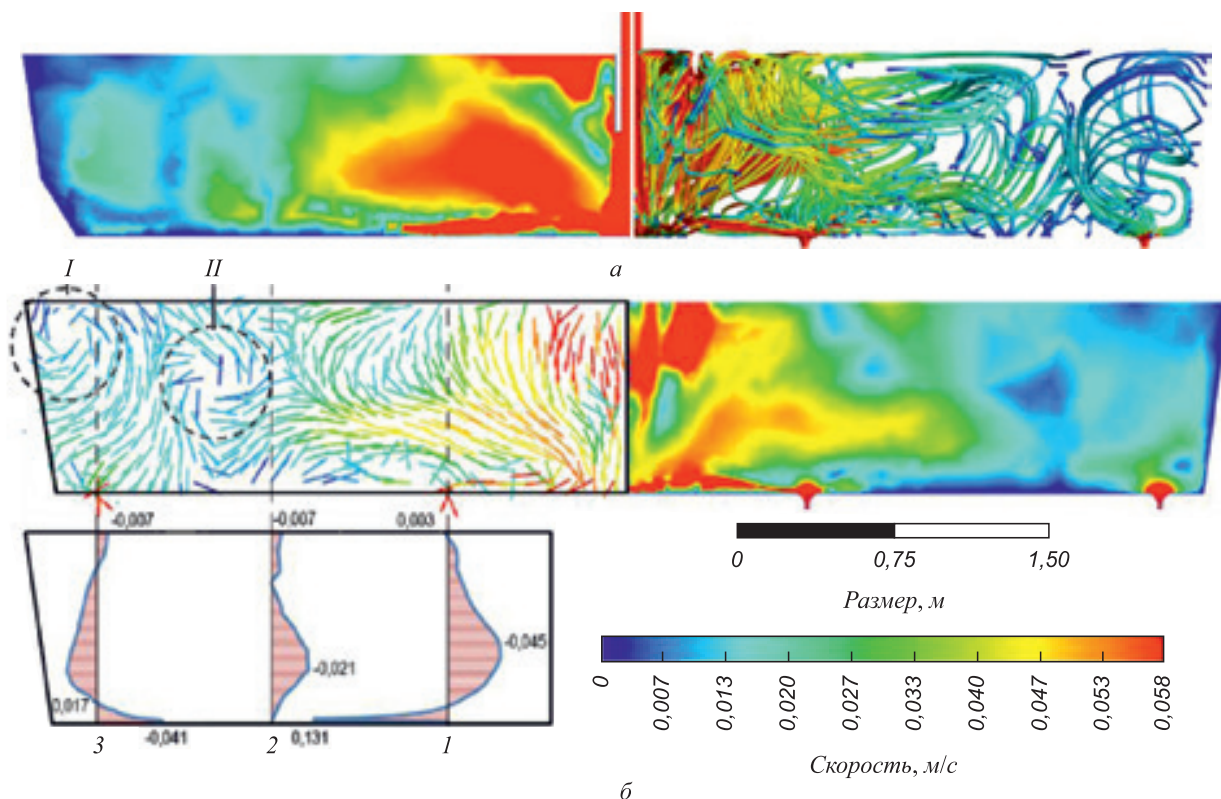


Рис. 2. Контурная карта результирующей скорости движения расплава параллельно плоскости XOY :
а – продольное сечение по защитной трубе; б – продольное сечение по стопорам

Fig. 2. Outline map of the resulting melt velocity parallel to the XOY plane:
а – longitudinal section along the protective pipe; б – longitudinal section along the stoppers

Наличие «коротких путей» к центральным разливочным стаканам снижает эффективность гомогенизации расплава стали по химическому составу и температуре, а также рафинирования от докристаллизационных неметаллических включений, транспортируемых потоком металла в кристаллизатор.

В результате исследования гидродинамики в промежуточном ковше при использовании порогов и струегасителей различных конфигураций установлено, что увеличение высоты огнеупорных порогов до 228 и 570 мм способствует увеличению времени достижения порции моделирующей жидкости к разливочным стаканам в 8 и 1,9 раза соответственно по сравнению с базовым вариантом и уменьшению объема застойных зон до 23 %. При этом применение порогов со скошенной верхней частью позволило увеличить время достижения порции моделирующей жидкости разливочных стаканов в среднем на 3 с.

Использование струегасителя позволяет увеличить скорость конвективных потоков и увеличить время достижения порции моделирующей жидкости центрального и периферийного разливочных стаканов по сравнению с базовым вариантом в 6,3 и 2,4 раза соответственно. При этом увеличение высоты модели струегасителя до 128 и 320 мм способствует уменьшению наличия и объема застойных зон до 25 %.

При установке полнопрофильных перегородок с переливными отверстиями происходит разделение внутреннего объема промежуточного ковша на отдельные камеры: приемную и разливочные. В приемной камере происходит активная циркуляция моделирующей жидкости, что способствует гомогенизации и, в дальнейшем, через переливные отверстия потоки поступают в разливочные камеры. Как установлено, конфигурация перегородок с двумя рядами отверстий диаметром 20 (50) мм для нижнего ряда (4 отверстия) и 32 (80) мм для верхнего ряда (5 отверстий) является наиболее рациональной. Суммарная площадь отверстий 5278 и 32 987 мм² и их расположение обеспечивают снижение времени достижения потоком центральных и периферийных разливочных стаканов в 19 и 2,3 раза соответственно (отличие 6 с), что свидетельствует об активной циркуляции моделирующей жидкости и ее гомогенизации. В этом случае минимальный объем застойных зон составляет примерно 18 %, а разница значений температуры на выходе из разливочных стаканов – 0,5 °С.

В промышленных условиях при установке перегородок в приемной камере металл циркулирует в замкнутой области, активно перемешивается, что способствует укрупнению и всплыванию неметаллических включений. Попадая через переливные отверстия в разливочные камеры, поток металла направляется к поверхности раздела металл – ассимилирующий шлак и движется вдоль нее, что способствует дополнительному рафинированию расплава.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

С использованием результатов моделирования для практического применения разработана конструкция полнопрофильных перегородок, которые обеспечивают рациональную организацию движения потоков расплава и его рафинирование и гомогенизацию. Промышленные исследования реализованы в условиях четырехручьевого машины непрерывного литья заготовок № 1 (сечение заготовки 300×360 мм) электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [20].

Для исследования загрязненности металла неметаллическими включениями в промышленных условиях вырезали образцы из различных зон (центральной, зоны столбчатых кристаллов) непрерывнолитых заготовок, разлитых на МНЛЗ при базовом и предлагаемом вариантах конфигурации внутреннего объема промежуточного ковша. Исследования проводили на нетравленных шлифах с использованием металлографического микроскопа ЛабоМет-И1 (при увеличении в 100 крат) в соответствии с ГОСТ 1778 – 70.

Установлено, что степень ликвации на заготовках, полученных с использованием в промежуточном ковше полнопрофильных перегородок разработанной конструкции, снизилась по углероду в 1,2 – 2,5 раз, марганцу в 1,7 – 2,7 раза, кремнию в 1,7 – 2,1 раза, фосфору в 1,5 – 2,1 раза, сере в 1,4 – 2,8 раза относительно значений, полученных на заготовках с МНЛЗ при базовом варианте конструкции внутреннего объема промежуточного ковша.

При использовании в промежуточном ковше полнопрофильных перегородок разработанной конструкции наблюдается снижение загрязненности металла в различных зонах непрерывнолитых заготовок, полученных с центральных и периферийных ручьев, неметаллическими включениями (оксиды точечные, силикаты недеформирующиеся, сульфиды). При этом балл загрязненности оксидами точечными снизился с 3а до 1а.

В целом эффективность различных конфигураций внутреннего объема промежуточного ковша оценивали по количеству отбракованных рельсов на ЛНК-100 м на установке автоматизированного эхо-импульсного контроля рельсов SONOTRON TM/24 по проведенным опытно-промышленным исследованиям без использования огнеупорных элементов в промежуточном ковше (сравнительная серия), с использованием струегасителя (рис. 3, а), с использованием полнопрофильных перегородок (рис. 3, б).

Из анализа результатов опытно-промышленных исследований (рис. 4) следует, что в сравнительной серии экспериментов количество отбракованных рельсов по дефектам неметаллические включения достигает 90 шт (или 7 %), при этом количество дефектных рельсов, произведенных из заготовок, разлитых на центральных и периферийных ручьях, составляет 62 шт (или 4,8 %)

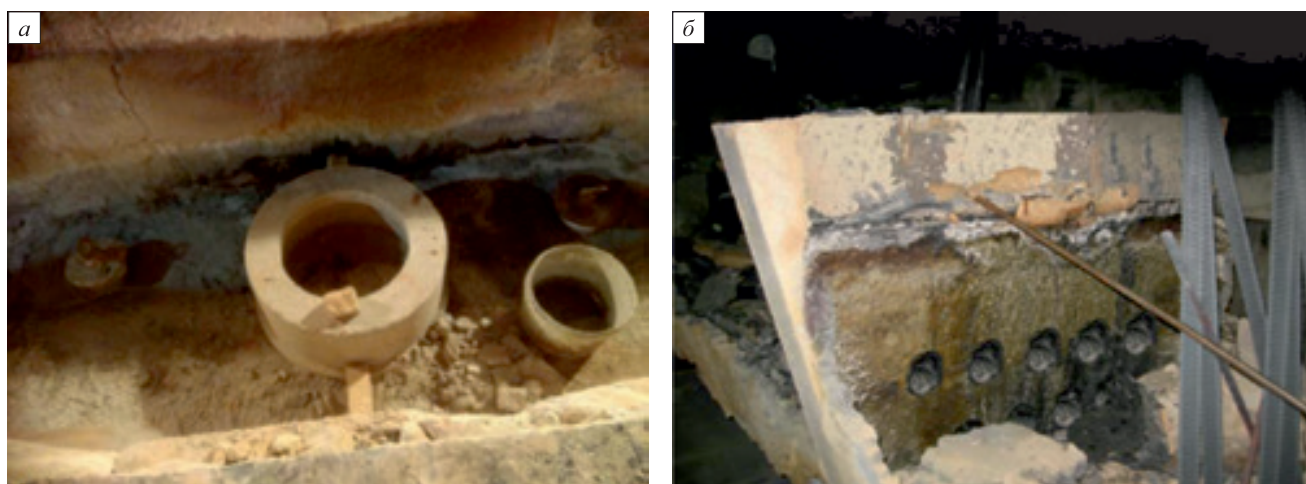


Рис. 3. Промежуточный ковш МНЛЗ ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК», оборудованный огнеупорными элементами:
а – струегаситель; б – перегородка (после эксперимента, серия 20 плавов)

Fig. 3. Tundish of CCM of EAF shop at JSC “EVRAZ ZSMK” CCM equipped with refractory elements:
а – flame dumper; б – partition plate (after the experiment, a series of 20 heats)

и 28 шт (или 2,2 %) соответственно. Количество отбракованных рельсов из заготовок, разлитых на центральных ручьях, в 2,2 раза больше, чем изготовленных из заготовок, разлитых на периферийных ручьях. Такое неравномерное распределение брака рельсов по неметаллическим включениям по центральным и периферийным ручьям свидетельствует о наличии «коротких путей», по которым неметаллические включения с потоком расплава попадают в центральные разливочные стаканы. Это подтверждается результатами моделирования.

В опытной кампании под контролем при использовании струегасителя общее количество отбракованных рельсов снижается до 67 шт (или 5,2 %) или на 25,6 % при сопоставлении со сравнительной серией, также снижается соотношение по центральным (41 шт) и периферийным (26 шт) ручьям до 1,58 %. Это свидетельствует о более благоприятных условиях для ассими-

ляции неметаллических включений рафинировочным шлаком, при которых основной поток расплава взаимодействует с рафинировочным шлаком в центральном объеме промежуточного ковша. При установке полнопрофильных перегородок количество отбракованных рельсов в серии составило 28 шт (2,19 %). Количество дефектных рельсов, произведенных из заготовок, разлитых на центральных и периферийных ручьях, составило 13 и 15 шт соответственно, а их соотношение примерно 0,87. Это позволяет сделать вывод о более рациональных гидродинамических условиях в промежуточном ковше при установке полнопрофильных перегородок разработанной конструкции. При данных условиях отсутствуют так называемые «короткие пути»: неметаллические включения, двигаясь в потоке расплава вблизи поверхности рафинировочного шлака, в значительной степени им ассимилируются.

На основе анализа результатов промышленных экспериментов, физического и математического моделирования для осуществления прогнозных расчетов количества (Б, %) отбракованных по неметаллическим включениям рельсов получено соотношение:

$$Б = -19,479V_{ив} + 5,604V_{ис} + 15,632V_z,$$

где $V_{ив} + V_{ис} + V_z = 1$; $V_{ив}$, $V_{ис}$ и V_z – объемные доли зон идеального вытеснения, идеального смешения и застойных зон.

Выводы

Разработана и апробирована в промышленных условиях конструкция полнопрофильных перегородок, которые обеспечивают рациональную организацию потоков расплава, его гомогенизацию и эффективное

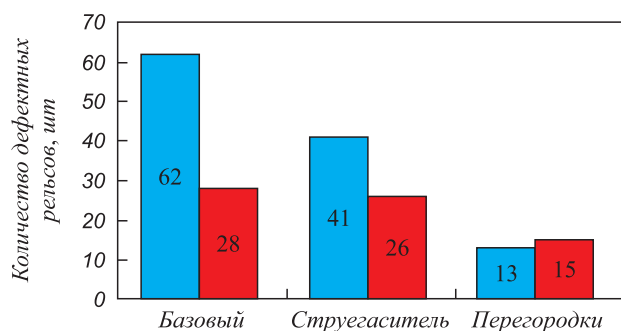


Рис. 4. Количество дефектных рельсов по центральным (■) и периферийным (■) ручьям при различных вариантах внутренней конфигурации промежуточного ковша

Fig. 4. Number of defective rails along the central (■) and peripheral (■) streams with various options for internal configuration of the tundish

рафинирование рельсовой стали от неметаллических включений в промежуточном ковше МНЛЗ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хлыст С.В., Кузьмиченко В.М., Резанов В.А., Борц А.И., Шур Е.В. Перспективная технология производства рельсов для высокоскоростного и тяжеловесного движения // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 6. С. 14 – 19.
2. Борц А.И. Исследования инновационной рельсовой продукции // Железнодорожный транспорт. 2015. № 8. С. 54 – 57.
3. Дефекты и качество рельсовой стали / В.В. Павлов, М.В. Темлянец, Л.В. Корнева, Т.Н. Осолкова, В.В. Гаврилов. – М.: Теплотехник, 2006. – 218 с.
4. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting // Metallurgical and Materials Transactions B. 2006. Vol. 37B. No. 5. P. 733 – 761.
5. Ouchi C. Development of steel plates by intensive use of TMCP and direct quenching processes // ISIJ International. 2001. Vol. 41. No. 6. P. 542 – 553.
6. Paul S.K., Ray A. Influence of inclusion characteristics on the formability and toughness properties of a hot-rolled deep-drawing quality steel // Journal of Materials Engineering and Performance. 1997. Vol. 6. No. 1. P. 27 – 34.
7. Wilson A.D. Clean steel technology – fundamental to the development of high performance steels. – In: Advances in the Production and Use of Steel with Improved Internal Cleanliness / Ed. J.K. Mahaney Jr. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 1999. P. 73 – 88.
8. Вдовин К.Н., Семенов М.В., Точилкин В.В. Рафинирование стали в промежуточном ковше МНЛЗ: Монография. – Магнитогорск: изд. МГТУ, 2006. – 118 с.
9. Смирнов А.Н., Кравченко А.В., Верзилов А.П., Ефимова В.Г. Современные промежуточные ковши для высокопроизводительных МНЛЗ // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2012. № 9. С. 19 – 27.
10. Кислица В.В., Чичкарев Е.А., Исаев О.Б. Совершенствование и внедрение комплексной технологии рафинирования стали в промежуточных ковшах МНЛЗ // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2009. № 2. С. 17 – 21.
11. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in evaluation and control of steel cleanliness // ISIJ International. 2003. Vol. 43. No. 3. P. 271 – 291.
12. Okorokov G.N., Donets A.I., Shevtsov A.Z., Sinel'nikov V.A., Yugov P.I., Zin'ko B.F., Krutyanskii M.M., Popov A.M. A heating tundish – the final link in a continuous steelmaking technology // Metallurgist. 1998. Vol. 42. No. 1. P. 15 – 20.
13. Troniman J., Comacho D. Plasma tundish heating at Nucor Steel Nebraska // Iron and Steel Engineer. 1995. Vol. 73. No. 11. P. 39 – 44.
14. Setsuo K., Shuji W., Toyohiko K., Takafumi H. Nippon steel type tundish plasma heater “NS-Plasma I” for continuous caster // Shinnittetsu Giho. 2001. No. 375. P. 145 – 149.
15. Исаев М.-Э.Х., Тюфтяев А.С., Юсупов Д.И. Плазменный подогрев стали и конструкции промежуточных ковшей МНЛЗ для его реализации // Механическое оборудование металлургических заводов. 2015. № 1 (4). С. 3 – 8.
16. Протопопов Е.В., Числавлев В.В., Фейлер С.В. Исследование процессов течения металлического расплава в промежуточном ковше МНЛЗ методами вычислительной гидродинамики // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2015. № 4. С. 19 – 23.
17. Protopopov E.V., Chislavlev V.V., Feiler S.V. Physical modeling of the processes of metal melt movement during continuous casting // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 411. No. 1. Article 012001.
18. Levenspiel O. Chemical Reaction Engineering. – 3rd ed. – New York, 1999. – 668 p.
19. Ahuja R., Sahai Y. Fluid flow and mixing of melt in steelmaking tundishes // Ironmaking and Steelmaking. 1986. Vol. 13. No. 5. P. 241 – 247.
20. Числавлев В.В., Фейлер С.В., Бойков Д.В., Неунывахина Д.Т. Разработка конструкции огнеупорных элементов для рафинирования стали в промежуточном ковше МНЛЗ // Новые огнеупоры. 2017. № 3. С. 73 – 74.

Поступила в редакцию 25 февраля 2019 г.

После доработки 11 марта 2019 г.

Принята к публикации 4 апреля 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 5, pp. 298–304.

INCREASING EFFICIENCY OF RAIL STEEL REFINING IN CCM TUNDISH BASED ON RATIONAL ORGANIZATION OF HYDRODYNAMIC PROCESSES

E.V. Protopopov¹, V.V. Chislavlev¹, M.V. Temlyantsev¹, A.V. Golovatenko²

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

² JSC “EVRAZ - Joint West Siberian Metallurgical Plant”, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. Quality and operational properties of rails determine duration of their operational service. The main parameters that determine quality of steel are chemical heterogeneity and presence of non-metallic inclusions in metal. Efficiency of homogenization of metal melt and its refining from non-metallic inclusions in tundish is largely determined by organization of hydrodynamic processes, internal geometry of ladle, and presence of additional refractory elements. Using physical and mathematical modeling, study of the influence of additional refractory elements of various configurations of intermediate ladle on processes of melt flow was carried out. Physical modeling of hydrodynamic processes in the tundish taking into account requirements of similarity theory was made on specially created laboratory-experimental complex.

Numerical experiments were carried out using computational fluid dynamics methods (finite volumes) on three-dimensional turbulent mathematical model with a single-phase representation of metal melt flow in tundish. To evaluate efficiency of melt homogenization according to results of physical and mathematical modeling, new technique has been developed based on analysis of distribution of time of liquid placement in continuous flow reactor. According to the results of experiments, configuration of the internal volume of tundish of four-strand CCM is proposed. A construction is considered that provides effective homogenization of molten rail steel and its refining from non-metallic inclusions. The design of full-profile compartments was developed and tested under industrial conditions, which ensure rational organization of melt flows, its homogenization and efficient refining of rail steel from non-metallic inclusions in the tundish. Industrial research was carried out under the conditions of four-strand CCM No. 1 of EAF shop at JSC “EVRAZ ZSMK”.

Keywords: rail steel, casting, CCM, non-metallic inclusions, heterogeneity, tundish, melt.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-298-304

REFERENCES

1. Khlyst S.V., Kuz'michenko V.M., Rezanov V.A., Borts A.I., Shur E.V. Promising technology of rail production for high speed and heavy traffic. *Vestnik VNIIZhT*. 2013, no. 6, pp. 14–19. (In Russ.).
2. Borts A.I. Innovative rail products. *Zhelezнодорожный транспорт*. 2015, no. 8, pp. 54–57. (In Russ.).
3. Pavlov V.V., Temlyantsev M.V., Korneva L.V., Oskolkova T.N., Gavrilov V.V. *Defekty i kachestvo rel'sovoi stali* [Defects and quality of rail steel]. Moscow: Teplotekhnika, 2006, 218 p. (In Russ.).
4. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2006, vol. 37B, no. 5, pp. 733–761.
5. Ouchi C. Development of steel plates by intensive use of TMCP and direct quenching processes. *ISIJ International*. 2001, vol. 41, no. 6, pp. 542–553.
6. Paul S.K., Ray A. Influence of inclusion characteristics on the formability and toughness properties of a hot-rolled deep-drawing quality steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 1997, vol. 6, no. 1, pp. 27–34.
7. Wilson A.D. Clean steel technology – fundamental to the development of high performance steels. In: *Advances in the Production and Use of Steel with Improved Internal Cleanliness*. Mahaney J.K. (Jr.) ed. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1999, pp. 73–88.
8. Vdovin K.N., Semenov M.V., Tochilkin V.V. *Rafinirovanie stali v promezhutochnom kovshe MNLZ: Monografiya* [Steel refining in CCM tundish: Monograph]. Magnitogorsk: MGTU, 2006, 118 p. (In Russ.).
9. Smirnov A.N., Kravchenko A.V., Verzilov A.P., Efimova V.G. Modern tundish for high-performance CCM. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2012, no. 9, pp. 19–27. (In Russ.).
10. Kislytsa V.V., Chichkarev E.A., Isaev O.B. Improvement and implementation of a comprehensive steel refining technology in CCM tundish. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2009, no. 2, pp. 17–21. (In Russ.).
11. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in evaluation and control of steel cleanliness. *ISIJ International*. 2003, vol. 43, no. 3, pp. 271–291.
12. Okorokov G.N., Donets A.I., Shevtsov A.Z., Sinel'nikov V.A., Yugov P.I., Zin'ko B.F., Krutyanskii M.M., Popov A.M. A heating tundish – the final link in a continuous steelmaking technology. *Metallurgist*. 1998, vol. 42, no. 1, pp. 15–20.
13. Troniman J., Comacho D. Plasma tundish heating at Nucor Steel Nebraska. *Iron and Steel Engineer*. 1995, vol. 73, no. 11, pp. 39–44.
14. Setsuo K., Shuji W., Toyohiko K., Takafumi H. Nippon steel type tundish plasma heater "NS-Plasma I" for continuous caster. *Shin-nittetsu Giho*. 2001, no. 375, pp. 145–149.
15. Isakaev M.-E.Kh., Tyuftayev A.S., Yusupov D.I. Plasma heating of steel and design of CCM tundish for its implementation. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov*. 2015, no. 1 (4), pp. 3–8. (In Russ.).
16. Protopopov E.V., Chislavlev V.V., Feiler S.V. Study of metal melt flow in CCM tundish using computational fluid dynamics. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2015, no. 4, pp. 19–23. (In Russ.).
17. Protopopov E.V., Chislavlev V.V., Feiler S.V. Physical modeling of the processes of metal melt movement during continuous casting. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 411, no. 1, article 012001.
18. Levenspiel O. *Chemical Reaction Engineering*. 3rd ed. New York, 1999, 668 p.
19. Ahuja R., Sahai Y. Fluid flow and mixing of melt in steelmaking tundishes. *Ironmaking and Steelmaking*. 1986, vol. 13, no. 5, pp. 241–247.
20. Chislavlev V.V., Feiler S.V., Boikov D.V., Neunyvakhina D.T. Development of refractory elements design for steel refining in CCM tundish. *Novye ognepopy*. 2017, no. 3, pp. 73–74. (In Russ.).

Information about the authors:

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

V.V. Chislavlev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Ferrous Metallurgy

M.V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of "Thermal Power and Ecology" (uchebn_otdel@sibsiu.ru)

A.V. Golovatenko, Cand. Sci. (Eng.), Director of Rail Production (Aleksey.Golovatenko@evraz.com)

Received February 25, 2019

Revised March 11, 2019

Accepted April 4, 2019

УДК 625.143.48

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СВАРКИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ТЕРМОУПРОЧНЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ. ПРОМЫШЛЕННОЕ ОПРОБОВАНИЕ*

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)

Бащенко Л.П., к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии (luda.baschenko@gmail.com)

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

Аннотация. Исследованы процессы сварки с последующим управляемым охлаждением полнопрофильных рельсовых стыков, проводимым путем пропускания импульсов переменного электрического тока после сварки. Изучено влияние режимов сварки на качественные показатели сварного стыка. Сварку проводили на машине для контактной стыковой сварки МСП-6301 в условиях рельсосварочного предприятия ООО «РСП-М» (РСП-29). Для исследования вырезали образцы полнопрофильных рельсов типа Р65 категории ДТ350 длиной 600 мм. Управление режимами изотермической выдержки после сварки осуществляли с помощью персонального компьютера с изменением программы промышленного контроллера SIMATIC S7-300 и программного обеспечения Simatic Step 7, позволяющего задавать режимы управляемого охлаждения. Управляющая программа написана на графическом языке LAD. Для поиска оптимальных режимов управляемого охлаждения проведен полный факторный эксперимент $N = 2^k$. Испытаны нетермообработанные стыки на трехточечный статический изгиб согласно СТО РЖД 1.08.002 – 2009 «Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом». Испытания на статический изгиб проводили на прессе типа ПМС-320. Определены значения усилия, возникающего при изгибе $P_{изг}$, и величина стрелы прогиба $f_{пр}$, при которых происходит разрушение контрольного образца или максимальные значения этих показателей, если образец не разрушился во время испытаний. В ходе экспериментов получены регрессионные модели для выходных параметров усилия при изгибе и стрелы прогиба. Изучена макроструктура образцов и распределение твердости металла на поверхности катания сварного стыка рельсов. Разработан новый способ контактной стыковой сварки, который позволяет получать сварное соединение рельсов типа Р65 категории ДТ350 со свойствами, превосходящими технические требования СТО РЖД 1.08.002 – 2009.

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

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-305-312

ВВЕДЕНИЕ

Технологии, обеспечивающие получение бесстыкового железнодорожного пути высокого качества, находят широкое распространение в мире [1 – 9]. При этом в зависимости от химического состава стали выбирается технологический процесс сварки, который определяет линейную величину и температурные поля в зоне термического влияния (ЗТВ) сварного стыка [10 – 14]. Выбор теплового режима основан на исключении про-

цессов образования структур закалки (мартенсита и бейнита), которые вызывают дополнительные напряжения и трещины, приводящие к разрушению рельсов [15]. В связи с этим особое значение приобретает разработка способов сварки для железнодорожных рельсов высокоскоростных магистралей, изготовленных из хромистой стали.

В работе [16] проведено исследование процесса контактной стыковой сварки оплавлением рельсов на оборудовании компании Schlatter, стационарной рельсосварочной машине GAA 100. Процесс контактной стыковой сварки разделяют на три этапа: первый этап – разогрев свариваемых поверхностей; второй этап – фактическая сварка; третий этап – охлаждение сварного соединения. Первый этап в свою очередь делят еще

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

на три части: 1 – «намеренное оплавление»; 2 – «предварительное нагревание»; 3 – «оплавление». Этап предварительного нагревания является осадкой под током. Во время третьего этапа после сварки применяется термообработка подобно предварительному подогреву для снижения скорости охлаждения после сварки: проводят пропускание электрического тока через сварной стык несколькими импульсами. Из термических циклов, рассмотренных в настоящей работе, ясно, что импульсы тока предназначены лишь для снижения скорости охлаждения. Это необходимо для того, чтобы избежать образования закалочных структур в металле сварного соединения.

Исследователи [17] предлагают использовать совмещенные непрерывный и пульсирующий методы оплавления: изменением интенсивности нагрева при сварке регулируется скорость охлаждения сварного соединения, но при этом снижается полезная мощность, генерируемая в контакте между оплавливаемыми рельсами [18].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

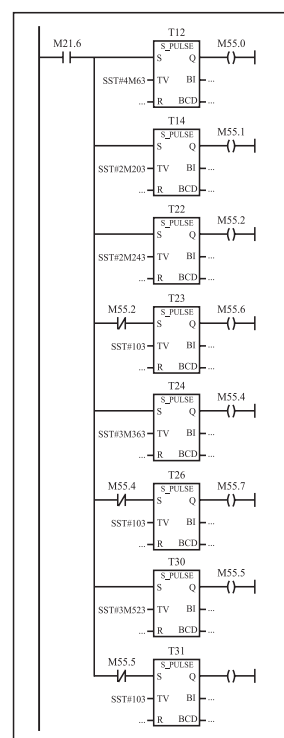
Целью настоящей работы является изучение влияния режимов сварки с последующим управляемым охлаждением полнопрофильных рельсовых стыков, проводимого путем пропускания импульсов переменного электрического тока после сварки, на качественные показатели сварного стыка. Сварку проводили на машине для контактной стыковой сварки МСР-6301 в условиях рельсосварочного предприятия ООО «РСП-М» (РСП-29). Для исследования вырезали образцы полнопрофильных рельсов типа Р65 категории ДТ350 длиной 600 мм.

Управление режимами изотермической выдержки после сварки осуществляли с помощью персонального компьютера с изменением программы промышленного контроллера SIMATIC S7-300. С помощью программного обеспечения Simatic Step 7 написана программа, позволяющая задавать режимы управляемого охлаждения. Управляющая программа написана на графическом языке LAD. Для задания необходимых временных параметров были использованы таймеры (рис. 1). Для включения сварочного трансформатора использовали триггер M50.0, к которому на входы S и R подключены последовательно и параллельно контакты, включающиеся по таймерам (рис. 1, б). Нормально разомкнутый контакт M21.6 включает таймер T13 в момент окончания осадки. Таймер T13 задает суммарное время цикла управляемого охлаждения, при включенном таймере T13 реле M55.0 замыкает контакты M55.0. Таймер T14 задает время выдержки после осадки и размыкает нормально замкнутые контакты M55.1 посредством включения реле M55.1. После отключения таймера T14 сигнал проходит на триггер M50.0 до момента окончания работы таймера T22, который включе-

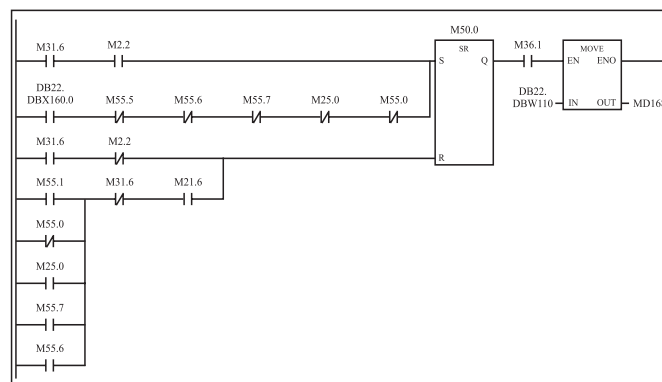
нием реле M55.3 размыкает контакт M55.3. Этот контакт M55.3 запускает таймер T23, который задает время паузы между включениями сварочного трансформатора и т.д.

Таким образом, добавляется необходимое количество таймеров в соответствии с количеством импульсов пропускаемого электрического тока через сварной стык. Для включения и отключения режима управляемого охлаждения используется нормально разомкнутый контакт DB22.DBX160.0.

Этапы технологического процесса построены из участков оплавления, в которых устанавливаются основные режимы регулирования. Каждый участок определяет величину оплавления S , в котором устанавливается напряжение U , скорости V_B , V_H (вперед, назад)



а



б

Рис. 1. Фрагмент программы, отвечающий за управляемое охлаждение

Fig. 1. A fragment of the program responsible for controlled cooling

Режимы сварки рельсов Р65

Table 1. Modes of P65 rails welding

Участок	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S , мм	2,0	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5
U , %	75	70	55	60	60	65	70	88	88	98
V_B , мм/с	0,6	1,3	0,8	1,0	1,1	1,2	0,7	0,9	1,1	1,2
V_H , мм/с	0,5	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,3	0,2
$I_{кор}$, А	200	300	200	200	250	250	250	300	400	500
$I_{ост}$, А	300	450	350	350	400	400	460	500	600	700
$I_{рев}$, А	400	500	400	400	450	450	550	600	700	800
$I_{кз}$, А	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200

Пр и м е ч а н и е. $S_{ос} = 14$ мм – путь осадки; $V_{ос} = 100$ мм/с – скорость осадки; $S_i = 6$ мм – путь осадки под током.

и границы токов управления $I_{кор}$, $I_{ост}$, $I_{рев}$ [19]. Режимы, по которым проводили сварку рельсов, приведены в табл. 1.

Для поиска оптимальных режимов управляемого охлаждения в первой серии экспериментов проведен полный факторный эксперимент $N = 2^k$.

Матрица планирования экспериментов $N = 2^k$ при $X_4 = 4$ (для уменьшения количества опытов на всех режимах изотермической выдержки) приведена ниже:

Образец	Значения факторов		
	X_1 , с	X_2 , с	X_3 , с
1	60	2	30
2	160	2	30
3	60	6	30
4	160	6	30
5	60	2	15
6	160	2	15
7	60	6	15
8	160	6	15

Сварку образца 0 проводили без изотермической выдержки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показан общий вид сваренных рельсовых стыков.

На рис. 3 представлена осциллограмма процесса сварки образца 1.

В дальнейшем испытывали нетермообработанные стыки на трехточечный статический изгиб согласно СТО РЖД 1.08.002 – 2009 «Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом». Испытания на

статический изгиб проводили на прессе типа ПМС-320. Контрольные образцы испытывали после сварки и удаления грата без дополнительной обработки стыков. При испытаниях на статический поперечный изгиб длина контрольного образца со сварным стыком по середине составляла не менее 1200 мм. Нагрузку прикладывали в середине пролета контрольного образца в месте сварного стыка с расстоянием между опорами 1 м. Испытания контрольного образца проводили с приложением нагрузки на головку. Результатами испытания являются значения усилия, возникающего при изгибе $P_{изг}$, кН, и значения стрелы прогиба $f_{пр}$, мм, при которых происходит разрушение контрольного образца или максимальные значения данных показателей, если образец не разрушился во время испытаний. На рис. 4 показано сравнение образца 3 с образцом без импульсной обработки. Результаты испытаний на статический трехточечный изгиб приведены ниже:



Рис. 2. Общий вид полнопрофильных образцов после сварки

Fig. 2. General view of full-profile samples after welding

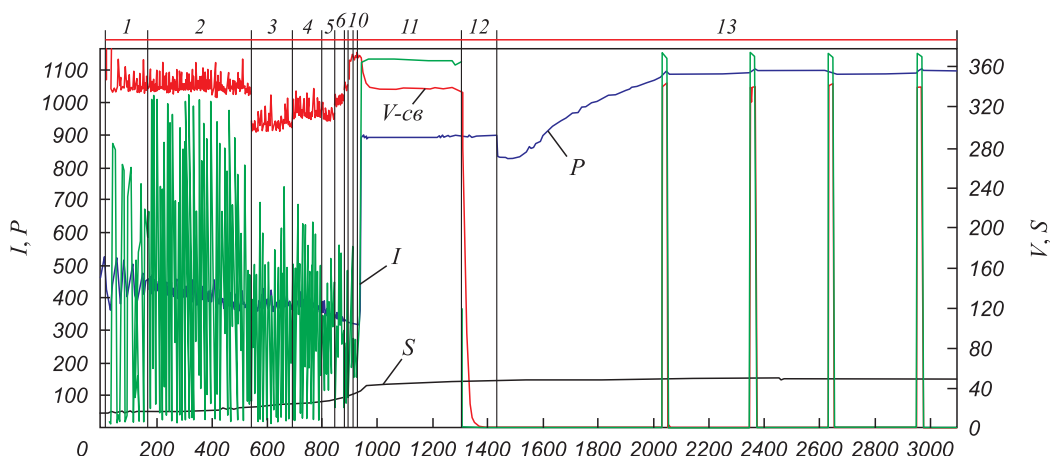


Рис. 3. Осциллограмма сварки образца 1

Fig. 3. Oscillogram of sample 1 welding

Образец	$P_{изг}$, кН	$f_{пр}$, мм
0	2179	24,4
1	2002	17,4
2	1882	17,9
3	2364	35,4
4	1970	20,1
5	2107	23,4
6	1616	11
7	2059	20,9
8	2244	31,2
Требования СТО РЖД 1.08.002-2009	2000	27

Экспериментальные значения показателей образца 3 ($P_{изг} = 2364$ кН, $f_{пр} = 35,4$ мм) и образца 8 ($P_{изг} = 2244$ кН, $f_{пр} = 31,2$ мм) выше требований СТО РЖД 1.08.002 – 2009 ($P_{изг} = 2000$ кН, $f_{пр} = 27$ мм).

В ходе экспериментов были получены регрессионные модели для выходных параметров усилия при изгибе и стрелы прогиба. В табл. 2 и 3 представлен анализ адекватности полученных моделей:

$$P_{изг} = 1926,5 - 2,05X_1 + 64,38X_2 + 3,2X_3, R^2 = 0,61;$$

$$f_{пр} = 15,72 - 0,04X_1 + 2,37X_2 + 0,07X_3, R^2 = 0,51.$$

Формирование благоприятных механических свойств сварного соединения произошло в некоторой степени из-за замедления скорости охлаждения в связи с реализацией режимов изотермической выдержки (рис. 5).

Для подтверждения результатов проведена вторая серия экспериментов, где повторно проведена сварка при режиме с наилучшими результатами испытаний, а также выбран режим управляемого охлаждения с более низкой температурой начала подогрева. Режимы

и результаты повторной серии экспериментов приведены в табл. 4.

Результаты второй серии экспериментов подтвердили воспроизводимость параллельных опытов. Снижение температуры начала подогрева (то есть увеличение параметра X_1) привело к улучшению механических свойств сварного стыка рельсов.

Изучение макроструктуры проводили на двух продольных макротемплетах сварных стыков, один из которых получен по базовой технологии, используемой в настоящее время на рельсосварочных предприятиях РФ (образец А), а второй – по предлагаемому способу (образец Б). Термообработку сварного стыка А проводили стационарным индукционным нагревательным комплексом для термообработки сварных рельсовых стыков УИН 001 – 100/РТ-С по режимам, используемым в настоящее время на предприятиях ООО «РСП-М». Режим индукционной термообработки с подстуживанием головки рельса приведен на рис. 6. В качестве образ-

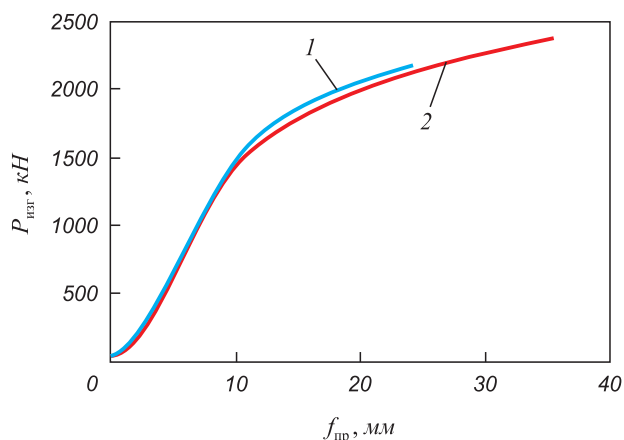


Рис. 4. Результаты испытаний на статический трехточечный изгиб:
1 – образец 0; 2 – образец 3

Fig. 4. Results of static three-point bending test:
1 – sample 0; 2 – sample 3

Таблица 2

Анализ адекватности регрессионной модели влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на усилие при трехточечном изгибе

Table 2. Adequacy analysis of the regression model of influence of pulsed contact post-welding heating on the force at three-point bending

Показатель	Значение показателя		
Коэффициент регрессии	b_1	b_2	b_3
Значение коэффициента регрессии	-2,05	64,38	3,20
Критерий Стьюдента (t_ϕ)	1,55	1,94	0,36
Табличное значение критерия Стьюдента ($t_{\text{табл}}$)	2,776		
Стандартная ошибка коэффициента регрессии (Sb_i)	1,33	33,14	8,84
Остаточная дисперсия (S_e^2)	31,76		
Остаточное стандартное отклонение (S_e)	5,63		
Средний квадрат отклонений модели от среднего (S_r^2)	288,06		
Критерий значимости регрессии (критерий Фишера F_ϕ)	9,08		
Табличное значение критерия Фишера ($F_{\text{табл}}$)	6,59		

Таблица 3

Анализ адекватности регрессионной модели влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на значения стрелы прогиба при трехточечном изгибе

Table 3. Adequacy analysis of the regression model of influence of pulsed contact post-welding heating on the values of bend deflection at three-point bending

Показатель	Значение показателя		
Коэффициент регрессии	b_1	b_2	b_3
Значение коэффициента регрессии	-0,04	2,37	0,07
Критерий Стьюдента (t_ϕ)	0,82	1,84	0,21
Табличное значение критерия Стьюдента ($t_{\text{табл}}$)	2,776		
Стандартная ошибка коэффициента регрессии (Sb_i)	0,05	1,29	0,34
Остаточная дисперсия (S_e^2)	51 072,44		
Остаточное стандартное отклонение (S_e)	225,99		
Средний квадрат отклонений модели от среднего (S_r^2)	564 694		
Критерий значимости регрессии (критерий Фишера F_ϕ)	11,06		
Табличное значение критерия Фишера ($F_{\text{табл}}$)	6,59		

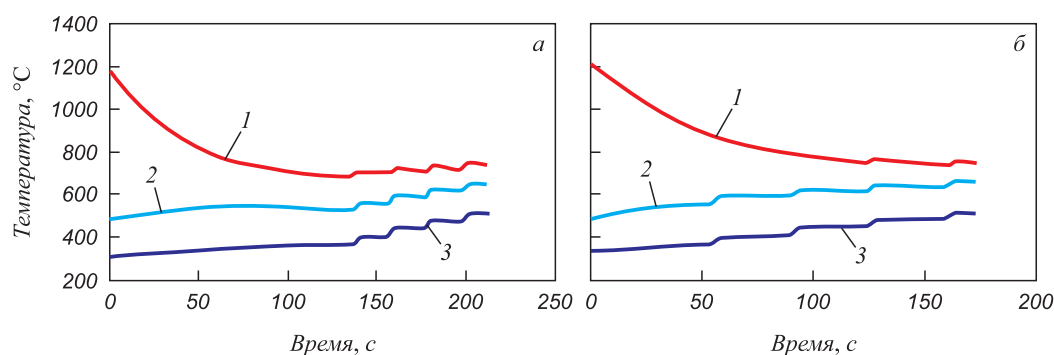


Рис. 5. График охлаждения после сварки образцов 3 (а) и 8 (б):

1 – центр шва; 2 – 20 мм от центра шва; 3 – 28 мм от центра шва

Fig. 5. Graph of cooling after welding of samples 3 (a) and 8 (b):

1 – center of the weld; 2 – 20 mm from the weld center; 3 – 28 mm from the weld center

Т а б л и ц а 4

Результаты второй серии экспериментов

Table 4. Results of the second series of experiments

Образец	Значения факторов			Результаты испытаний на статический изгиб	
	X_1 , с	X_2 , с	X_3 , с	$P_{изг}$, кН	$f_{пр}$, мм
10 (3)*	60	6	30	2276	34,2
11	200	4	10	2493	40,2

П р и м е ч а н и е. Для уменьшения количества опытов на всех режимах изотермической выдержки $X_4 = 4$.

* за скобками указан порядковый номер образца, в скобках – номер повторяемого.

ца Б использовали образец с наилучшими показателями при испытаниях на статический изгиб (образец 11).

При изучении макроструктуры металла сварного соединения, полученного по базовой технологии, по обе стороны от шва наблюдается темнотравящаяся неравномерная зона термического влияния, полученная после термической обработки. Линейные размеры этой зоны (в одну сторону от шва): в головке – 51 мм, в шейке – от 45 до 62 мм, в подошве – 64 мм. Флокены в металле не выявлены.

На продольном макротемплете образца Б наблюдается равномерная зона термического влияния, полученная после сварки. На всем протяжении стыка зона термического влияния имеет ширину, равную (в одну

сторону от шва) 22 мм. Флокены в металле не выявлены.

Твердость металла сварного шва и зон термического влияния на поверхности катания головки сварного стыка А находится в пределах от 265 НВ до 318 НВ. Твердость металла сварного шва и зон термического влияния на поверхности катания головки стыка Б находится в пределах от 292 НВ до 355 НВ. Распределение твердости металла на поверхности катания сварного стыка рельсов показано на рис. 7. Твердость основного металла на поверхности катания головки составляет 348 – 354 НВ.

Снижение твердости металла головки в зоне термической обработки сварного стыка А относительно нижней границы твердости основного металла рельса достигает 24,5 %, а протяженность зоны с пониженной твердостью составляет 42 мм. Снижение твердости в зоне термического влияния сварного стыка Б достигает 14,8 %, при этом протяженность зон с пониженной твердостью составляет 14 мм.

Проведенные эксперименты позволили разработать новый способ контактной стыковой сварки [20], который позволяет получать сварное соединение рельсов типа Р65 категории ДТ350 со свойствами, превосходящими технические требования СТО РЖД 1.08.002 – 2009.

Выводы

Экспериментально подтверждено положительное влияние кратковременного воздействия электрического тока во время охлаждения рельсового стыка после сварки на статический трехточечный изгиб без термической обработки по СТО РЖД 1.08.002 – 2009 рельсов типа Р65 категории ДТ350. Проведение изотермической выдержки путем пропускания четырех кратковременных импульсов (длительностью 10 с) переменного электрического тока через сварное соединение в момент охлаждения после сварки (через 200 с после осадки) позволяет улучшить показатели статического трехточечного

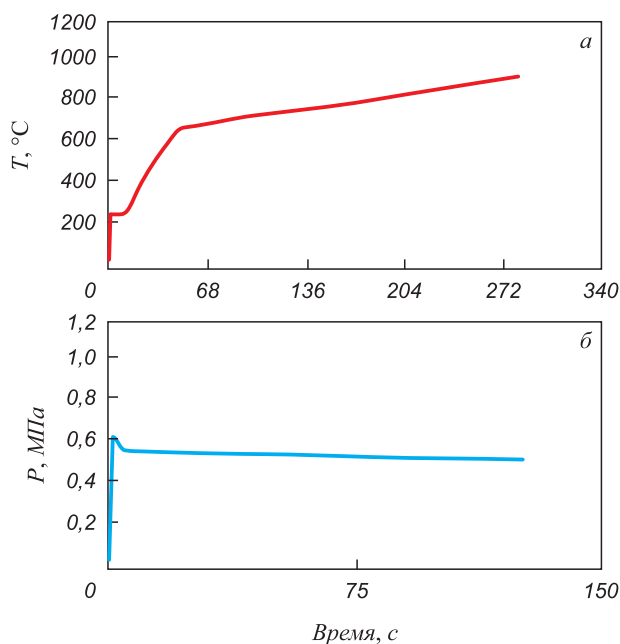


Рис. 6. Режимы термической обработки сварного стыка А: а – режим нагрева, б – режим закалки (охлаждение сжатым воздухом)

Fig. 6. Modes of heat treatment of the welded joint A: а – heating mode, б – quenching mode (cooling with compressed air)

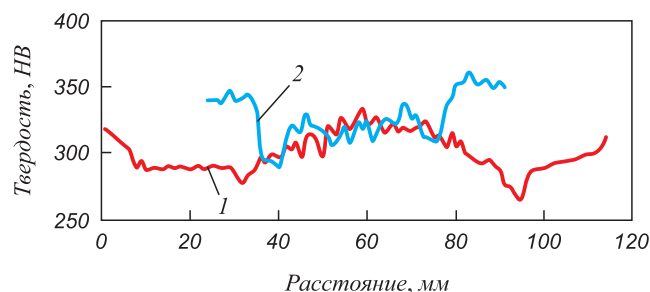


Рис. 7. Распределение твердости металла на поверхности катания сварного стыка рельсов в поперечном направлении сварному соединению, изготовленному по стандартной технологии (1) и по предлагаемому способу (2)

Fig. 7. Distribution of metal hardness on rolling surface of the welded joint of the rails transverse to a welded joint made according to standard technology (1) and to the proposed method (2)

изгиба: усилие изгиба $P_{изг}$ на 25 %, стрелу прогиба $f_{пр}$ на 49 %.

Разработан новый способ контактной стыковой сварки рельсов и проведено его промышленное опробование в структурном подразделении предприятия (СТП) ООО «РСП-М» (РСП-29).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Meade B. Railroad welding demands specialized processes // *Welding Journal*. 1997. Vol. 76. No. 9. P. 47 – 52.
2. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Abramov A.D., Galai M.S. Effect of vibroimpact treatment on the physical and mechanical properties of the surface layer of welded joints in rails // *Welding International*. 2014. Vol. 28. No. 3. P. 245 – 247.
3. 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.
4. Karimine K., Uchino K., Okamura M. Susceptibility to and occurrence of HAZ liquation cracking in rail steels: Study of rail welding with high-C welding materials (4th Report) // *Welding International*. 1997. Vol. 11. No. 6. P. 452 – 461.
5. Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets Yu.V., Didkovskii A.V., Chvertko P.N., Shvets V.I., Mikitin Ya.I. Technology and equipment for resistance flash welding of railway crossings with rail ends through an austenitic insert // *Welding International*. 2008. Vol. 22. No. 5. P. 338 – 341.
6. Irving B. Long Island Rail Road orders an all-welded fleet // *Welding Journal*. 1997. Vol. 22. No. 9. P. 33 – 37.
7. Клименко Л.В. Бесстыковой путь – прогрессивная конструкция железнодорожного пути // Приложение к журналу «Мир транспорта» МКЖТ МПС РФ. 2004. № 1. С. 88 – 93.
8. Калашников Е.А., Королев Ю.А. Технологии сварки рельсов: тенденции в России и за рубежом // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 8. С. 2 – 6.
9. Sergejevs D., Mikhaylovs S. Analysis of factors affecting fractures of rails welded by alumino-thermic welding // *Transport Problems*. 2008. Vol. 3. P. 33 – 37.
10. Mitsuru F., Hiroaki N., Kiyoshi N. Rail flash-butt welding technology // *JFE Technical Report*. 2015. No. 20. P. 159 – 163.
11. 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.
12. Dahl B., Mogard B., Grefot B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding // *Svetsaren*. 1995. Vol. 50. No. 2. P. 10 – 14.
13. Takimoto T. Latest welding technology for long rail and its reliability // *Tetsu-to-Hagane*. 1984. Vol. 70. No. 10. P. 40 – 45.
14. 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.
15. Шур Е.А. Влияние структуры на эксплуатационную стойкость рельсов. – В кн.: Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов. Материалы II Всерос. науч.-техн. семинара (Екатеринбург, 16-17 мая, 2006 г.). – Екатеринбург: изд. УИМ, 2006. С. 37 – 63.
16. Weingrill L., Krutzler J., Enzinger N. Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails // *Materials Science Forum*. May 2016. Vol. 879. P. 2088 – 2093.
17. Шур Е.А., Резанов В.А. Комплексный метод контактной сварки рельсов // *Вестник ВНИИЖТ*. 2012. № 3. С. 20 – 22.
18. Гудков А.В., Николин А.И., Турбина Л.А., Насонов Д.С., Аверкина В.А. Контактная сварка рельсов и термическая обработка сварных стыков рельсов современного производства на рельсосварочных предприятиях ОАО «РЖД». – В кн.: Сварочные и наплавочные технологии на железнодорожном транспорте. Сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ» / Под ред. А.В. Гудкова. – М.: Интекст, 2008. С. 42 – 49.
19. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Patrushev A.O., Usoltsev A.A. Multi-factor regression analysis of the process of rails contact welding on K1000 machine // *Metallurgy 2017*. IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 411. Article 012088.
20. Пат. 2641586 РФ. МПК В 23 К 11/04. Способ контактной стыковой сварки рельсов / Е.В. Протопопов, Н.А. Козырев, Р.А. Шевченко, Р.Е. Крюков, С.В. Фейлер, А.А. Усольцев; заявл. 07.12.2016; опубл. 18.01.18. Бюл. № 2.

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. 5, pp. 305–312.

WELDING OF DIFFERENTIALLY HEAT-STRENGTHENED RAILS. INDUSTRIAL TESTING

N.A. Kozyrev, R.A. Shevchenko, A.A. Usol'tsev, A.N. Prudnikov, L.P. Bashchenko

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. The article describes the study of welding processes with the subsequent control of cooling of full-profile rail joints, produced by passing alternating electric current pulses after welding. The influence of welding modes on the quality of welded joint was investigated. Welding was carried out on a resistance butt welding machine MCP-6301 in conditions of the rail welding company LLC “RSP-M” (RSP-29). For research, the samples of P65 type full-profile rails of DT350 category 600 mm long were cut out. The isothermal holding conditions after welding were controlled using a personal computer with a change in the program of the SIMATIC S7-300 industrial controller and the software SIMATIC STEP 7, which allows modes of controlled cooling to be set. The

control program was written in the LAD graphic language. To search for optimal modes of controlled cooling, a complete factor experiment $N = 2^k$ was carried out. Non-heat-treated joints were tested for three-point static bending according to the state standard STO RZD 1.08.002 – 2009 “Railway rails, welded by electric contact method”. Static bending tests were carried out on the press of PMS-320 type. Values of the force arising during bending P_{bend} and the bend deflection f_{pr} at which the control sample is destroyed, were determined, as well as maximum values of these indicators if the sample was not destroyed during the tests. During the experiments, regression models were obtained for output parameters of the bending force and bend deflection. Macrostructure of the samples and distribution of the metal hardness on rolling surface of the rails welded joint were studied. A new method of resistance butt welding was developed, which makes it possible to obtain a welded connection of P65 type rails of DT350 category with properties that exceed the technical requirements of the mentioned state standard.

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

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-305-312

REFERENCES

- Meade B. Railroad welding demands specialized processes. *Welding Journal*. 1997, vol. 76, no. 9, pp. 47–52.
- Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Abramov A.D., Galai M.S. Effect of vibroimpact treatment on the physical and mechanical properties of the surface layer of welded joints in rails. *Welding International*. 2014, vol. 28, no. 3, pp. 245–247.
- 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.
- Karimine K., Uchino K., Okamura M. Susceptibility to and occurrence of HAZ liquation cracking in rail steels: Study of rail welding with high-C welding materials (4th Report). *Welding International*. 1997, vol. 11, no. 6, pp. 452–461.
- Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets Yu.V., Didkovskii A.V., Chvertko P.N., Shvets V.I., Mikitin Ya.I. Technology and equipment for resistance flash welding of railway crossings with rail ends through an austenitic insert. *Welding International*. 2008, vol. 22, no. 5, pp. 338–341.
- Irving B. Long Island Rail Road orders an all-welded fleet. *Welding Journal*. 1997, vol. 22, no. 9, pp. 33–37.
- Klimenko L.B. Continuous rail – a progressive rail construction. *Prilozhenie k zhurnalu "Mir transporta" MKZhT MPS RF*. 2004, no. 1, pp. 88–93. (In Russ.).
- Kalashnikov E.A., Korolev Yu.A. Rail welding technology: trends in Russia and abroad. *Put' i putevye khozyaistvo*. 2015, no. 8, pp. 2–6. (In Russ.).
- Sergejevs D., Mikhaylovs S. Analysis of factors affecting fractures of rails welded by alumino-thermic welding. *Transport Problems*. 2008, vol. 3, pp. 33–37.
- Mitsuru F., Hiroaki N., Kiyoshi N. Rail flash-butt welding technology. *JFE Technical Report*. 2015, no. 20, pp. 159–163.
- 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.
- Dahl B., Mogard B., Grefott B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding. *Svetsaren*. 1995, vol. 50, no. 2, pp. 10–14.
- Takimoto T. Latest welding technology for long rail and its reliability. *Tetsu-to-Hagane*. 1984, vol. 70, no. 10, pp. 40–45.
- 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.
- Shur E.A. Influence of the structure on operational stability of rails. In: *Vliyanie svoistv metallicheskoj matritsy na ekspluatatsionnyu stoikost' rel'sov. Materialy II Vseros. Nauch.-tekhn. seminar (Ekaterinburg, 16-17 maya, 2006 g.)* [Influence of the metal matrix properties on the operational stability of rails. Materials of the II All-Russian Sci. and Tech. Seminar (Ekaterinburg, May 16-17, 2006)]. Ekaterinburg: izd. UIM, 2006, pp. 37–63. (In Russ.).
- Weingrill L., Krutzler J., Enzinger N. Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails. *Materials Science Forum*. May 2016, vol. 879, pp. 2088–2093.
- Shur E.A., Rezanov V.A. Integrated method of resistance welding of rails. *Vestnik VNIIZhT*. 2012, no. 3, pp. 20–22. (In Russ.).
- Gudkov A.V., Nikolin A.I., Turbina L.A., Nasonov D.S., Averkina V.A. Resistance welding of rails and heat treatment of welded joints of rails of modern production at rail welding enterprises of OJSC Russian Railways. In: *Svarochnye i naplavochnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte. Sb. nauch. tr. OAO "VNIIZhT"* [Welding and surfacing technologies in railway transport. Coll. of sci. works of OJSC "VNIIZhT"]. Gudkov A.V. ed. Moscow: Intekst, 2008, pp. 42–49. (In Russ.).
- Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Patrushev A.O., Usoltsev A.A. Multi-factor regression analysis of the process of rails contact welding on K1000 machine. *Metallurgy 2017. IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 411, article 012088.
- Protopopov E.V., Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Kryukov R.E., Feiler S.V., Usoltsev A.A. *Sposob kontaktnoi stykovoï svarki rel'sov* [Method for resistance butt welding of rails]. Patent RF no. 2641586. MPK V 23 K 11/04. *Byulleten' izobretenii*. 2018, no. 2. (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 "Development of physicochemical and technological fundamentals of creation 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. Usoltsev, 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)

L.P. Bashchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Power and Ecology" (luda.baschenko@gmail.com)

Received December 24, 2019

Revised January 24, 2020

Accepted January 31, 2020

УДК 621.771.25.04.001.5

ОСОБЕННОСТИ ОСВОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ-РАЗДЕЛЕНИЯ НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ НЕПРЕРЫВНОМ МЕЛКОСОРТНОМ СТАНЕ

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

Никитин А.Г.¹, д.т.н., профессор кафедры «Механика и машиностроение»

Беляев С.В.², д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Литейное производство»

Добрянский А.В.³, старший калибровщик рельсобалочного цеха

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

² Сибирский федеральный университет
(660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79)

³ АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
(654042 Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, Космическое шоссе, 16)

Аннотация. В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция на увеличение объемов промышленного и гражданского строительства.

Это в свою очередь вызывает необходимость увеличения производства строительных профилей и в особенности арматуры. Одним из перспективных путей увеличения производства арматуры на действующих прокатных станах является освоение технологии прокатки-разделения. Такая технология позволяет без больших капитальных затрат повысить производительность действующих мелкосортных станов и снизить энергозатраты. Однако, несмотря на кажущуюся простоту, внедрение технологии прокатки-разделения на действующих предприятиях вызывает трудности, связанные с недостаточной освещенностью этого опыта в литературе. Приведен опыт внедрения технологии прокатки-разделения на действующем непрерывном мелкосортном стане. Исследования проведены на оборудовании, имеющемся в цехе и используемом для мониторинга загрузки главных двигателей. Изучены особенности распределения энергозатрат по клетям при классической прокатке и с использованием технологии прокатки-разделения арматуры № 10, № 14 из стали марок 35ГС и 3ПС. На экспериментальных графиках загрузки главных двигателей прокатного стана показано перераспределение энергозатрат по клетям черновой, промежуточной и чистовой групп при использовании технологии прокатки-разделения. Приведены в графическом виде данные по использованию мощности главных двигателей и распределению удельной нагрузки по клетям при классическом способе прокатки и с использованием технологии прокатки-разделения. Анализ полученных данных позволил выявить особенности энергопотребления при освоении технологии прокатки-разделения на действующем производстве. Показано, что использование технологии прокатки-разделения приводит к дополнительной нагрузке клетей чистовых групп. Количественно оценена экономия электроэнергии при внедрении технологии прокатки-разделения. Установлено, что с уменьшением номера арматуры эффективность увеличивается. Уменьшение энергозатрат при освоении технологии прокатки-разделения на действующем производстве связано с уменьшением машинного времени.

Ключевые слова: технология прокатки-разделение, действующее производство, энергозатраты, машинное время, эффективность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-313-317

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы у нас в стране и за рубежом наблюдается устойчивая тенденция на увеличение объемов строительных работ. Разрабатываются новые строительные технологии [1 – 5], в основе которых – использование большого объема железобетонных и металлических конструкций. Такое положение дел вызывает необходимость увеличения объемов выпуска прокатной продукции строительного назначения. Согласно результатам исследований, проведенных в работе [6], производство и потребление на мировом рынке профилей строительного назначения имеет устойчивый рост (8 % в год). Из всего многообразия профилей строительного назначения основная (64,6 %) доля приходится на арматурные профили, прокатываемые

на мелкосортных и мелкосортно-проволочных станах. Одним из перспективных путей повышения производительности мелкосортных станов является освоение технологии прокатки-разделения, которая в последнее время активно внедряется на действующих прокатных станах [7 – 16]. Однако при кажущейся простоте этот процесс растягивается на большой период, что связано с недостаточной его изученностью и малым объемом информации об опыте внедрения рассматриваемой технологии на действующем производстве в технической литературе.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучение особенностей использования технологии прокатки-разделения проводили на действующем

непрерывном мелкосортном стане 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Описание технологического процесса на этом стане, результаты изучения перспектив внедрения технологии прокатки-разделения, разработанные калибровки и данные предварительных исследований приведены в работах [17 – 20]. Целью исследований было изучение особенностей изменения энергопотребления при переводе действующего производства на технологию прокатки-разделения. Измерение токовых нагрузок и противо-ЭДС главных двигателей при прокатке арматуры классическим способом и с использованием технологии прокатки-разделения проводили на имеющемся в цехе оборудовании для мониторинга процесса прокатки. В качестве объектов исследования выбраны арматурные профили № 10, № 14 из стали марок 3ПС и 35ГС.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обработанные результаты замеров токовой нагрузки приведены на рис. 1. Из полученных данных следует, что переход от классической технологии к технологии

прокатки-разделения не привел к существенному увеличению токовой нагрузки черновых и промежуточных клетей несмотря на сокращение количества используемых клетей при прокатке арматуры № 14. Загрузка чистовых клетей, участвующих в разделении (клеть 15) и последующей прокатке в две нитки (клетки 16, 17), увеличилась по сравнению с классической схемой прокатки, однако не превысила допустимый токовый порог. Согласно результатам замеров с увеличением номера арматуры загрузка некоторых клетей увеличивается, приближаясь к максимально допустимым значениям. Так, при прокатке арматуры № 14 по технологии прокатки-разделения в клетях 6 и 17 токовые нагрузки близки к предельным значениям.

На рис. 1 представлены данные по замеру токовой нагрузки при прокатке арматуры из стали марок 35ГС и 3ПС. Нагрузка при прокатке стали 3ПС ожидаемо меньше, чем при прокатке стали 35ГС. Распределения токовой нагрузки по клетям при прокатке этих сталей практически одинаковы.

Так как токовая нагрузка в черновых и промежуточных клетях изменилась незначительно при реализации

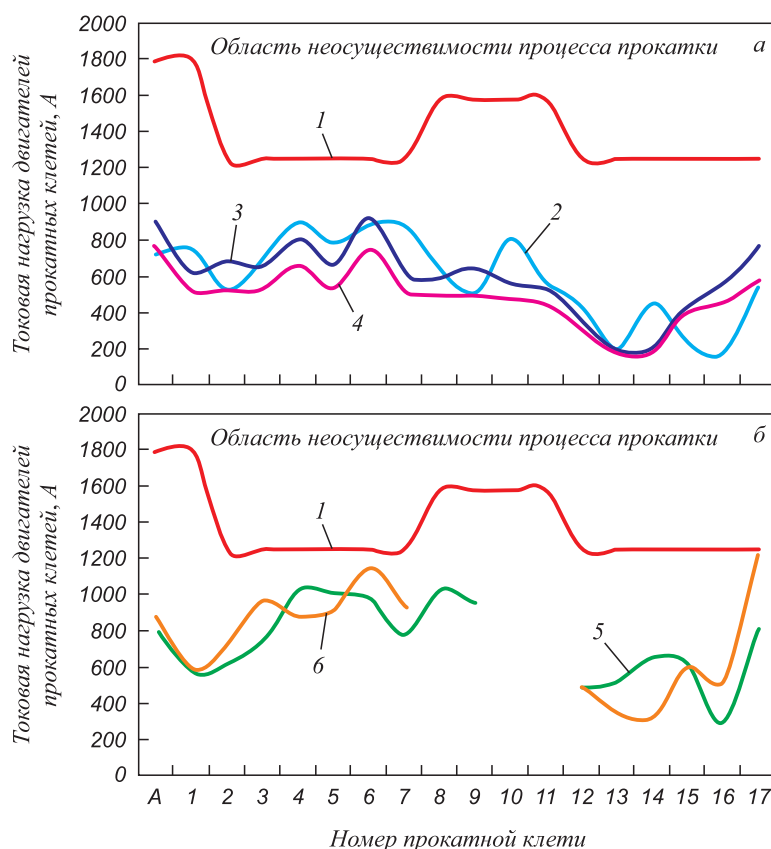


Рис. 1. Ток аварийного отключения главных двигателей (1) и токовая нагрузка главных двигателей непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» при прокатке арматуры № 10 (а) и № 14 (б) классическим способом, арматура № 10 (2) и № 14 (5) (35ГС) и способом прокатки-разделения, арматура № 10 (3) и № 14 (6) (35ГС), арматура № 10 (4) (3ПС)

Fig. 1. Current load of the main engines of 250-1 continuous small-grade mill of JSC “EVRAZ ZSMK” when rolling reinforcing bars No. 10 (a) and No. 14 (b) by classical and rolling-separation methods: emergency shutdown current of the main engines (1); classical method, reinforcing bars No. 10 (2) and No. 14 (5) (35GS); rolling-separation method, reinforcing bars No. 10 (3) and No. 14 (6) (35GS), reinforcing bars No. 10 (4) (3PS)

технологии прокатки-разделения за исключением чистовых клетей 15 – 17, а скоростной режим, машинное время изменились существенно, то возникла необходимость оценить особенности загрузки двигателей по мощности и удельному расходу энергии. Для этого использовали зависимости и результаты замеров токовой нагрузки J_n якоря и противо-ЭДС E_n главных двигателей:

$$N_{\text{дв}} = E_n J_n; \quad (1)$$

$$E_n = cn\Phi, \quad (2)$$

где c – постоянный коэффициент, зависящий от числа пар полюсов, проводников и числа параллельных витков обмотки якоря; n – частота вращения вала двигателя; Φ – величина магнитного потока.

Полученные результаты загрузки двигателей по мощности и удельному расходу энергии приведены на рис. 2, из которого видно, что мощность, затраченная

на формоизменение по клетям, не превышает допустимый предел. Единственное опасение вызывает клеть 6, где при получении арматуры № 14 прокаткой-разделением двигатель работает с предельной нагрузкой.

Особенность загрузки главных двигателей черновых и промежуточных клетей – нагрузка по мощности при реализации процесса прокатки-разделения на 20 – 25 % выше, чем при классической прокатке, что объясняется большей скоростью прокатки. В чистовых клетях 12 – 14 нагрузка по мощности примерно одинакова при прокатке разными способами, а в клетях 15 – 17 наблюдается увеличение нагрузки при прокатке-разделении примерно на 15 – 25 %.

Удельный расход электроэнергии при прокатке-разделении значительно меньше, чем при классическом способе, что связано с меньшим машинным временем. Общие удельные затраты электроэнергии при прокатке арматур № 10, № 14, полученных разными способами, приведены на рис. 3. Абсолютное снижение затрат электроэнергии составит 27,7 кВт·ч/т для арматурно-

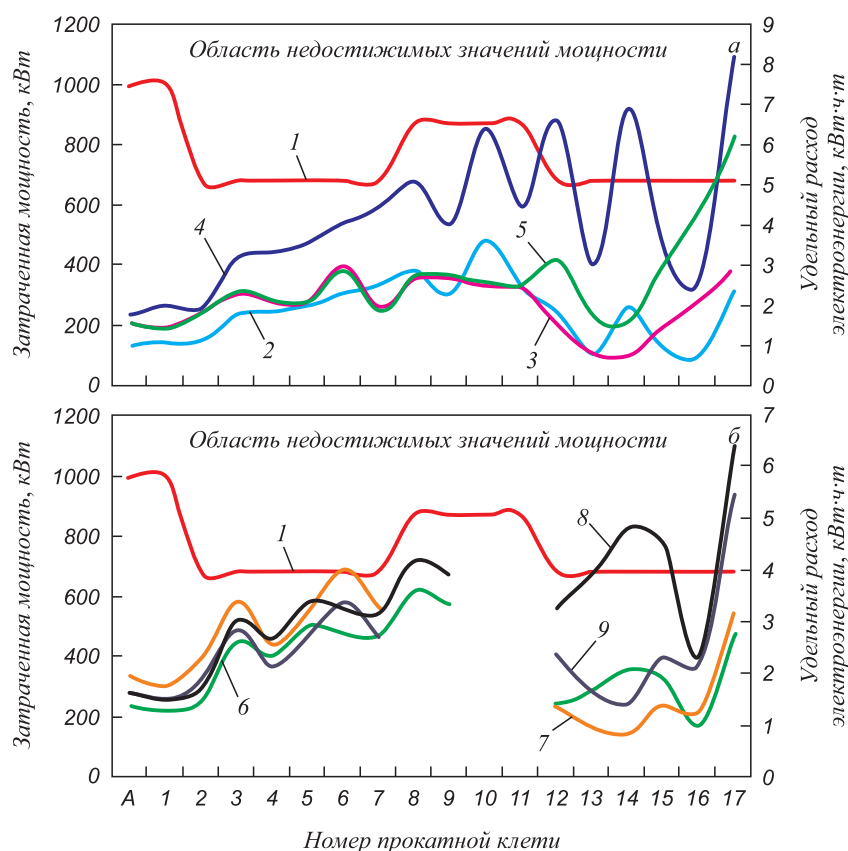


Рис. 2. Ток аварийного отключения главных двигателей (1), затраченная мощность при классическом способе (арматура № 10 (2) и № 14 (6)) и прокатке-разделении (арматура № 10 (3) и № 14 (7)), удельный расход энергии при классическом способе (арматура № 10 (4) и № 14 (8)) и прокатке-разделении (арматура № 10 (5) и № 14 (9)) на непрерывном мелкосортном стане 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Fig. 2. Power consumption and specific energy consumption during rolling of reinforcing bars No. 10, No. 14 on 250-1 continuous small-grade mill of JSC “ERAZ ZSMK”: emergency shutdown current of the main engines (1); expended power with classical (reinforcing bars No. 10 (2) and No. 14 (6)) and rolling-separation methods (reinforcing bars No. 10 (3) and No. 14 (7)); specific energy consumption for classical (reinforcing bars No. 10 (4) and No. 14 (8)) and rolling-separation methods (reinforcing bars No. 10 (5) and No. 14 (9))

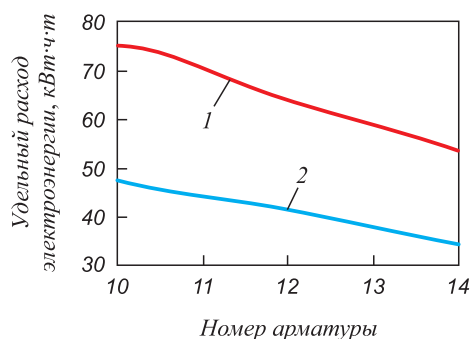


Рис. 3. Удельный расход электроэнергии при получении арматур № 10, № 14 на непрерывном мелкосортном стане 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» классическим способом (1) и способом прокатки-разделения (2)

Fig. 3. Specific energy consumption at production of reinforcing bars No. 10, No. 14 on 250-1 continuous small-grade mill of JSC «EVRAZ ZSMK» using classical method (1) and rolling-separation method (2)

го профиля № 10 и 19,6 кВт·ч/т – для профиля № 14. Наиболее перспективными в плане экономии электроэнергии являются арматурные профили небольших размеров.

При изучении процесса прокатки-разделения рассматривали вопросы качества получаемой готовой продукции. Качество оценивали по соответствию профиля требованиям ГОСТ Р52544 – 2006 и наличию (или отсутствию) дефектов поверхности. Обмер и осмотр арматурных профилей, полученных по технологии прокатки-разделения, подтвердил соответствие профиля требованиям ГОСТ Р52544 – 2006, а использование при продольном разделении принципа резания полностью исключило наличие заусенца, тем самым снизило количество брака.

Выводы

Изучено изменение энергопотребления главных двигателей при переводе непрерывного мелкосортного стана на прокатку арматуры по технологии прокатки-разделения. Установлено, что при переводе действующего стана на технологию прокатки-разделения увеличивается нагрузка по мощности на первые клетки черновой группы и на последние клетки чистовой группы. Доказано, что освоение технологии прокатки-разделения снижает удельные энергозатраты на производство готовой продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Brown V.L., Bartholomew C.L. FRP reinforcing bars in reinforced concrete members – closure // *ACI Materials Journal*. 1993. Vol. 90. No. 6. P. 629 – 630.

2. Young-Jun You, Hwan Park, Hyeong-Yeol Kim, Ji-Sun Park. Hybrid effect on tensile properties of FRP rods with various material compositions // *Composite Structures*. 2007. Vol. 80. No. 1. P. 117 – 122.
3. Hughes Brothers. Glass Fiber Reinforced Polymer Rebar. – Hughes Brothers, 1997. – 15 p.
4. Liu J., Wang F., Zhou H., Wang E., Cao P. Study on shear strength of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) rebar concrete piles with circular cross-sections // *China Civil Engineering Journal*. 2016. Vol. 49. No. 9. P. 103 – 109.
5. Yazdanbakhsh A., Bank L.C., Chen C. Use of recycled FRP reinforcing bar in concrete as coarse aggregate and its impact on the mechanical properties of concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 121. P. 278 – 284.
6. Тахаутдинов Р.С., Федонин О.В., Пугачев В.Г. и др. Мировой рынок проката и перспективы развития сортопрокатного производства в России // *Производство проката*. 2008. № 5. С. 22 – 27.
7. Sato R. The rolling of products using slit – rolling process // *NKK Report*. 1980. No. 3. P. 42 – 46.
8. Palmer L.W. Slit rolling technology // *World Steel & Metalworking*. 1984 – 1985. Vol. 6. P. 147 – 149.
9. Matsuo G., Suzuki M. The latest technology of multi-slit rolling // *SEAI Quarterly*. 1995. No. 3. P. 49 – 58.
10. Hewitt E.C. Developments in rolling mill technology. In: *Steel Industrial Eighties. Processes International Conference*, Amsterdam. 1979. P. 150 – 156.
11. Жучков С.М. Особенности конструкции устройства продольного разделения раската для трехниточной прокатки – разделения // *Металлург*. 2000. № 11. С. 42, 43.
12. Жучков С.М. Использование неприводных деформирующих средств в процессе двоянной прокатки с продольным разделением раската в потоке стана // *Сталь*. 1997. № 7. С. 37 – 41.
13. Жучков С.М. Особенности технологической схемы процесса трехниточной прокатки – разделения на мелкосортном стане 320/150 Белорусского металлургического завода // *Металлург*. 2001. № 1. С. 46, 47.
14. Многолучевая прокатка – разделение / В.М. Клименко, С.П. Ефименко, В.Ф. Губайдулин, Г.М. Шульгин. – М.: Металлургия, 1982. – 167 с.
15. Следнев В.П. Спаренная прокатка сортовых профилей. – М.: Металлургия, 1988. – 167 с.
16. Жучков С.М., Филиппов В.В., Тищенко В.А., Бондаренко А.Н. Направление развития технологии прокатки – разделения на стане 320/150 // *Сталь*. 2001. № 10. С. 33 – 35.
17. Фастыковский А.Р., Уманский А.А. Теория и практика ресурсосберегающих технологий производства сортового проката на действующих непрерывных станах // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2015. Т. 58. № 5. С. 322 – 327.
18. Ефимов О.Ю., Чинокалов В.Я., Фастыковский А.Р., Копылов И.В. Использование технологии прокатки – разделения на стане 250-1 // *Сталь*. 2008. № 8. С. 78 – 80.
19. Фастыковский А.Р. К вопросу продольного разделения полосы неприводными устройствами в потоке прокатного стана // *Производство проката*. 2009. № 3. С. 4 – 8.
20. Фастыковский А.Р., Волков К.В., Перетяшко В.Н., Ефимов О.Ю., Чинокалов В.Я. Совершенствование технологии производства арматурных профилей на непрерывных мелкосортных станах // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2011. № 10. С. 18 – 21.

Поступила в редакцию 24 декабря 2019 г.
После доработки 24 января 2020 г.
Принята к публикации 31 января 2020 г.

FEATURES OF THE ROLLING-SEPARATION TECHNOLOGY DEVELOPMENT ON OPERATING CONTINUOUS SMALL-GRADE MILL

A.R. Fastyskovskii¹, A.G. Nikitin¹, S.V. Belyaev², A.V. Dobryanskii³

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

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

³ JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant”, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. At present, there is a steady tendency to increase volume of industrial and civil construction in Russia and abroad. This in turn makes it necessary to enhance production of structural sections and in particular – reinforcing bar. One of the promising ways to increase production of reinforcing bar at existing rolling mills is development of rolling-separation technology. This technology provides growth in productivity of existing small-grade mills and reduces energy costs without large capital expenditures. However, despite its apparent simplicity, introduction of rolling-separation technology at existing enterprises causes difficulties associated with insufficient coverage of this experience in literature. The article presents experience of introduction of the rolling-separation technology on operating continuous small-grade mill. The research was carried out on equipment available in the workshop and used to monitor load of the main engines. Features of energy costs distribution on stands were studied at classical rolling and with the use of technology of rolling-separation of reinforcing bar No. 10, No. 14 made of 35GS and 3PS steel. Experimental graphs of the main engines of the rolling mill load show redistribution of energy consumption in stands for roughing, intermediate and finishing groups when using rolling-separation technology. Data on application of the main engine power and distribution of the specific load on the stands in classical rolling method and using rolling-separation technology are presented in graphic form. Analysis of the received data allowed us to reveal features of energy consumption at development of rolling-separation technology during operation. It is shown that use of this technology leads to additional load on stands of finishing groups. Energy savings during introduction of rolling-separation technology were quantified, and it was found that with a decrease of the rebar number, efficiency increases. Reduction of energy consumption during development of this technology in current production is associated with a decrease in machine time.

Keywords: rolling-separation technology, operating production, energy consumption, machine time, efficiency.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-313-317

REFERENCES

1. Brown V.L., Bartholomew C.L. FRP reinforcing bars in reinforced concrete members – closure. *ACI Materials Journal*. 1993, vol. 90, no. 6, pp. 629–630.
2. Young-Jun You, Hwan Park, Hyeong-Yeol Kim, Ji-Sun Park. Hybrid effect on tensile properties of FRP rods with various material compositions. *Composite Structures*. 2007, vol. 80, no. 1, pp. 117–122.
3. Hughes Brothers. *Glass Fiber Reinforced Polymer Rebar*. Hughes Brothers, 1997, 15 p.
4. Liu J., Wang F., Zhou H., Wang E., Cao P. Study on shear strength of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) rebar concrete piles with circular cross-sections. *China Civil Engineering Journal*. 2016, vol. 49, no. 9, pp. 103–109.
5. Yazdanbakhsh A., Bank L.C., Chen C. Use of recycled FRP reinforcing bar in concrete as coarse aggregate and its impact on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 121, pp. 278–284.
6. Takhautdinov R.S., Fedonin O.V., Pugachev V.G. etc. Global market of rolling products and prospects for development of rolling production in Russia. *Proizvodstvo prokata*. 2008, no. 5, pp. 22–27. (In Russ.).
7. Sato R. The rolling of products using slit – rolling process. *NKK Report*. 1980, no. 3, pp. 42–46.
8. Palmer L.W. Slit rolling technology. *World Steel & Metalworking*. 1984–1985, vol. 6, pp. 147–149.
9. Matsuo G., Suzuki M. The latest technology of multi-slit rolling. *SEISI Quarterly*. 1995, no. 3, pp. 49–58.
10. Hewitt E.C. Developments in rolling mill technology. In: *Steel Industrial Eighties. Processes International Conference, Amsterdam*, 1979, pp. 150–156.
11. Zhuchkov S.M. Particularities in design of device for slitting the workpiece in three-strand rolling-slitting process. *Metallurgist*. 2000, no. 11, pp. 42, 43. (In Russ.).
12. Zhuchkov S.M. Use of idler work rolls in two-high rolling with longitudinal stock slitting in mill line. *Steel in Translation*. 1997, vol. 27, no. 7, pp. 28–33.
13. Zhuchkov S.M. Particularities in technological scheme for process of three-strand rolling-slitting at 320/150 wire-rod mill. *Metallurgist*. 2001, no. 1, pp. 46, 47. (In Russ.).
14. Klimenko V.M., Efimenko S.P., Gubaidulin V.F., Shul'gin G.M. *Mnogoruch'evaya prokatka – razdelenie* [Multi-strand rolling – separation]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 167 p. (In Russ.).
15. Slednev V.P. *Sparennaya prokatka sortovykh profilei* [Mated rolling of section bars]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 167 p. (In Russ.).
16. Zhuchkov S.M., Filippov V.V., Tishchenko V.A., Bondarenko A.N. Rolling and splitting in the 320/150 mill. *Steel in Translation*. 2001, vol. 30, no. 10, pp. 40–42.
17. Fastyskovskii A.R., Umanskii A.A. Theory and practice of resource-saving technologies of mill bar production at the operating continuous rolling mills. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 5, pp. 322–327. (In Russ.).
18. Efimov O.Yu., Chinokalov V.Ya., Fastyskovskii A.R., Kopylov I.V. Employing rolling and separation technology in the 250-1 mill. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 8, pp. 671–673.
19. Fastyskovskii A.R. On strip longitudinal separation by non-drive devices in the flow of rolling mill. *Proizvodstvo prokata*. 2009, no. 3, pp. 4–8. (In Russ.).
20. Fastyskovskii A.R., Volkov K.V., Peretyat'ko V.N., Efimov O.Yu., Chinokalov V.Ya. Improvement of the production technique of re-bars at continuous light-section rolling mill. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 10, pp. 18–21. (In Russ.).

Information about the authors:

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

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

S.V. Belyaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Foundry”

A.V. Dobryanskii, Senior Calibrator of Rail and Beam Shop

Received December 24, 2020

Revised January 24, 2020

Accepted January 31, 2020

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ*

Уманский А.А.¹, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных
металлов (umanskii@bk.ru)

Дорофеев В.В.², д.т.н., главный калибровщик рельсобалочного
цеха (vladimir.dorofeev@evraz.com)

Думова Л.В.¹, старший преподаватель кафедры «Менеджмент и отраслевая
экономика» (doumova@bk.ru)

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

² АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
(654043, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ш. Космическое, 16)

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования методами горячих механических испытаний образцов на кручение и сжатие. Получены зависимости сопротивления пластической деформации рельсовых сталей, легированных хромом, от термомеханических параметров деформации (степень, скорость и температура деформации) и химического состава рассматриваемых сталей. По полученным данным повышение скорости и снижение температуры деформации обуславливает увеличение сопротивления пластическому деформированию, а влияние относительной деформации на сопротивление пластической деформации имеет нелинейный характер с выраженным максимумом при степени деформации порядка 0,25. С использованием методики множественного регрессионного анализа изучено влияние химического состава рельсовых сталей марок 76ХФ, 76ХСФ и 90ХАФ на их сопротивление пластической деформации. Повышение содержания углерода, марганца, ванадия, азота, серы и фосфора в фактическом интервале изменения их концентраций приводит к увеличению сопротивления рассматриваемых рельсовых сталей пластическому деформированию. Раскрыт механизм влияния перечисленных химических элементов на сопротивление рельсовых сталей пластической деформации. Аппроксимация полученных данных позволила определить интервал изменения сопротивления деформации при варьировании химического состава в рамках фактического интервала изменения содержания элементов. Величина указанного интервала составила до 19 % от абсолютного значения сопротивления деформации. При варьировании содержания химических элементов в интервале, оговоренном в ГОСТ на производство железнодорожных рельсов, величина интервала сопротивления деформации составила до 30 %. Проверка адекватности полученных зависимостей, проведенная путем осциллографирования работы двигателей приводов обжимных клетей рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» при прокатке непрерывно литых заготовок различного химического состава, позволила подтвердить выявленные закономерности.

Ключевые слова: железнодорожные рельсы, рельсовые стали, энергосиловые параметры прокатки, химический состав, термомеханические параметры деформации, сопротивление пластической деформации.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-318-326

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы имеет место четко выраженная тенденция по повышению требований к эксплуатационным характеристикам железнодорожных рельсов, что обусловлено увеличением грузонапряженности железнодорожных путей. По имеющимся данным за период с 2010 г. по 2018 г. грузонапряженность в целом по России возросла на 24 %, а по Восточному региону (Сибирь и Дальний Восток) зафиксирован рост данного показателя на 34 %.

В настоящее время гарантированный эксплуатационный ресурс железнодорожных рельсов произ-

водства АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») составляет 750 млн т брутто на прямых участках пути, что в несколько раз превышает данный показатель десятилетней давности. Значительное увеличение эксплуатационной стойкости рельсов достигнуто за счет коренного изменения технологии производства рельсовой продукции на всех этапах производственного цикла, начиная от выплавки стали и заканчивая термообработкой рельсов [1]. В настоящее время основная масса железнодорожных рельсов как общего назначения, так и повышенной износостойкости и контактной выносливости, производится из рельсовых сталей, дополнительно легированных хромом. При этом для рельсов всех категорий применяется дифференцированная закалка с прокатного нагрева [2]. Следует также отме-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420011 с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Материаловедение».

тить значительное повышение чистоты рельсовой стали по неметаллическим включениям и газам [3].

Основными направлениями дальнейшего увеличения эксплуатационной стойкости рельсов до 2,0 – 2,5 млрд т брутто являются разработка рельсовых сталей новых марок и совершенствование режимов термообработки. В частности, рассматриваются варианты производства рельсов из заэвтектоидных сталей и закалки с отдельного нагрева.

Необходимым условием конкурентоспособности рельсов с повышенными эксплуатационными характеристиками является энергоэффективность их производства, которая в значительной степени определяется наличием научно-обоснованных данных о деформационных характеристиках рельсовой стали новых марок. При производстве прокатной продукции, в том числе рельсов, одной из основных характеристик, определяющих величину нагрузок на оборудование (прокатные валки, механизмы клетки, электродвигатели), является сопротивление пластической деформации.

Величина сопротивления деформации зависит как от термомеханических параметров деформации (температура, скорость и степень деформации), так и от физико-химических свойств прокатываемой стали (химический и фазовый состав, величина зерна). При этом большинство теоретических и экспериментальных исследований посвящено получению количественных зависимостей сопротивления сталей пластическому деформированию от термомеханических параметров деформации [4 – 22], а данные о влиянии химического состава сталей на сопротивление деформации носят оценочный характер либо имеют значительное ограничение по области применения. Так, например, в рабо-

те [19] утверждается, что сопротивление деформации среднемарганцовистых сталей (марок 15Г – 50Г) незначительно превышает данный показатель для сталей с аналогичным составом, но не легированных марганцем. Аналогичное суждение высказывается и о сталях, легированных хромом в концентрации 0,7 – 1,0 % (марки 15Х – 50Х). Влияние ванадия при его концентрации до 0,2 – 0,4 % на сопротивление деформации этими же авторами признается не значимым. В целом влияние легирующих элементов признается значимым только при их высокой концентрации или комплексном легировании несколькими элементами. Наибольшее же влияние на сопротивление деформации оказывает содержание углерода, который заметно снижает пластические и повышает прочностные свойства сталей. Рядом авторов разработаны формулы, учитывающие одновременное влияние термомеханических параметров деформации и химического состава стали на сопротивление пластической деформации (формулы Андреюка-Тюленева [20], А.В. Третьякова и В.И. Зюзина [19], Б.А. Мигачева [21]). Однако эти формулы не являются универсальными из-за наличия эмпирических коэффициентов (констант), полученных для сталей определенных марок.

Исходя из вышеописанного подхода влияние изменения содержания легирующих элементов в рамках интервала, оговоренного для стали конкретной марки, закономерно признается не значимым. Однако на практике использование данного допущения приводит к значительной погрешности расчетных данных. Так, по данным работ [23, 24] применение имеющихся методик расчета сопротивления деформации не позволяет получать стабильно низкую погрешность расчетных данных: погрешность может достигать 25 % и более.

Применительно к рельсовым сталям можно констатировать, что действующим стандартом (ГОСТ Р 51685 – 2013) допускается значительный интервал изменения содержания легирующих элементов, а также углерода в сталях, используемых для массового производства рельсов (марки 76ХФ, 76ХСФ, 90ХАФ) (табл. 1).

Таким образом, применительно к указанным рельсовым сталям исследование влияния химического состава на сопротивление деформации является актуальной задачей.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования сопротивления деформации рельсовых сталей марок 76ХФ, 76ХСФ и 90ХАФ проводили методами горячих механических испытаний, в том числе кручения и осадки. Использование различных экспериментальных методов определения сопротивления сталей пластическому деформированию позволяет повысить точность результатов. Сопротивление деформации в значительной степени зависит от схемы напря-

Т а б л и ц а 1

Химический состав рельсовых сталей по ГОСТ Р 51685 – 2013

Table 1. Chemical composition of rail steels according
to the state standard GOST R 51685 – 2013

Элемент	Содержание элемента, %, в стали		
	76ХФ	76ХСФ	90ХАФ
C	0,71 – 0,82	0,71 – 0,82	0,83 – 0,95
Mn	0,75 – 1,25	0,75 – 1,25	0,75 – 1,25
Si	0,25 – 0,60	0,30 – 1,10	0,25 – 0,60
V	0,03 – 0,15	0,05 – 0,15	0,08 – 0,15
Cr	0,20 – 0,80	0,50 – 1,25	0,20 – 0,60
N	–	–	0,01 – 0,02
S	<0,02	<0,02	<0,02
P	<0,02	<0,02	<0,02
Cu	<0,20	<0,20	<0,20
Ni	<0,15	<0,15	<0,15

женного состояния при деформации, которая, в свою очередь, определяется видом испытания образца (растяжение, сжатие, кручение). Так, при испытаниях на сжатие (метод осадки) сопротивление деформации больше примерно на 10 % относительно результатов испытаний на растяжение. При использовании метода кручения значения сопротивления деформации будут находиться в диапазоне между значениями, полученными при испытаниях на растяжение и сжатие, так как образец деформируется только под действием касательных напряжений.

Для исследований сопротивления деформации методом горячего кручения использована специализированная лабораторная установка (рис. 1). Принцип работы установки заключается в следующем. Образец, имеющий цилиндрическую форму с головками с обеих сторон, помещается в предварительно нагретую до нужной температуры печь сопротивления (рис. 1, б), внутри которой фиксируется в пазах подвижного и неподвижного валов. Затем после выдержки в течение 10 мин, проводимой с целью полного и равномерного нагрева образца, подвижный вал приводится в движение с по-

мощью электродвигателя. Угол и скорость вращения являются регулируемыми. Сопротивление пластическому деформированию методом сжатия исследовали на установке «Gleeble System 3800» с использованием модуля «Hydrawedge» («Гидромолот») путем деформации цилиндрических образцов между двумя плоскими бойками (вариант деформации «Flow Stress»).

В качестве объекта экспериментальных исследований использовали образцы непрерывно литых заготовок рельсовых сталей вышеуказанных марок текущего производства электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК». При выборе образцов руководствовались получением максимального интервала изменения содержания основных химических элементов (табл. 2).

Исследования проводили при температурах деформации 900 – 1150 °С с шагом 50 °С, скорости деформации 5 – 15 с⁻¹ с шагом 5 с⁻¹ и относительной деформации 0,05 – 0,40 с шагом 0,05. Указанные интервалы соответствуют термомеханическим параметрам прокатки в обжимных клетях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

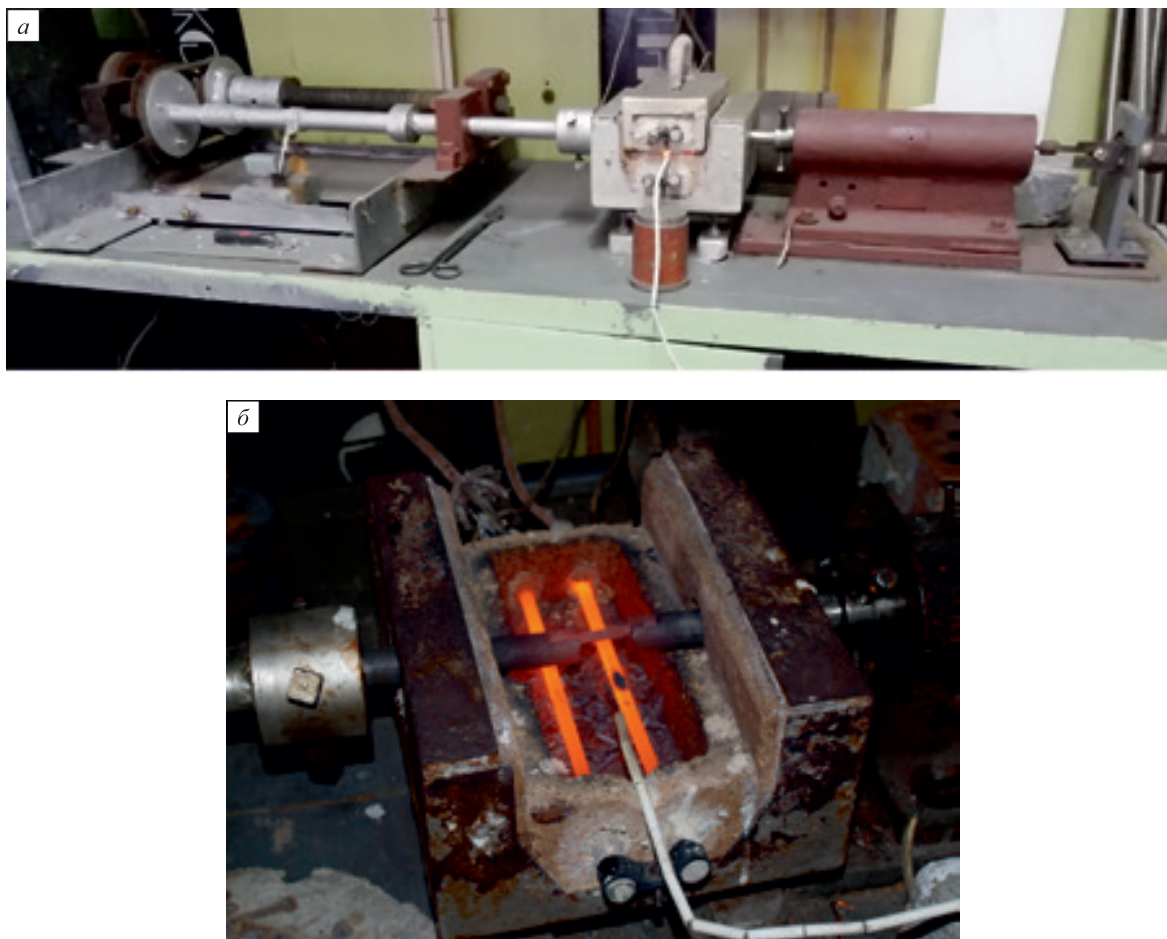


Рис. 1. Лабораторная установка для определения сопротивления пластической деформации методом горячего кручения: а – общий вид; б – размещение образца в печи сопротивления

Fig. 1. Laboratory unit for determining resistance to plastic deformation by hot torsion: а – general view; б – sample placing in resistance furnace

Таблица 2

Фактический химический состав
исследуемых рельсовых сталейTable 2. Actual chemical composition
of the studied rail steels

Элемент	Содержание элемента, %, в стали		
	76ХФ	76ХСФ	90ХАФ
C	0,72 – 0,80	0,73 – 0,78	0,84 – 0,93
Mn	0,82 – 0,97	0,78 – 0,96	0,76 – 0,95
Si	0,39 – 0,56	0,33 – 0,64	0,42 – 0,53
V	0,03 – 0,07	0,04 – 0,08	0,08 – 0,11
Cr	0,36 – 0,54	0,52 – 0,69	0,24 – 0,39
N	0,006 – 0,012	0,007 – 0,011	0,010 – 0,015
S	0,009 – 0,018	0,007 – 0,017	0,007 – 0,016
P	0,008 – 0,015	0,005 – 0,016	0,006 – 0,014
Cu	0,07 – 0,14	0,06 – 0,11	0,06 – 0,12
Ni	0,05 – 0,11	0,04 – 0,09	0,03 – 0,12

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По полученным результатам увеличение относительной деформации до значений порядка 0,25 приводит к повышению сопротивления пластическому деформированию, а дальнейшее увеличение относительной деформации незначительно снижает данный показатель (рис. 2). При этом указанная зависимость наблюдается независимо от температуры и скорости деформации. Повышение скорости и снижение температуры деформации при одной и той же степени деформации обуславливает увеличение сопротивления пластическому деформированию. Полученные зависимости качественно согласуются с результатами ранее проведенных исследований применительно к рельсовым сталям [25, 26] и исследованиями других авторов для сталей схожего химического состава.

На основании математической обработки экспериментальных данных получены уравнения множественной регрессии, характеризующие влияние химического состава рассматриваемых рельсовых сталей на сопротивление деформации. Уравнения регрессии, полученные при сочетании термомеханических параметров, при которых формируется максимальное сопротивление деформации σ_s (относительная деформация 0,25, скорость деформации 15 с⁻¹, температура деформации 900 °C), приведены ниже:

– сталь 76ХФ:

$$\sigma_s = 82,4 + 77,8[C] + 63,5[Mn] + 131,7[V] + \\ + 1838,6[N] + 1071,4[S] + 1123,2[P];$$

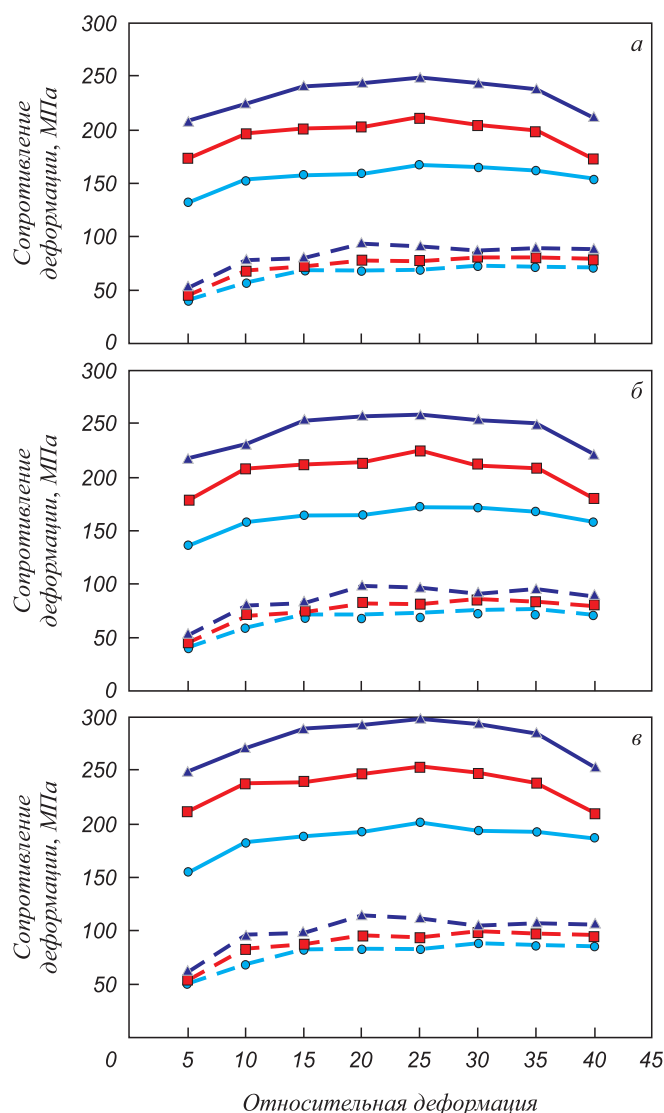


Рис. 2. Влияние термомеханических параметров деформации на сопротивление пластическому деформированию рельсовых сталей марок 76ХФ (а), Э76ХСФ (б), 90ХАФ (г):

— 900 °C; --- 1150 °C; Δ, □ и ○ – 15, 10 и 5 с⁻¹

Fig. 2. Effect of thermomechanical strain parameters on plastic deformation resistance of rail steels of 76KhF (a), E76KhSF (b), 90KhAF (g) grades:

— 900 °C; --- 1150 °C; Δ, □ and ○ – 15, 10 and 5 s⁻¹

– сталь 76ХСФ:

$$\sigma_s = 85,7 + 81,2[C] + 70,4[Mn] + 129,9[V] + \\ + 2007,6[N] + 1201,9[S] + 1237,6[P];$$

– сталь 90ХАФ

$$\sigma_s = 88,3 + 79,4[C] + 83,2[Mn] + 151,1[V] + \\ + 2358,4[N] + 1032,2[S] + 1376,5[P],$$

где в квадратных скобках приведены содержания элементов.

Аналогичные уравнения получены для всех сочетаний термомеханических параметров в рамках рассматриваемого интервала их изменения.

По полученным данным повышение содержаний углерода, марганца, ванадия, азота, серы и фосфора в рассматриваемом интервале изменения их концентраций приводит к увеличению сопротивления рельсовых сталей пластическому деформированию.

Характеризуя механизм влияния концентрации перечисленных химических элементов на сопротивление рельсовых сталей пластическому деформированию, можно отметить следующие основные моменты.

Полученные данные о влиянии содержания углерода в стали на сопротивление деформации согласуются с общепринятыми представлениями: повышение концентрации углерода в стали увеличивает ее прочностные характеристики, что связано с ростом относительного содержания цементита.

Фосфор присутствует в твердом растворе (феррите), повышает прочность и тем самым увеличивает сопротивление пластической деформации. Растворимость фосфора в железе значительно уменьшается при понижении температуры с 1,2 % при высоких температурах до 0,02 – 0,03 % при комнатной температуре, что обуславливает его склонность к сегрегации по границам зерен. Однако ввиду того, что концентрация фосфора в качественных сталях не превышает предела его растворимости, то практически весь фосфор растворен в железе.

Растворимость серы аналогично фосфору заметно уменьшается со снижением температуры, однако в отличие от фосфора имеет значительно меньшие абсолютные значения (0,05 % при температуре 1365 °С, 0,013 % при 1000 °С и 0,002 – 0,003 % при комнатной температуре). В результате практически вся сера выпадает по границам зерен в виде сульфидов железа или марганца при его высокой концентрации. С учетом

фактического содержания марганца в рассматриваемых сталях (табл. 2), а также основываясь на результатах ранее проведенных исследований [27], можно утверждать, что сульфиды железа практически отсутствуют, а сульфиды марганца (рис. 3, а) являются преобладающим типом неметаллических включений: имеют относительную концентрацию в готовых рельсах в пределах 30,8 – 43,4 ppm. Сульфиды марганца в отличие от сульфидов железа не оказывают резко отрицательного влияния на пластичность стали, так как их температура плавления (1620 °С) выше температуры горячей деформации. Однако ввиду более высокой по отношению к стали температуры плавления их пластичность при горячей деформации ниже, чем пластичность основного металла. В результате сопротивление деформированию в межкристаллитных прослойках возрастает, что сказывается на общем сопротивлении деформации.

Азот при наличии в стали достаточного количества нитридообразующих элементов (алюминия, ванадия, титана) практически полностью присутствует в виде соединений с ними (нитридов, карбонитридов). Указанные неметаллические включения являются непластичными, обладают высокой твердостью и характеризуются высокой температурой плавления. Таким образом, указанные включения повышают сопротивление стали пластическому деформированию. Рассматриваемые рельсовые стали легируются ванадием до достижения концентрации 0,03 – 0,11 %, содержание азота составляет до 0,015 % (по фактическим данным (табл. 2)), что предопределяет наличие нитридов и карбонитридов ванадия. По данным работы [28] в высокоуглеродистой литой стали образование карбонитридов ванадия возможно даже при отсутствии легирования азотом, достаточным является остаточное содержание азота в электростали. Кроме того, по результатам металлографических исследований установлено наличие в рельсах нитридов алюминия баллом от 16 до 36 по

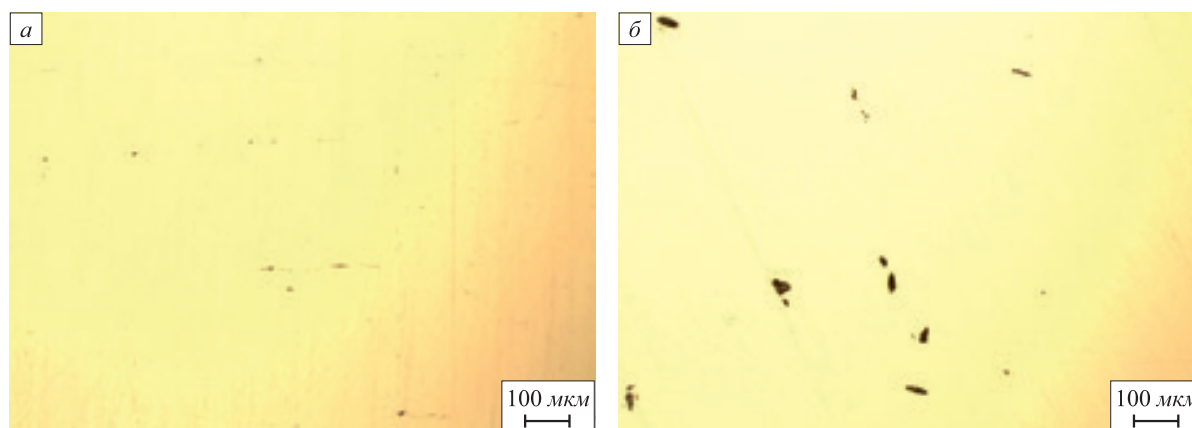


Рис. 3. Характерные неметаллические включения в рельсовых сталях:
а – сульфиды марганца (балл 3б); б – нитриды алюминия (балл 3б)

Fig. 3. Typical non-metallic inclusions in rail steels:
а – manganese sulfides (grade 3b); б – aluminum nitrides (grade 3b)

ГОСТ 1078 – 70 (рис. 3, б), несмотря на отказ от раскисления алюминием и концентрацию данного элемента в стали на уровне не более 0,004 %.

Следует отметить, что полученные зависимости, характеризующие влияние углерода, марганца, серы и фосфора на сопротивление деформации, согласуются с результатами ранее проведенных исследований для стали Э78ХСФ [29]. При этом влияние ванадия имеет противоположный характер (по данным указанных исследований увеличение концентрации ванадия снижает сопротивление деформации). Этот факт объясняется тем, что при проведении исследований сопротивления деформации стали Э78ХСФ не рассматривалось влияние на данный показатель содержания азота в стали. В таком случае, очевидно, в анализируемых образцах с более низким содержанием ванадия имела место повышенная концентрация азота (которая не учитывалась при проведении исследований), что и привело к искажению общей картины.

В связи с выявленным комплексным влиянием параметров деформации и химического состава рельсовых сталей на их сопротивление пластическому деформи-

рованию для практического применения полученных зависимостей целесообразным представляется подход, предложенный автором работы [30], согласно которому сопротивление деформации определяется не конкретным числом, а диапазоном значений при определенном сочетании термомеханических параметров деформации.

Для определения указанного интервала проведен вычислительный эксперимент с использованием полученных уравнений регрессии. Рассмотрены варианты наиболее «благоприятного» и «неблагоприятного» с точки зрения сопротивления пластическому деформированию химического состава. По полученным данным (рис. 4) при варьировании химического состава рельсовых сталей в рамках фактического интервала изменения содержания элементов интервал изменения сопротивления деформации составляет до 19 % от абсолютных значений данного параметра, а при варьировании химического состава в рамках интервала, оговоренного ГОСТ Р 51685 – 2013, – до 30 %.

С целью проверки адекватности полученных зависимостей в условиях рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» проведен промышленный эксперимент по прокатке рельсов из непрерывно литых заготовок стали Э76ХФ химического состава, соответствующего условно «благоприятному» (с минимальной концентрацией углерода, марганца, ванадия, азота, серы и фосфора) и «неблагоприятному» (с максимальным содержанием указанных элементов) составу. При прокатке проводили осциллографирование параметров работы двигателей приводов обжимных клетей. Полученные результаты свидетельствуют (рис. 5), что моменты на валу двига-

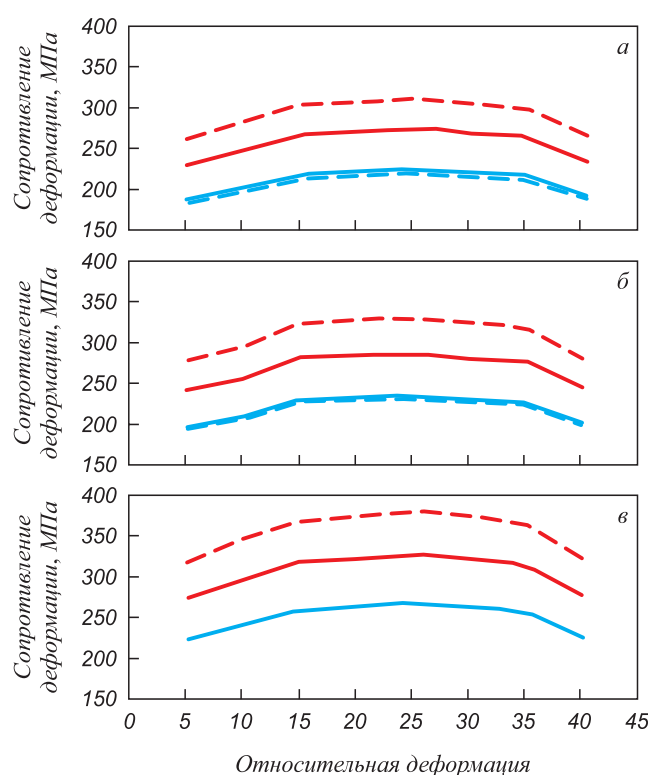


Рис. 4. Интервал сопротивления пластической деформации при варьировании химического состава рельсовых сталей марок 76ХФ (а), Э76ХСФ (б), 90ХАФ (г):

--- требования ГОСТ Р 51685 – 213;

— фактические значения

Fig. 4. Interval of resistance to plastic deformation when varying chemical composition of rail steels of 76KhF (a), E76KhSF (b), 90KhAF (g) grades:

--- requirements of the state standard GOST R 51685 – 213;

— actual values

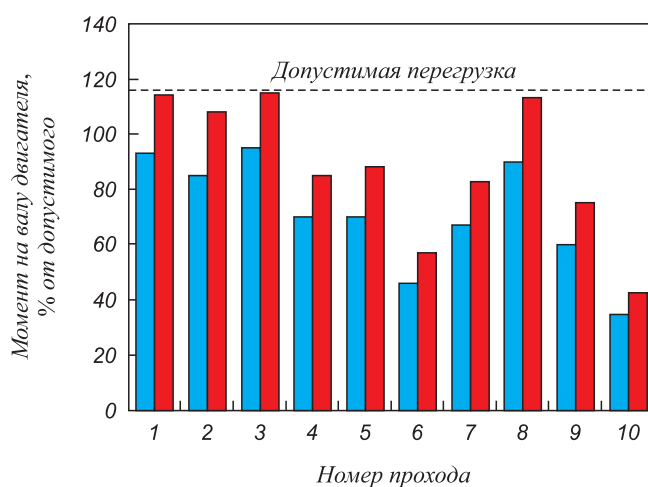


Рис. 5. Нагрузка на двигатели привода обжимных клетей рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» при прокатке заготовок различного химического состава:

■ – благоприятный режим; ■ – неблагоприятный режим

Fig. 5. Load on drive motors of crimping stands of the rail and beam mill of JSC “EVRAZ ZSMK” when rolling billets of various chemical composition:

■ – favorable mode; ■ – unfavorable mode

телей при прокатке рельсов из заготовок «неблагоприятного» химического состава на 21 – 27 % превышают нагрузку на двигатели относительно прокатки заготовок условно «благоприятного» химического состава. При этом для «неблагоприятного» режима перегруз двигателя в ряде проходов близок к предельно допустимому (115 % от номинального значения). Таким образом, можно сделать вывод об адекватности полученных зависимостей и необходимости учета данного интервала при проектировании новых режимов прокатки.

Выводы

По результатам экспериментальных исследований определены закономерности влияния термомеханических параметров деформации и химического состава рельсовых сталей марок 76ХФ, 76ХСФ и 90ХАФ на сопротивление пластической деформации. Установлено, что повышение скорости и снижение температуры деформации при одной и той же относительной деформации обуславливает увеличение сопротивления пластическому деформированию. При этом влияние относительной деформации на сопротивление пластической деформации имеет нелинейный характер: до степени деформации порядка 0,25 наблюдается увеличение данного показателя, а при дальнейшем росте степени деформации сопротивление деформации незначительно снижается.

Определено, что повышение содержания углерода, марганца, ванадия, азота, серы и фосфора в фактическом интервале изменения их концентраций для непрерывно литых заготовок рассматриваемых сталей текущего производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» приводит к увеличению сопротивления рельсовых сталей пластическому деформированию.

На основании полученных данных, обобщенных в виде уравнений множественной регрессии, определен интервал изменения сопротивления деформации при варьировании химического состава в рамках фактического интервала изменения содержания элементов и в рамках интервала, оговоренного ГОСТ, который составил до 19 и до 30 % соответственно. Адекватность полученных зависимостей подтверждена результатами опытной прокатки в условиях рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Polevoi E.V., Yunin G.N., Golovatenko A.V., Temlyantsev M.V. New rail products at AO EVRAZ ZSMK // *Steel in Translation*. 2019. Vol. 49. No. 7. P. 484 – 488.
2. Полевой Е.В., Юнин Г.Н., Темлянцева М.В. Разработка и промышленное освоение технологии дифференцированной термической обработки железнодорожных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 10. С. 704 – 714
3. Smirnov L.A., Rovnushkin V.A., Dobuzhskaya A.B., Yunin G.N., Polevoi E.V., Boikov D.V., Spirin, S.A. Influence of rare-earth modification on the formation of nonmetallic inclusions in high-carbon steel // *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. No. 11. P. 805 – 813.
4. Li W.-G., Feng N., Zhao Y.-T., Yan B.-K. Prediction of deformation resistance during hot rolling process based on generalized additive model // *Journal of Iron and Steel Research*. 2018. Vol. 30. No. 6. P. 447 – 452.
5. Liu C., Li W.-G., Wang B., Zhang L.-L. Prediction of deformation resistance for hot rolled strip based on ANFIS. – In: *Proceedings of the 12th IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2017*. 2018. P. 1701 – 1705.
6. Shkatov V.V., Mazur I.P., Chetverikova T.S., Knapinski M. Simulation of dynamic recrystallization and resistance to deformation of carbon and low-alloyed steels during hot forming // *Chernye Metally*. 2018. No. 11. P. 22 – 27.
7. Ghadar S., Momeni A., Tolaminejad B., Soltanalianzhad M. A comparative study on the hot deformation behavior of 410 stainless and K100 tool steels // *Materials Science and Engineering A*. 2019. Vol. 760. P. 394 – 406.
8. Kononov A.V., Smirnov A.S., Parshin V.S., Dronov A.I., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Fedulov A.A., Serebryakov A.V. Study of the resistance of steels 18KhMFB and 18Kh3MFB to hot deformation // *Metallurgist*. 2016. Vol. 59. No. 11-12. P. 1118 – 1121.
9. Kononov A.V., Smirnov A.S. Viscoplastic model for the strain resistance of 08KH18N10T steel at a hot-deformation temperature // *Russian metallurgy (Metally)*. 2008. Vol. 2008. No. 2. P. 138 – 141.
10. Safronov A.A., Belskiy S.M., Cherny V.A., Mazur I.P. Modeling of temperature influence on resistance to plastic deformation of electrotechnical steels in hot rolling // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1134. No. 1. Article 012050.
11. Rodriguez-Ibabe J.M., Gutiérrez I., López B., Iza-Mendia A. Modeling of the resistance to hot deformation and the effects of microalloying in high-al steels under industrial conditions // *Materials Science Forum*. 2005. Vol. 500-501. P. 195 – 202.
12. Kumar S., Aashranth B., Samantaray D., Davinci M., Borah U., Bhaduri A.K. Investigation on grain boundary character distribution during dynamic recrystallization of austenitic stainless steel during hot deformation // *Materials Performance and Characterization*. 2019. Vol. 8. No. 5. P. 796 – 807.
13. Hermant A., Suzon E., Petit P., Bellus J., Georges E., Cortial F., Sennour M., Gourgues-Lorenzon A.-F. Hot deformation and recrystallization mechanisms in a coarse-grained, niobium stabilized austenitic stainless steel (316Nb) // *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2019. Vol. 50. No. 4. P. 1625 – 1642.
14. Kingkam W., Zhao C.-Z., Li H., Zhang H.-X., Li Z.-M. Hot deformation and corrosion resistance of high-strength low-alloy steel // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2019. Vol. 32. No. 4. P. 495 – 505.
15. Карпов С.В., Банщиков А.А., Карпова А.С. Сопротивление деформации марганцовистых сталей // *Ползуновский альманах*. 2008. № 3. С. 123 – 126.
16. Гладковский С.В., Потапов А.И., Лепихин С.В. Исследование сопротивления деформации мартенситно-старееющей стали ЭП679 // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2015. No. 4. P. 18 – 28.
17. Потапов А.И., Батуева Е.А. Сопротивление деформации кремнемарганцовистых сталей для арматуры // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2013. № 10. С. 38 – 40.
18. Логинов Ю.Н., Батуева Е.А., Потапов А.И. Исследование сопротивления деформации кремнемарганцовистой стали. – В кн.: *Инновации в материаловедении и металлургии: материалы II междунар. интерактив. науч.-практ. конф.* – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. С. 187 – 190.
19. Зюзин В.И., Бровман М.Я., Мельников А.Ф. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке. – М.: Металлургия, 1964. – 270 с.
20. Андреев В.Л., Тюленев Г.Г., Прицкер Б.С. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава // *Сталь*. 1972. № 6. С. 522 – 523.

21. Мигачев Б.А. Сопротивление деформации в механике обработки давлением. – Екатеринбург: УрО РАН, 1997. – 176 с.
22. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением / Ю.Г. Калпин, В.И. Перфилов, П.А. Петров, В.А. Рябов, Ю.К. Филиппов. – М.: Машиностроение, 2011. – 244 с.
23. Остапенко А.Л., Переходченко В.А., Кушнир О.Н., Платун Д.А. О применимости методик расчета сопротивления деформации для оценки энергосиловых условий горячей прокатки полос // *Сталь*. 2014. № 5. С. 41 – 51.
24. Остапенко А.Л., Руденко Е.А., Курдюкова Л.А. Оценка влияния методики определения сопротивления деформации на погрешность расчета силы горячей прокатки полос и листов // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2013. № 6. С. 38 – 44.
25. Уманский А.А., Головатенко А.В., Симачев А.С., Дорофеев В.В., Осолкова Т.Н. Исследования пластичности и сопротивления деформации легированных рельсовых сталей в температурном интервале прокатки // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 6. С. 452 – 460.
26. Уманский А.А., Головатенко А.В., Кадыков В.Н. Разработка теоретических основ определения энергосиловых параметров прокатки при освоении новых марок рельсовых сталей // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 10. С. 804 – 810.
27. Уманский А.А., Головатенко А.В., Симачев А.С. Исследования неметаллических включений в рельсах из электросталей, легированных хромом // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 12. С. 936 – 942.
28. Гарост А.И. Неметаллические включения и формирование структуры модифицированной высокомарганцевистой стали // *Литье и металлургия*. 2006. № 1. С. 75 – 83.
29. Umansky A.A., Golovatenko A.V., Kadykov V.N., Dumova L.V. Development of mathematical models and methods for calculation of rail steel deformation resistance of various chemical composition // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 150. Article 012029.
30. Бровман М.Я. Определение сопротивления деформации при прокатке // *Сталь*. 2015. № 6. С. 40 – 44.

Поступила в редакцию 12 февраля 2020 г.

После доработки 4 марта 2020 г.

Принята к публикации 4 марта 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 5, pp. 318–326.

THEORETICAL FOUNDATIONS FOR ENERGY-EFFICIENT PRODUCTION OF RAILWAY RAILS WITH IMPROVED PERFORMANCE PROPERTIES

A.A. Umanskii¹, V.V. Dorofeev², L.V. Dumova¹

REFERENCES

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

² JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant”, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. Dependence of plastic deformation resistance of chromium-alloyed rail steels on the thermomechanical parameters of deformation (degree, speed, and temperature of deformation) and chemical composition of the steels under consideration was obtained by hot mechanical tests for torsion and compression. According to the obtained data, an increase in rate and a decrease in deformation temperature cause an increase in resistance to plastic deformation. Effect of relative deformation on resistance to plastic deformation is nonlinear with an expressed maximum at deformation degree of the order of 0.25. Analysis of influence of chemical composition of 76KhF, 76KhSF and 90KhAF rail steels and their resistance to plastic deformation was carried out using methods of multiple regression analysis. It has shown that increasing of content of carbon, manganese, vanadium, nitrogen, sulfur and phosphorus in the actual range of changes in their concentration leads to an increase in their plastic deformation resistance. Mechanism of this effect was revealed. Approximation of the obtained data allowed us to determine interval of changes in deformation resistance when chemical composition varies within the actual range of changes in elements content. Value of specified interval was up to 19 % of the absolute value of deformation resistance. When varying content of chemical elements in the interval specified in state standard for production of railway rails, value of deformation resistance interval was up to 30 %. Checking adequacy of the obtained dependences was performed by oscillographing the stands drives engines of rail mill of JSC “EVRAZ ZSMK” when rolling billets of different chemical composition. This checking made it possible to confirm the revealed patterns.

Keywords: railway rails, rail steels, energy-power parameters of rolling, chemical composition, thermomechanical parameters of deformation, resistance to plastic deformation.

1. Polevoi E.V., Yunin G.N., Golovatenko A.V., Temlyantsev M.V. New rail products at AO EVRAZ ZSMK. *Steel in Translation*. 2019, vol. 49, no. 7, pp. 484–488.
2. Polevoi E.V., Yunin G.N., Temlyantsev M.V. Development and commercial introduction of technology for differentiated heat treatment of railway rails with rolling heat utilization. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, pp. 704–714. (In Russ.).
3. Smirnov L.A., Rovnushkin V.A., Dobuzhskaya A.B., Yunin G.N., Polevoi E.V., Boikov D.V., Spirin, S.A. Influence of rare-earth modification on the formation of nonmetallic inclusions in high-carbon steel. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 11, pp. 805–813.
4. Li W.-G., Feng N., Zhao Y.-T., Yan B.-K. Prediction of deformation resistance during hot rolling process based on generalized additive model. *Journal of Iron and Steel Research*. 2018, vol. 30, no. 6, pp. 447–452.
5. Liu C., Li W.-G., Wang B., Zhang L.-L. Prediction of deformation resistance for hot rolled strip based on ANFIS. In: *Proceedings of the 12th IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2017*. 2018, pp. 1701–1705.
6. Shkatov V.V., Mazur I.P., Chetverikova T.S., Knapinski M. Simulation of dynamic recrystallization and resistance to deformation of carbon and low-alloyed steels during hot forming. *Chernye Metally*. 2018, no. 11, pp. 22–27. (In Russ.).
7. Ghadar S., Momeni A., Tolaminejad B., Soltanalinzhad M.A. Comparative study on the hot deformation behavior of 410 stainless and K100 tool steels. *Materials Science and Engineering A*. 2019, vol. 760, pp. 394–406.
8. Konovalov A.V., Smirnov A.S., Parshin V.S., Dronov A.I., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Fedulov A.A., Serebryakov A.V. Study of the resistance of steels 18KhMFB and 18Kh3MFB to hot deformation. *Metallurgist*. 2016, vol. 59, no. 11–12, pp. 1118–1121.
9. Konovalov A.V., Smirnov A.S. Viscoplastic model for the strain resistance of 08KH18N10T steel at a hot-deformation temperature. *Russian metallurgy (Metally)*. 2008, vol. 2008, no. 2, pp. 138–141.
10. Safronov A.A., Belskiy S.M., Chernyj V.A., Mazur I.P. Modeling of temperature influence on resistance to plastic deformation of electrotechnical steels in hot rolling. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2018, vol. 1134, no. 1, article 012050.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-318-326

11. Rodriguez-Ibabe J.M., Gutiérrez I., López B., Iza-Mendia A. Modeling of the resistance to hot deformation and the effects of microalloying in high-al steels under industrial conditions. *Materials Science Forum*. 2005, vol. 500-501, pp. 195–202.
 12. Kumar S., Aashranth B., Samantaray D., Davinci M., Borah U., Bhaduri A.K. Investigation on grain boundary character distribution during dynamic recrystallization of austenitic stainless steel during hot deformation. *Materials Performance and Characterization*. 2019, vol. 8, no. 5, pp. 796–807.
 13. Hermant A., Suzon E., Petit P., Bellus J., Georges E., Cortial F., Sennour M., Gourgues-Lorenzon A.-F. Hot deformation and recrystallization mechanisms in a coarse-grained, niobium stabilized austenitic stainless steel (316Nb). *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2019, vol. 50, no. 4, pp. 1625–1642.
 14. Kingkam W., Zhao C.-Z., Li H., Zhang H.-X., Li Z.-M. Hot deformation and corrosion resistance of high-strength low-alloy steel. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2019, vol. 32, no. 4, pp. 495–505.
 15. Karpov S.V., Banshchikov A.A., Karpova A.S. Deformation resistance of manganese steels. *Polzunovskii al'manakh*. 2008, no. 3, pp. 123–126. (In Russ.).
 16. Gladkovskii S.V., Potapov A.I., Lepikhin S.V. Studying the deformation resistance of EP679 maraging steel. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2015, no. 4, pp. 18–28. (In Russ.).
 17. Potapov A.I., Batueva E.A. Deformation resistance of silicon-manganese steels for reinforcement. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2013, no. 10, pp. 38–40. (In Russ.).
 18. Loginov Yu.N., Batueva E.A., Potapov A.I. Deformation resistance of silicon-manganese steel. In: *Innovatsii v materialovedenii i metallurgii: Materialy II mezhdunar. interaktiv. nauch.-prakt. konf.* [Innovations in Materials Science and Metallurgy: Materials of the II Int. Interactive Sci.-Pract. Conf.]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2012, pp. 187–190. (In Russ.).
 19. Zyuzin V.I., Brovman M.Ya., Mel'nikov A.F. *Soprotivlenie deformatsii stalei pri goryachei prokatke* [Deformation resistance of steels during hot rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1964, 270 p. (In Russ.).
 20. Andreyuk V.L., Tyulenev G.G., Pritsker B.S. Analytical dependence of deformation resistance of steels and alloys on their chemical composition. *Stal'*. 1972, no. 6, pp. 522–523. (In Russ.).
 21. Migachev B.A. *Soprotivlenie deformatsii v mekhanike obrabotke davleniem* [Deformation resistance at forming mechanics]. Ekaterinburg: UrO RAN, 1997, 176 p. (In Russ.).
 22. Kalpin Yu.G., Perfilov V.I., Petrov P.A., Ryabov V.A., Filipov Yu.K. *Soprotivlenie deformatsii i plastichnost' metallov pri obrabotke davleniem* [Metals resistance to deformation and plasticity at forming]. Moscow: Mashinostroenie, 2011, 244 p. (In Russ.).
 23. Ostapenko A.L., Perehodchenko V.A., Kushnir O.N., Plastun D.A. On applicability of deformation resistance calculation methods for evaluating energy-force conditions of hot strip rolling. *Stal'*. 2014, no. 5, pp. 41–51. (In Russ.).
 24. Ostapenko A.L., Rudenko E.A., Kurdyukova L.A. Influence of methodology for deformation resistance determining on error of calculation of strength of strips and sheets hot rolling. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2013, no. 6, pp. 38–44. (In Russ.).
 25. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Simachev A.S., Dorofeev V.V., Oskolkova T.N. Plasticity and deformation resistance of the alloyed rail steels in rolling temperature interval. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 6, pp. 452–460. (In Russ.).
 26. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Kadykov V.N. Development of theoretical basis of determining energy-power parameters of rolling at implementation of new grades of rail steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 10, pp. 804–810. (In Russ.).
 27. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Simachev A.S. Nonmetallic inclusions in rails made of electro-steel alloyed with chromium. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 12, pp. 936–942. (In Russ.).
 28. Garost A.I. Non-metallic inclusions and structure formation of modified high-manganese steel. *Lit'e i metallurgiya*. 2006, no. 1, pp. 75–83. (In Russ.).
 29. Umansky A.A., Golovatenko A.V., Kadykov V.N., Dumova L.V. Development of mathematical models and methods for calculation of rail steel deformation resistance of various chemical composition. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, article 012029.
 30. Brovman M.Ya. Determination of deformation resistance during rolling. *Stal'*. 2015, no. 6, pp. 40–44. (In Russ.).
- Funding.** The study was financially supported by the RFBR and the Kemerovo Region in the framework of scientific project No. 20-48-420011 using the equipment of the Center of Collective Use “Material Science”.
- Information about the authors:**
- A.A. Umanskii**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy (umanskii@bk.ru)
- V.V. Dorofeev**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Calibrator of Rail and Beam Shop (vladimir.dorofeev@evraz.com)
- L.V. Dumova**, Senior Lecturer of the Chair “Management and Branch Economy” (dumova@bk.ru)

Received February 12, 2020

Revised March 4, 2020

Accepted March 4, 2020

УДК 621.74

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВА И МАТЕРИАЛА ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ НА СКОРОСТЬ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВОК*

Приходько О.Г.¹, к.т.н., доцент кафедры менеджмента качества
и инноваций (prihodko_og@rambler.ru)

Деев В.Б.², д.т.н., ведущий эксперт кафедры обработки металлов
давлением (deev.vb@mail.ru)

Прусов Е.С.³, к.т.н., доцент кафедры технологии функциональных и конструкционных
материалов (eprusov@mail.ru)

Куценко А.И.¹, к.т.н., доцент кафедры менеджмента качества
и инноваций (aik_mail@mail.ru)

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

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр-т, 4)

³ Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых
(600000, Россия, Владимир, ул. Горького, 87)

Аннотация. Получение отливок заданного качества является основной задачей литейного производства. Одним из этапов технологии литья является затвердевание расплава в форме. При изучении процесса затвердевания отливок необходимо максимально полно учитывать все особенности теплообмена между отливкой и формой. Рассмотрено влияние различных теплофизических параметров сплава и материала литейной формы на формирование отливки. При анализе использованы оригинальные математические модели для расчета коэффициента и времени полного затвердевания отливок в песчано-глинистой и металлической формах, которые учитывают геометрические параметры отливки, основные теплофизические параметры металла отливки и материала формы, условия теплообмена на фронте кристаллизации, на границе отливка – форма и на поверхности формы. Проведен анализ зависимости времени и скорости затвердевания отливок от теплофизических параметров: теплоемкости, плотности, теплопроводности материала отливки и формы, удельной теплоты кристаллизации металла. Аккумулирующая способность и процесс аккумуляции тепла достаточно полно характеризуются значением коэффициента аккумуляции тепла. Коэффициент теплоаккумуляции практически определяет интенсивность потери тепла отливкой, что играет решающую роль в процессе формирования ее свойств. Поэтому этот параметр выбран для комплексного анализа характера тепловых процессов, протекающих в отливке и форме. Рассмотрено влияние толщины и коэффициента теплопроводности слоя кокильной краски на затвердевание отливок в металлических формах. Представлены основные расчетные формулы и исходные данные, используемые для расчета. Вычисления проведены для отливок типа бесконечная плита, бесконечный цилиндр, шар. Результаты проведенного моделирования параметров процесса затвердевания приведены в графическом виде. На примере различных сплавов расчетным путем показано, что при изменении состава и свойств материала формы можно изменять время и скорость затвердевания сплавов в широком диапазоне. При этом происходит управление процессами формирования структуры и свойств отливок.

Ключевые слова: отливка, время затвердевания, коэффициент затвердевания, условия теплообмена, коэффициент теплоаккумуляции, песчано-глинистая форма.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-327-334

ВВЕДЕНИЕ

Процессы затвердевания играют ключевую роль в формировании литой структуры и механических свойств изделий [1]. При этом важной технологической характеристикой является скорость затвердевания отливок и слитков. Очевидно, что скорость затвердевания напрямую определяет дисперсность дендритной структуры литых заготовок, а также существенно влияет на распре-

деление и морфологические характеристики различных фазовых составляющих [2 – 5]. Известно, что увеличение скорости затвердевания (или сокращение времени полного затвердевания) уменьшает расстояние между осями вторичных дендритов и количество вторичных фаз между ними [6 – 8]. Варьирование скорости затвердевания также позволяет управлять степенью дендритной сегрегации растворенных легирующих элементов [9].

Для понимания особенностей затвердевания отливок и слитков в различных условиях большое значение имеют исследования тепловых процессов [10]. Обще-

* Исследования проводили в рамках Российского научного фонда (проект № 19-79-30025).

принято, что для учета значимых факторов математическое моделирование затвердевания отливок должно предусматривать моделирование макропроцессов теплопередачи при затвердевании [11 – 13] и моделирование микропроцессов – кинетики затвердевания [14, 15]. Подобный подход позволяет с достаточной точностью прогнозировать усадочные процессы, в том числе формирование различных литейных дефектов, а также особенности макро- и микроструктуры получаемых отливок и, как следствие, уровень их механических свойств [16]. Однако во многих случаях для решения уравнений, лежащих в основе тех или иных математических моделей, требуются различные упрощающие допущения. В результате полученные решения, несмотря на их несомненную теоретическую значимость, зачастую не представляют существенной практической ценности.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ И КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВОК

В настоящей работе представлена расчетная оценка влияния теплоаккумулирующей способности материалов литейной формы и отливки на скорость затвердевания с использованием разработанной математической модели, учитывающей основные теплофизические параметры металла отливки и материала формы, условия теплообмена на фронте кристаллизации, на границе отливка – форма и на поверхности формы.

Время полного затвердевания отливок в песчано-глинистой форме можно определить по следующей формуле [17]:

$$\tau = A_1 \varepsilon + A_2 \varepsilon^2 + A_3 \varepsilon^3 + A_4 \varepsilon^4, \quad (1)$$

где τ – время полного затвердевания отливки в песчано-глинистой форме, с; ε – толщина затвердевшей корочки, м; A_1, A_2, A_3, A_4 – коэффициенты, определяемые по выражениям, приведенным ниже:

– для отливки типа «бесконечная плита»

$$\begin{aligned} A_1 &= Bb \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ с/м;} \\ A_2 &= \frac{Bb}{2} \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{1}{\lambda_\phi} \right), \text{ с/м}^2; A_3 = 0; A_4 = 0; \end{aligned} \quad (2)$$

– для отливки типа «бесконечный цилиндр»

$$\begin{aligned} A_1 &= Bb \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ с/м;} \\ A_2 &= \frac{Bb}{2} \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{1}{\lambda_\phi} \right) - \frac{Bb}{2R} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ с/м}^2; \\ A_3 &= \frac{Bb}{3R} \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{b}{\lambda_\phi} \right); A_4 = 0; \end{aligned} \quad (3)$$

– для отливки типа «шар»

$$\begin{aligned} A_1 &= Bb \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ с/м;} \\ A_2 &= \frac{Bb}{2} \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{1}{\lambda_\phi} \right) - \frac{Bb}{R} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ с/м}^2; \\ A_3 &= \frac{Bb}{3R} \left[\frac{1}{R} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - 2 \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{b}{\lambda_\phi} \right) \right]; \\ A_4 &= \frac{Bb}{4R^2} \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{b}{\lambda_\phi} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где B – коэффициент, Дж/(м³·К); b – безразмерный коэффициент, показывающий, во сколько раз для бесконечной плиты толщина δ_ϕ прогретого слоя формы больше толщины ε затвердевшей корочки металла; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи на фронте кристаллизации, на границе отливка – форма, Вт/(м²·К); λ_ϕ и λ_m – коэффициент теплопроводности формы и металла, Вт/(м·К); $R = V_0/F_0$ – приведенный размер отливки (введение приведенного размера отливки приводит задачу затвердевания отливки к одномерному варианту); V_0 и F_0 – объем и площадь поверхности отливки.

Безразмерный коэффициент можно определить по следующему уравнению:

$$b = \frac{L_{кр} \rho_m + c_m \rho_m (T_3 - \bar{T}_m)}{c_\phi \rho_\phi (\bar{T}_\phi - T_\phi^0)}, \quad (5)$$

где $L_{кр}$ – теплота кристаллизации металла, Дж/кг; ρ_m и ρ_ϕ – плотность сплава и формовочной смеси, кг/м³; c_m и c_ϕ – теплоемкость сплава и формовочной смеси, Дж/(кг·К); T_3 – температура заливки сплава, К; $\bar{T}_m$ и $\bar{T}_\phi$ – средние значения температур затвердевшей корочки и прогретого слоя формы, К; T_ϕ^0 – начальная температура формы, К.

Коэффициент B определяют по выражению

$$B = c_\phi \rho_\phi \frac{\bar{T}_\phi - T_\phi^0}{T_3 - T_\phi^0}. \quad (6)$$

Коэффициенты теплоаккумуляции формы и металла (b_ϕ, b_m , Вт·с^{0.5}/(м²·К)) определяются по формулам

$$b_\phi = \sqrt{c_\phi \rho_\phi \lambda_\phi}; \quad b_m = \sqrt{c_m \rho_m \lambda_m}. \quad (7)$$

Преобразуя уравнение (1), можно получить выражение для определения толщины затвердевшей корочки при кристаллизации отливок:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{A_1}{\varepsilon} + A_2 + A_3 \varepsilon + A_4 \varepsilon^2 \right)^{-1}} \sqrt{\tau}. \quad (8)$$

Формула (8) эквивалентна закону квадратного корня уравнения (1). Из этого следует, что значение константы затвердевания можно определить по выражению

$$K = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{A_1}{\varepsilon} + A_2 + A_3\varepsilon + A_4\varepsilon^2\right)}}. \quad (9)$$

Дифференциальное уравнение для определения времени полного затвердевания отливок в металлических формах имеет вид [18]:

$$d\tau = \frac{b'c_{\phi}\rho_{\phi}(\bar{T}_K^{\tau} - T_{\phi}^o)}{K_T(T_3 - T_{окр}) - \alpha_3 \frac{F_{пов}}{F_o}(T_{пов} - T_{окр})} \frac{F_{кр}}{F_o} d\varepsilon; \quad (10)$$

– для отливки типа «бесконечная плита»

$$d\tau = \frac{b'c_{\phi}\rho_{\phi}(\bar{T}_K^{\tau} - T_{\phi}^o)}{K_T(T_3 - T_{окр}) - \alpha_3 \frac{F_{пов}}{F_o}(T_{пов} - T_{окр})} d\varepsilon; \quad (11)$$

– для отливки типа «бесконечный цилиндр»

$$d\tau = \frac{b'c_{\phi}\rho_{\phi}(\bar{T}_K^{\tau} - T_{\phi}^o)}{K_T(T_3 - T_{окр}) - \alpha_3 \left(1 + \frac{x_{\phi}}{R}\right)(T_{пов} - T_{окр})} \times \left(1 - \frac{\varepsilon}{R}\right) d\varepsilon; \quad (12)$$

– для отливки типа «шар»

$$d\tau = \frac{b'c_{\phi}\rho_{\phi}(\bar{T}_K^{\tau} - T_{\phi}^o)}{K_T(T_3 - T_{окр}) - \alpha_3 \left(1 + \frac{x_{\phi}}{R}\right)(T_{пов} - T_{окр})} \times \left(1 - \frac{\varepsilon}{R}\right)^2 d\varepsilon, \quad (13)$$

где $\bar{T}_K^{\tau}$ – средняя калориметрическая температура системы отливка – кокиль, К; $T_{пов}$ и $T_{окр}$ – температуры наружной поверхности кокиля и окружающей среды, К; α_3 – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности кокиля в окружающую среду, Вт/(м²·К); x_{ϕ} – толщина стенки кокиля, м; K_T – коэффициент теплопередачи для плоской многослойной стенки, Вт/(м²·К); $L_{кр}$ – теплота кристаллизации сплава, кДж/кг; b' – коэффициент, определяемый по формуле

$$b' = \frac{L_{кр}\rho_m + c_m\rho_m(T_3 - \bar{T}_K^{\tau})}{c_{\phi}\rho_{\phi}(\bar{T}_K^{\tau} - T_{\phi}^o)}. \quad (14)$$

Увеличение теплоемкости и плотности металла приводит к увеличению времени полного затвердевания отливки и снижению коэффициента затвердевания. Увеличение плотности, теплоемкости и теплопроводности формовочной смеси приводит к уменьшению времени полного затвердевания и повышению коэффициента затвердевания отливки, что соответствует данным работы [19]. Изменение коэффициента теплопроводности металла приводит к незначительному изменению времени затвердевания, так как при литье в песчаную форму определяющую роль играет коэффициент теплопроводности формовочной смеси.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ЛИТОЙ ФОРМЫ И ОТЛИВКИ НА СКОРОСТЬ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ

На рис. 1 представлены зависимости времени полного затвердевания (кривая 1) и коэффициента затвердевания (кривая 2) для цилиндрической отливки из алюминиевого сплава с приведенным размером 7,5 мм от коэффициента теплоаккумуляции формы.

При проведении расчетов коэффициент b_{ϕ} теплоаккумуляции формы меняли в пределах от 900 Вт·с^{0,5}/(м²·К) (асбест многослойный [19]) до 14 000 Вт·с^{0,5}/(м²·К) (чугунный кокиль [20]). Характер кривой 1 (рис. 1) аналогичен экспериментальной кривой, полученной в работе [19]. При увеличении коэффициента тепловой аккумуляции формы от 900 до 1100 Вт·с^{0,5}/(м²·К) время полного затвердевания уменьшается примерно на 100 с, а скорость затвердевания увеличивается.

На рис. 2 представлены зависимости времени (кривая 1) и коэффициента затвердевания (кривая 2) для цилиндрической отливки с приведенным размером

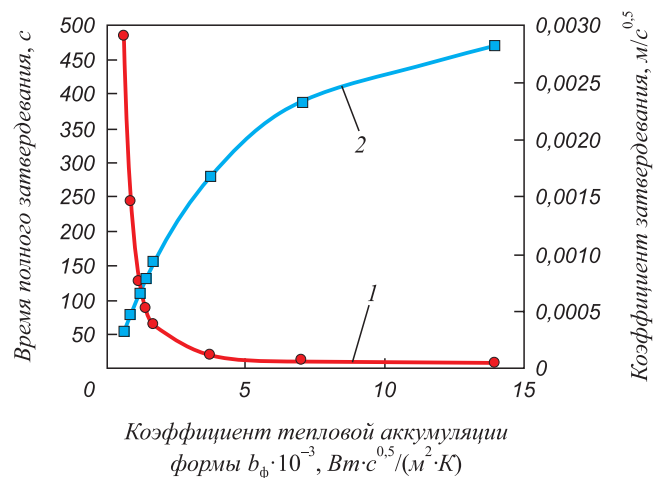


Рис. 1. Зависимость времени полного затвердевания (1) и коэффициента затвердевания (2) отливки из алюминиевого сплава от коэффициента тепловой аккумуляции формы

Fig. 1. Dependence of the time of complete solidification (1) and coefficient of solidification (2) of casting from an aluminum alloy on coefficient of thermal storage of the form

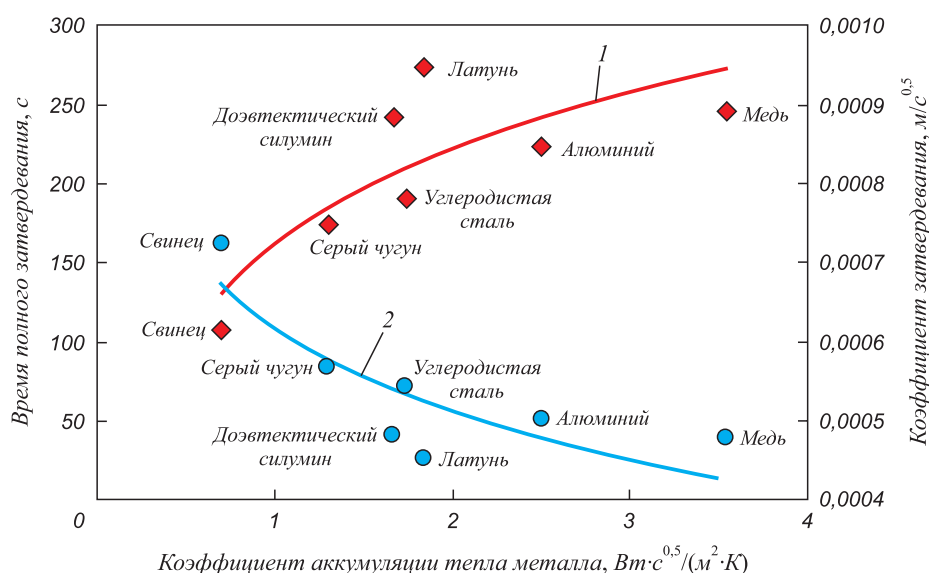


Рис. 2. Зависимость времени полного затвердевания (1) и коэффициента затвердевания (2) отливки от коэффициента тепловой аккумуляции металла

Fig. 2. Dependence of the time of complete solidification (1) and coefficient of solidification (2) of the casting on coefficient of thermal storage of the metal

7,5 мм, затвердевающей в песчано-глинистой форме при $b_{\phi} = 950 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$, от коэффициента b_m тепловой аккумуляции металла, рассчитанные по разработанной математической модели. Усредненные теплофизические характеристики сплавов, использованные для расчета, представлены в таблице.

Можно сделать вывод, что прямой зависимости между временем, коэффициентом затвердевания и коэффициентом аккумуляции тепла нет, но заметна тенденция к увеличению времени полного затвердевания и, следовательно, к уменьшению коэффициента затвердевания при увеличении коэффициента b_m аккумуляции тепла металлом.

Для определения степени влияния теплоты кристаллизации металла, выделяющейся при затвердевании отливок, на время и скорость процесса затвердевания была проведена серия расчетов по разработанной математической модели, при этом значения теплоты кри-

сталлизации варьировали в следующих пределах: для алюминия – от 370 до 410 кДж/кг; для доэвтектического силумина – от 170 до 370 кДж/кг; для меди – от 190 до 230 кДж/кг; для серого чугуна – от 180 до 220 кДж/кг; для углеродистой стали – от 220 до 280 кДж/кг (другие данные для расчета взяты из таблицы). Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Таким образом, время полного затвердевания растет при увеличении теплоты кристаллизации сплава. Например, при затвердевании отливки из доэвтектического силумина в песчано-глинистой форме (рис. 3, кривая 1 – доэвтектический силумин) время полного затвердевания при увеличении теплоты кристаллизации от 170 до 370 кДж/кг увеличивается в 2,7 раза.

На скорость затвердевания отливок в металлических формах большое влияние оказывает краска, наносимая на рабочую поверхность формы. Краска обладает большим термическим сопротивлением по сравнению

Теплофизические характеристики сплавов

Thermophysical characteristics of the alloys

Материал	ρ_m , кг/м ³	c_m , Дж/(кг·К)	λ_m , Вт/(м·К)	b_m , Вт·с ^{0,5} /(м ² ·К)	$L_{кр}$, кДж/кг	$T_{кр}$, К	Перегрев, К
Свинец	11 300	130	33,5	7015	26,5	600	100
Алюминий	2700	1090	213,0	25 037	390,0	933	100
Серый чугун	7200	560	42,0	13 013	215,0	1470	100
Довзвектический силумин	2500	1080	104,0	16 757	365,0	840	100
Медь	8920	440	320,0	35 439	214,0	1356	100
Углеродистая сталь	7500	750	54,0	17 428	259,0	1740	100
Латунь	8600	390	101,0	18 405	221,0	1305	100

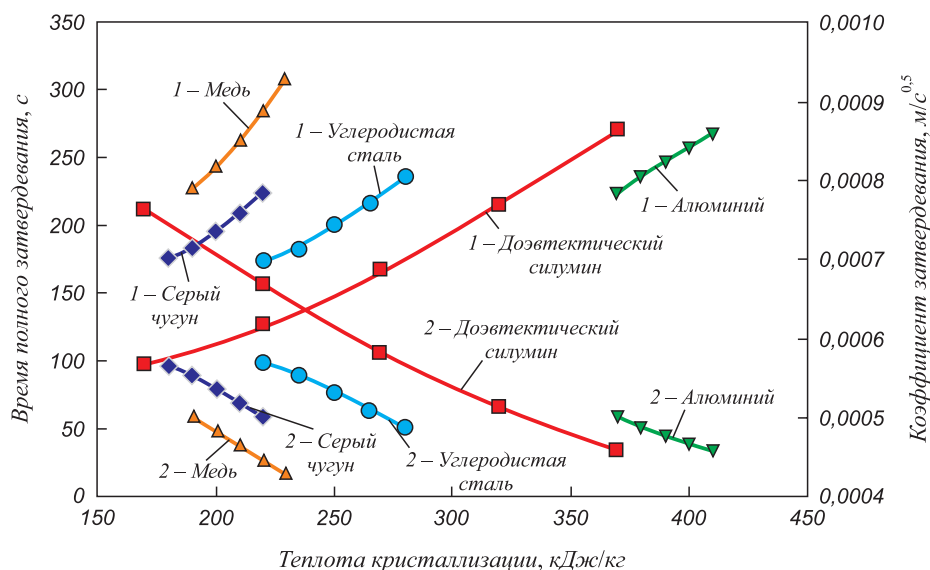


Рис. 3. Зависимость времени полного затвердевания (1) и коэффициента затвердевания отливки (2) в песчаной форме от удельной теплоты кристаллизации металла

Fig. 3. Dependence of the time of complete solidification (1) and coefficient of solidification of the casting (2) in sand mold on specific heat of metal crystallization

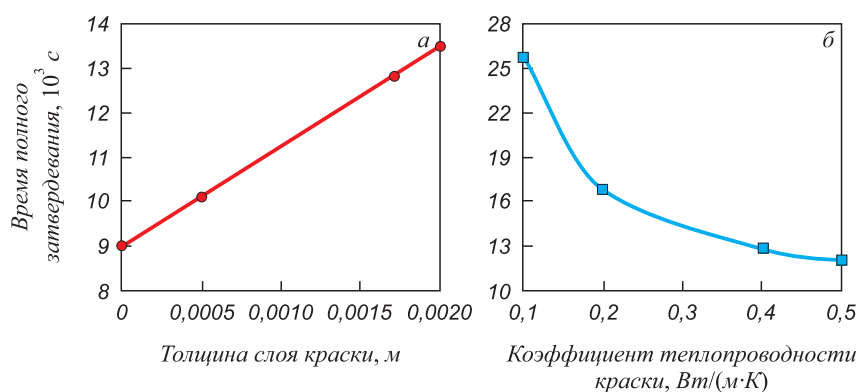


Рис. 4. Зависимость времени полного затвердевания цилиндрической чугунной отливки в чугунном кокиле от толщины слоя краски (а) и коэффициента теплопроводности краски (б)

Fig. 4. Dependence of the time of complete solidification of cylindrical cast iron casting in cast iron chill mold on thickness of the paint layer (a) and thermal conductivity of paint (b)

с металлом формы, поэтому изменение толщины и теплофизических характеристик слоя краски приводит к значительному изменению скорости затвердевания отливок в кокиле. На рис. 4, а представлено изменение времени полного затвердевания цилиндрической чугунной отливки диам. 1,16 м в чугунном кокиле в зависимости от толщины слоя краски. Изменение толщины слоя краски от 0 до 2 мм приводит к увеличению времени полного затвердевания в 1,5 раза.

На рис. 4, б представлено изменение времени полного затвердевания цилиндрической чугунной отливки диам. 1,16 м в чугунном кокиле от коэффициента теплопроводности краски. При увеличении коэффициента теплопроводности краски от 0,1 до 0,5 Вт/(м·К) время полного затвердевания уменьшается в два раза. Очевидно, что путем варьирования толщины и состава ко-

кильной краски можно влиять на время и скорость затвердевания отливки.

Разработанная математическая модель содержит теплофизические параметры материала формы и отливки, значения которых являются функциями температуры и их точные значения зачастую неизвестны или приводятся в справочниках в виде диапазона значений. Для оценки влияния теплоемкости, теплопроводности и плотности материалов отливки и формы, удельной теплоты кристаллизации на результат определения времени и коэффициента затвердевания по предлагаемой модели была проведена серия расчетов. Характер влияния теплофизических характеристик материала отливки и кокиля на течение процесса затвердевания отливки в металлической форме оказался таким же, как и для песчано-глинистой формы.

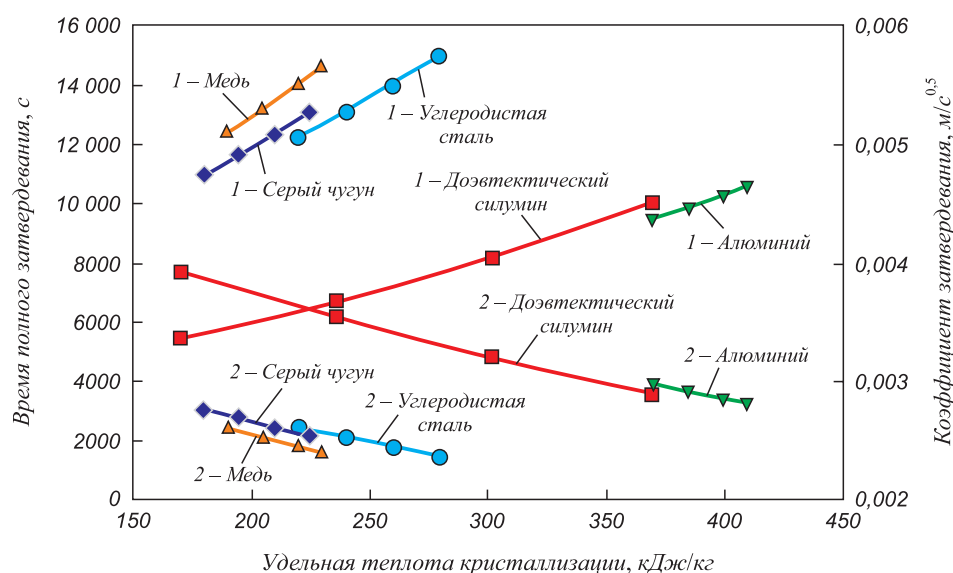


Рис. 5. Зависимость времени полного затвердевания (1) и коэффициента затвердевания (2) отливок в окрашенной металлической форме от удельной теплоты кристаллизации металла

Fig. 5. Dependence of the time of complete solidification (1) and coefficient of solidification (2) of castings in painted metal form on the specific heat of metal crystallization

Влияние теплоты кристаллизации металла, выделяющейся при затвердевании цилиндрических отливок, на время и скорость процесса представлено на рис. 5. Данные для расчета взяты из таблицы. Видно, что время полного затвердевания увеличивается при повышении удельной теплоты кристаллизации сплава, но по сравнению с неметаллической формой теплота кристаллизации оказывает меньшее влияние на скорость процесса затвердевания.

Например, для доэвтектического силумина увеличение теплоты кристаллизации от 170 до 370 кДж/кг приводит к увеличению времени полного затвердевания от 5500 до 10 000 с, то есть в 1,8 раза. Это связано с различием теплофизических характеристик материалов форм: металлическая форма быстрее отводит тепло кристаллизации, выделяющееся при нарастании твердой корочки, чем песчано-глинистая.

Выполненные вычисления показывают, что теплофизические характеристики материалов отливки и литейной формы (в частности, коэффициенты тепловой аккумуляции металла и формы, удельная теплота кристаллизации металла) являются важными факторами управления процессами формирования структуры получаемых литых заготовок и, как следствие, их физико-механических и эксплуатационных свойств. В частности, увеличение коэффициента тепловой аккумуляции формы во всех случаях приводит к уменьшению времени полного затвердевания отливки. Для всех рассмотренных типов сплавов и материалов литейной формы время полного затвердевания отливки растет при увеличении теплоты кристаллизации. При этом использование металлической формы при сохранении общих тенденций по изменению времени полного за-

твердевания снижает влияние теплоты кристаллизации на скорость затвердевания.

Выводы

На примере различных сплавов расчетным путем показано, что при изменении состава и свойств материала формы можно менять время и скорость затвердевания сплавов в широком диапазоне, управляя за счет этого процессами формирования структуры и свойств отливок. При этом использование формовочных смесей с низким коэффициентом тепловой аккумуляции приводит к увеличению времени полного затвердевания отливки и, соответственно, к снижению скорости затвердевания. И напротив, увеличение интенсивности теплоотвода за счет увеличения коэффициента тепловой аккумуляции формы приводит к росту скорости затвердевания отливки и формированию более мелкозернистой структуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Stefanescu D.M. Science and Engineering of Casting Solidification. 3rd ed. – Switzerland: Springer International Publishing, 2015. – 559 p.
2. Kostyryzh A.G., Slater C.D., Marench O.O., Davis C.L. Effect of solidification rate on microstructure evolution in dual phase microalloyed steel // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. Article 35715.
3. Cai Z., Zhang C., Wang R., Peng C., Qiu K., Wang N. Effect of solidification rate on the coarsening behavior of precipitate in rapidly solidified Al – Si alloy // Progress in Natural Science: Materials International. 2016. Vol. 26. No. 4. P. 391 – 397.
4. Xu C., Du R., Wang X., Hanada S., Yamagata H., Wang W., Ma C. Effect of cooling rate on morphology of primary particles in Al – Sc – Zr master alloy // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2014. Vol. 24. No. 7. P. 2420 – 2426.

5. Deev V.B., Prusov E.S., Shunqi M., Ri E.H., Bazlova T.A., Temlyantsev M.V., Smetanyuk S.V., Ponomareva S.V., Vdovin K.N. The influence of the melt cooling rate on shrinkage behaviour during solidification of aluminum alloys // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 537. No. 2. Article 022080.
6. Jabbari M., Davami P., Varahram N. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of gray cast iron // Materials Science and Engineering: A. 2010. Vol. 528. No. 2. P. 583 – 588.
7. Brionne G., Loucif A., Zhang C.P., Lapierre-Boire LP., Jahazi M. 3D FEM simulation of the effect of cooling rate on SDAS and macrosegregation of a high strength steel // Materials Science Forum. 2018. No. 941. P. 2360 – 2364.
8. Ali M., Porter D., Kömi J., Eissa M., El Faramawy H., Mattar T. Effect of cooling rate and composition on microstructure and mechanical properties of ultrahigh-strength steels // Journal of Iron and Steel Research International. 2019. No. 26. P. 1350 – 1365.
9. Jia L., Yu L., Sun W., Zhang W., Fang L., Feng Q., Guo S., Hu Z. Effect of solidification rates on microstructures and segregation of IN718 alloy // Chinese Journal of Materials Research. 2010. Vol. 24. No. 2. P. 118 – 122.
10. Dantzig J.A., Rappaz M. Solidification. Taylor & Francis Group, CRS Press, 2009. – 621 p.
11. Ciesielski M., Mochnecki B. Comparison of approaches to the numerical modelling of pure metals solidification using the control volume method // International Journal of Cast Metals Research. 2019. Vol. 32. No. 4. P. 213 – 220.
12. Shahane S., Aluru N., Ferreira P., Kapoor S.G., Vanka S.P. Finite volume simulation framework for die casting with uncertainty quantification // Applied Mathematical Modelling. 2019. Vol. 74. P. 132 – 150.
13. Hirata N., Anzai K. Heat transfer and solidification analysis using adaptive resolution particle method // Materials Transactions. 2019. Vol. 60. No. 1. P. 33 – 40.
14. Wang H., Liu F., Yang G., Zhou Y. Modeling the overall solidification kinetics for undercooled single-phase solid-solution alloys. I. Model derivation // Acta Materialia. 2010. Vol. 58. No. 16. P. 5402 – 5410.
15. Zhu M., Zhang L., Zhao H., Stefanescu D.M. Modeling of microstructural evolution during divorced eutectic solidification of spheroidal graphite irons // Acta Materialia. 2015. Vol. 84. P. 413 – 425.
16. Wang T., Wei J., Wang X., Yao M. Progress and Application of Microstructure simulation of alloy solidification // Acta Metallurgica Sinica. 2018. Vol. 54. No. 2. P. 193 – 203.
17. Разработка методики расчета времени и коэффициента затвердевания отливок в песчано-глинистых формах / В.Б. Деев, О.Г. Приходько, Е.С. Прусов, Е.В. Протопопов, М.В. Темлянец, А.И. Купченко, М. Шунки, Э.Х. Ри, С.В. Сметанюк, К.В. Пономарева, Г.Н. Гаврилов. – В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество. Металлургия – 2019: Труды XXI Международной научно-практической конференции*, 23-24 октября 2019 г. Ч. 1. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. С. 139 – 146.
18. Разработка методики расчета времени затвердевания отливок и слитков в металлической форме / В.Б. Деев, О.Г. Приходько, Е.С. Прусов, Е.В. Протопопов, М.В. Темлянец, А.И. Купченко, М. Шунки, Э.Х. Ри, Т.А. Базлова, С.В. Сметанюк, А.А. Соколов. – В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество. Металлургия – 2019: Труды XXI Международной научно-практической конференции*, 23-24 октября 2019 г. Ч. 1. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. С. 146 – 151.
19. Вейник А.И. Теория затвердевания отливки. – М.: Машгиз, 1960. – 436 с.
20. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. Ч. 1. Тепловые основы теории литья. Затвердевание и охлаждение отливки. – М.: Машиностроение, 1976. – 328 с.

Поступила в редакцию 13 февраля 2020 г.

После доработки 17 марта 2020 г.

Принята к публикации 18 марта 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 5, pp. 327–334.

INFLUENCE OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF ALLOY AND MOLD MATERIAL ON CASTINGS SOLIDIFICATION RATE

O.G. Prihod'ko¹, V.B. Deev², E.S. Prusov³, A.I. Kutsenko¹

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

² National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS), Moscow, Russia

³ Vladimir State University named after Alexandr Grigor'evich and Nikolai Grigor'evich Stoletov, Vladimir, Russia

Abstract. Obtaining castings of given quality is the main task of foundry production. One of the stages of casting technology is solidification of melt in the mold. When studying the process of castings solidification, it is necessary to fully take into account all the features of heat transfer between casting and mold. Influence of various thermophysical parameters of alloy and mold material on casting formation is considered. In the analysis, original mathematical models were used to calculate the coefficient and time of complete solidification of castings in sand-clay and metal forms. These models take into account geometric parameters of casting, main thermophysical parameters of casting metal and mold material, heat transfer conditions at crystallization front, on casting-mold boundary and on the mold surface. Analysis of dependence of time and rate of castings solidification on thermophysical parameters (heat capacity, density, heat conductivity of casting material and mold, specific heat of metal crystallization) was carried out. Storage capacity and process of heat storage are quite fully characterized by the value of heat storage coefficient. This coefficient

practically determines the rate of heat loss by the casting which plays a decisive role in its properties forming. Therefore, this parameter is selected for a comprehensive analysis of thermal processes occurring in casting and mold. The influence of thickness and thermal conductivity of chill paint layer on solidification of castings in metal molds is considered. The basic calculation formulas and initial data are presented. Calculations were carried out for castings of the following types: endless plate, endless cylinder, ball. The results of simulation of solidification process parameters are presented in graphic form. Using various alloys as an example, it has been shown by calculation that when changing composition and properties of mold material, it is possible to change time and speed of alloys solidification in a wide range. In this case, processes of forming the structure and properties of castings are controlled.

Keywords: casting, solidification time, solidification coefficient, heat transfer conditions, heat storage coefficient, sand-clay form.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-327-334

REFERENCES

1. Stefanescu D.M. *Science and Engineering of Casting Solidification*. 3rd ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2015, 559 p.
2. Kostyrychev A.G., Slater C.D., Marenych O.O., Davis C.L. Effect of solidification rate on microstructure evolution in dual phase microalloyed steel. *Scientific Reports*. 2016, vol. 6, article 35715.

3. Cai Z., Zhang C., Wang R., Peng C., Qiu K., Wang N. Effect of solidification rate on the coarsening behavior of precipitate in rapidly solidified Al–Si alloy. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2016, vol. 26, no. 4, pp. 391–397.
4. Xu C., Du R., Wang X., Hanada S., Yamagata H., Wang W., Ma C. Effect of cooling rate on morphology of primary particles in Al–Sc–Zr master alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014, vol. 24, no. 7, pp. 2420–2426.
5. Deev V.B., Prusov E.S., Shunqi M., Ri E.H., Bazlova T.A., Temyantsev M.V., Smetanyuk S.V., Ponomareva S.V., Vdovin K.N. The influence of the melt cooling rate on shrinkage behaviour during solidification of aluminum alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 537, no. 2, article 022080.
6. Jabbari M., Davami P., Varahram N. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of gray cast iron. *Materials Science and Engineering: A*. 2010, vol. 528, no. 2, pp. 583–588.
7. Brionne G., Loucif A., Zhang CP., Lapierre-Boire LP., Jahazi M. 3D FEM simulation of the effect of cooling rate on SDAS and macrosegregation of a high strength steel. *Materials Science Forum*. 2018, no. 941, pp. 2360–2364.
8. Ali M., Porter D., Kömi J., Eissa M., El Faramawy H., Mattar T. Effect of cooling rate and composition on microstructure and mechanical properties of ultrahigh-strength steels. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2019, no. 26, pp. 1350–1365.
9. Jia L., Yu L., Sun W., Zhang W., Fang L., Feng Q., Guo S., Hu Z. Effect of solidification rates on microstructures and segregation of IN718 alloy. *Chinese Journal of Materials Research*. 2010, vol. 24, no. 2, pp. 118–122.
10. Dantzig J.A., Rappaz M. *Solidification*. Taylor & Francis Group, CRS Press, 2009, 621 p.
11. Ciesielski M., Mochnacki B. Comparison of approaches to the numerical modelling of pure metals solidification using the control volume method. *International Journal of Cast Metals Research*. 2019, vol. 32, no. 4, pp. 213–220.
12. Shahane S., Aluru N., Ferreira P., Kapoor S.G., Vanka S.P. Finite volume simulation framework for die casting with uncertainty quantification. *Applied Mathematical Modelling*. 2019, vol. 74, pp. 132–150.
13. Hirata N., Anzai K. Heat transfer and solidification analysis using adaptive resolution particle method. *Materials Transactions*. 2019, vol. 60, no. 1, pp. 33–40.
14. Wang H., Liu F., Yang G., Zhou Y. Modeling the overall solidification kinetics for undercooled single-phase solid-solution alloys. I. Model derivation. *Acta Materialia*. 2010, vol. 58, no. 16, pp. 5402–5410.
15. Zhu M., Zhang L., Zhao H., Stefanescu D.M. Modeling of microstructural evolution during divorced eutectic solidification of spherical graphite irons. *Acta Materialia*. 2015, vol. 84, pp. 413–425.
16. Wang T., Wei J., Wang X., Yao M. Progress and application of microstructure simulation of alloy solidification. *Acta Metallurgica Sinica*. 2018, vol. 54, no. 2, pp. 193–203.
17. Deev V.B., Prikhod'ko O.G., Prusov E.S., Protopopov E.V., Temyantsev M.V., Kutsenko A.I., Mei Shunqi, Ri E.Kh., Smetanyuk S.V., Ponomareva K.V., Gavrilov G.N. Development of methodology for calculating time and solidification coefficient of castings in sandy-clay forms. In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo. Metallurgiya – 2019: Trudy XXI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 23-24 oktyabrya 2019 g. Ch. 1* [Metallurgy: Technology, Innovation, Quality. Metallurgy – 2019: Proceedings of the XXI Int. Sci. and Pract. Conf., October 23-24, 2019. Part 1]. Novokuznetsk: ITs SiBGIU, 2019, pp. 139–146. (In Russ.).
18. Deev V.B., Prikhod'ko O.G., Prusov E.S., Protopopov E.V., Temyantsev M.V., Kutsenko A.I., Mei Shunqi, Ri E.Kh., Bazlova T.A., Smetanyuk S.V., Sokorev A.A. Development of methodology for calculating solidification time of castings and ingots in metal form. In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo. Metallurgiya – 2019: Trudy XXI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 23-24 oktyabrya 2019 g. Ch. 1* [Metallurgy: Technology, Innovation, Quality. Metallurgy – 2019: Proceedings of the XXI Int. Sci. and Pract. Conf., October 23-24, 2019. Part 1]. Novokuznetsk: ITs SiBGIU, 2019, pp. 146–151. (In Russ.).
19. Veinik A.I. *Teoriya zatverdevaniya otlivki* [Theory of casting solidification]. Moscow: Mashgiz, 1960, 436 p. (In Russ.).
20. Balandin G.F. *Osnovy teorii formirovaniya otlivki. Ch. 1. Teplovye osnovy teorii lit'ya. Zatverdevanie i okhlazhdenie otlivki* [Fundamentals of the theory of casting formation. Part 1. Thermal foundations of casting theory. Solidification and cooling of casting]. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 328 p. (In Russ.).

Funding. The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 19-79-30025).

Information about the authors:

O.G. Prikhod'ko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Quality Management and Innovation (prikhodko_og@rambler.ru)

V.B. Deev, Dr. Sci. (Eng.), Leading Expert of the Chair of Metal Forming (deev.vb@mail.ru)

E.S. Prusov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Functional and Structural Materials Technology (eprusov@mail.ru)

A.I. Kutsenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Quality Management and Innovation (aik_mail@mail.ru)

Received February 13, 2020

Revised March 17, 2020

Accepted March 18, 2020

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» (kafcmetsibsiu.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 беззольную 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-

щего 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 (окатывание, 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, бурого угольный 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 ККИ), 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 C 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:

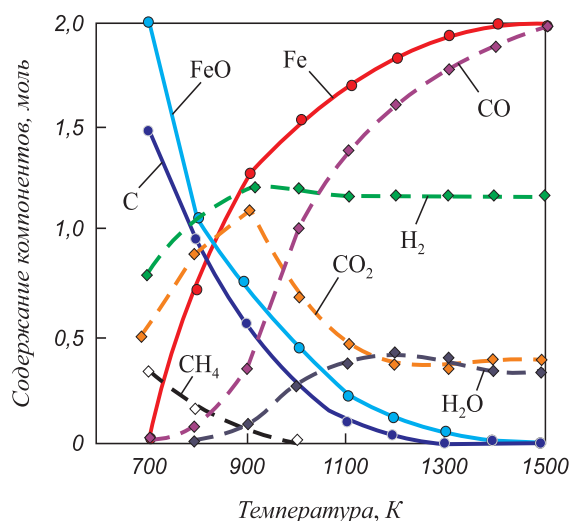


Рис. 1. Зависимость равновесных составов системы Fe–O–C–H от температуры при соотношении Fe:O:C:H = 2:3:2,4:3,2 и давлении $P = 0,1$ МПа:

— 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

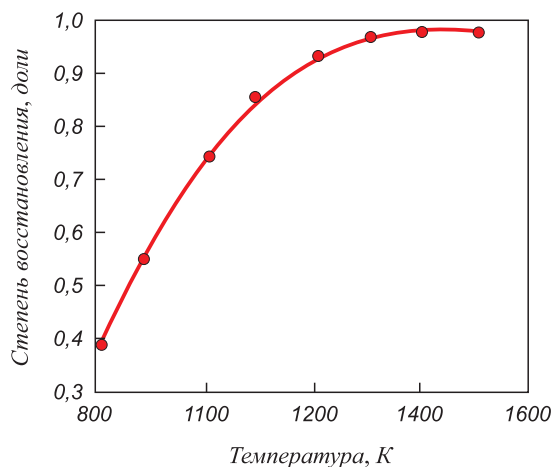


Рис. 2. Зависимость равновесной степени восстановления от температуры при соотношении Fe:O:C:H = 2:3:2,4:3,2 и давлении $P = 0,1$ МПа

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

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

где $\tilde{y}$ – 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-

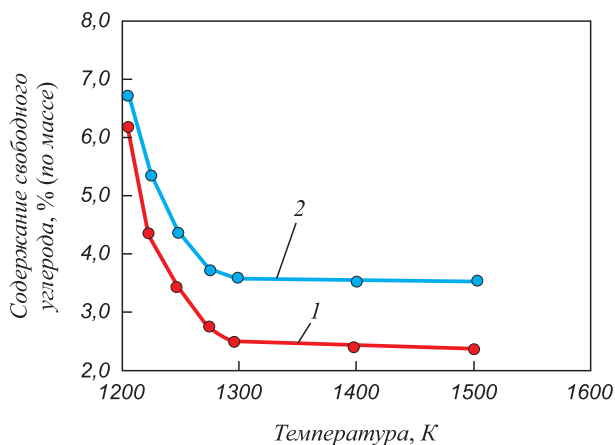


Рис. 3. Зависимость равновесного содержания в продуктах восстановления свободного углерода от температуры при соотношении Fe:O:C:H = 2:3:2,4:3,2 (1) и 2:3:2,7:3,6 (2)

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:

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

Т а б л и ц а 1

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

Т а б л и ц а 2

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 $cm^3/(g \cdot c)$ при температуре 900 °C и длительности металлизации 40 мин $\eta = 96,9$ %, тогда как при использовании углеро-

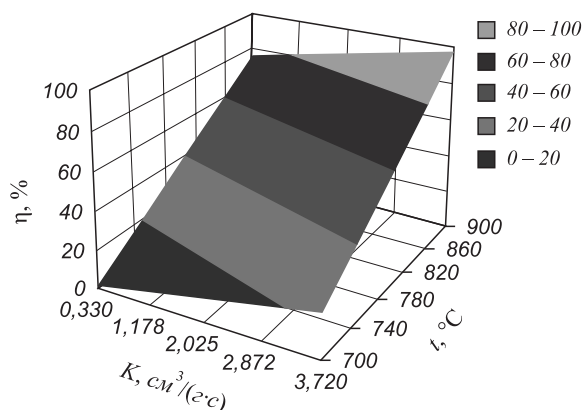


Рис. 4. Графическое представление зависимости $[\eta_2] = f(K, t)$ при $\tau = 50$ мин

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 металлзации (при его изменении от 15 до 40 мин).

Таким образом, для получения металлзованных продуктов требуемого качества процесс металлзации следует осуществлять при температуре $900 \text{ }^\circ\text{C}$ (фактор x_2), длительности металлзации 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 металлзованных продуктов приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Оптимальные значения технологических факторов процесса металлзации и основные характеристики металлзованных продуктов

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

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

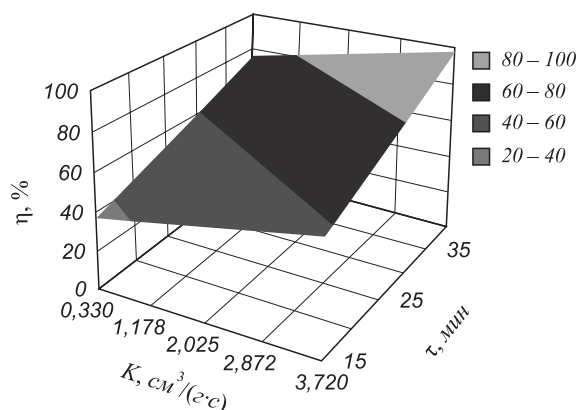


Рис. 5. Графическое представление зависимости $[\eta_2] = f(K, \tau)$ при $t = 900 \text{ }^\circ\text{C}$

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

Металлизацию брикетированных композиций окалина + БПК, КМ, КП и шлам + БПК, КМ, КП проводили при температуре $900 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 40 мин. Основные качественные характеристики полученных металлзованных 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 металлзации окалина с использованием в качестве восстановителя БПК. При металлзации окалина 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 окислы, могут быть использованы для получения губчатого железа. Брикетированные композиции, включающие шлам, могут быть использованы только для частичной металлзации, независимо от вида применяемого углеродистого восстановителя.

Таким образом, БПК является наиболее предпочтительным углеродистым восстановителем для реализации процесса металлзации. Полученные результаты подтверждают возможность получения как губчатого железа для сталеплавильного производства, так и частично металлзованных 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 металлзации 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 CO 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. Tsymbal 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 $\text{Fe}-\text{C}-\text{O}_2-\text{H}_2$ // *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 $\text{Fe}-\text{C}-\text{O}_2-\text{H}_2$ // *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 ОмГТУ, 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 Fe_2O_3 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 $\text{V}_2\text{O}_5-\text{Si}$. *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, pp. 23–28.
12. Tsymbal 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”
(kafcmetsibsiiu.ru)

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

V.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

УДК 669.168

МАРГАНЦЕВЫЕ РУДЫ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ – КУЗБАССА И МЕТОДЫ ИХ ОБОГАЩЕНИЯ*

Нохрина О.И.¹, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов (kafamsf@sibsiu.ru)
Рожихина И.Д.¹, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов (rogihina_id@mail.ru)
Едильбаев А.И.², д.т.н., генеральный директор (ayedilbayev@mail.ru)
Едильбаев Б.А.³, директор (ayedilbayev@mail.ru)

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

² ТОО «Горное бюро»
(050051, Республика Казахстан, Алматы, пр. Достык, 132, оф. 2)

³ ТОО «Электромарганец»
(041701, Республика Казахстан, Алматинская обл., Текели, ул. Сатпаева, 1)

Аннотация. Марганцевые руды подавляющего большинства отечественных месторождений отличаются невысоким качеством и относятся к труднообогатимым: при низком (18 – 24 %) содержании марганца и высоком (отношение Р/Мп > 0,006) удельном содержании фосфора они имеют повышенное содержание железа и кремния. Основная (98,5 млн т (64,2 %)) часть балансовых запасов марганцевых руд сосредоточена на крупном Усинском месторождении в Кемеровской области. Кроме Усинского в Кемеровской области разрабатываются Кайгатское (32,7 млн т), Дурновское (300 тыс. т), Селезеньское месторождения и участок Чумай. Для комплексного подхода к решению рассматриваемой проблемы необходимо технически и экономически обосновать все этапы (разведку месторождений, добычу и обогащение марганцевых руд, последующую их переработку и потребление) вовлечения в производство марганцевых руд месторождений Кемеровской области – Кузбасса. Высококачественные марганцевые концентраты по разработанной технологии кальций-хлоридного обогащения получают из карбонатных, в том числе высокофосфористых руд Усинского месторождения, бедных оксидных и железомарганцевых руд Селезеньского и Дурновского месторождений. Извлечение марганца из марганецсодержащего сырья в концентрат составляет не менее 90 %. Полученный концентрат содержит 58 – 64 % марганца, менее 0,01 % фосфора, 0,02 – 0,05 % оксида железа, 0,5 – 1,0 % кремнезема и следы серы. Термодинамические расчеты и экспериментальные исследования по обогащению полиметаллических марганецсодержащих руд участка Чумай позволили определить основные технологические параметры извлечения ценных компонентов. Применение оптимальных технологических параметров обогащения позволяет извлекать из сырья до 95 – 97 % марганца и 98 – 99 % никеля.

Ключевые слова: марганцевые руды, концентрат химического обогащения, кальций-хлоридный способ обогащения, полиметаллические марганцевые руды, термодинамические расчеты, никелевый концентрат, железный концентрат.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-344-350

ВВЕДЕНИЕ

Для металлургических заводов Российской Федерации на сегодняшний день актуален вопрос обеспечения марганцевыми ферросплавами. Это связано с невысоким уровнем развития марганцевой рудной базы и отсутствием предприятий по подготовке марганцевого сырья для производства ферросплавов. Потребность России в марганцевых ферросплавах составляет около 670 тыс. т в год. Следует констатировать, что добыча марганцевых руд на территории страны в промышленно значимых масштабах не ведется, хотя Россия (особенно Кузбасс) обладает достаточными запасами марганцевых руд, которые позволяют при их освоении обеспечить металлургию отечественными ферросплавами.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Субъекта РФ (Кемеровская область – Кузбасс) в рамках научного проекта № 20-48-420001/20.

Для обеспечения ресурсной независимости российской металлургии в обеспечении марганцевыми ферросплавами необходимо проводить работы по созданию отечественной марганцеворудной базы.

На территории России выявлено более 20 марганецсодержащих месторождений, но марганцевые руды многих из них отличаются низким (18 – 24 %) содержанием марганца, высоким (отношение Р/Мп > 0,006) удельным содержанием фосфора, а также имеют повышенное содержание оксидов железа и кремния и относятся к труднообогатимым. Основные запасы марганцевых руд, составляющие около 98,5 млн т (64,2 %), сосредоточены на Усинском месторождении в Кемеровской области – Кузбассе. На долю последней приходится более 132 млн т общих разведанных запасов и более 17 млн т прогнозных ресурсов.

Кроме Усинского в Кемеровской области – Кузбассе имеются Кайгатское (32,7 млн т), Дурновское

(300 тыс. т), Селезеньское месторождения и участок Чумай.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фазовый и химический составы марганцевых руд, концентратов определяли с применением методов химического, спектрального и рентгенофазового анализов.

Для разработки эффективных схем переработки марганцевых руд необходима принципиально новая стратегия концентрирования полезного компонента, базирующаяся на использовании природного свойства раскрытия марганцевых минералов уже на стадии добычи или крупного дробления, применения новых, более селективных методов обогащения. Эта задача успешно решается методами радиометрической крупнопорционной и покусковой сепараций.

Эти методы обогащения получают значительное развитие. В их основе лежит использование эффектов, которые возникают при взаимодействии излучений с компонентами руды, при этом реализуется природная неравномерность свойств (контрастность, фазовое раскрытие) элементарных объемов горной массы. Для марганцевых руд перспективными являются рентгено-радиометрический, фотометрический и рентгенолюминесцентный методы сепарации [1, 2].

Наиболее селективный метод – рентгенорадиометрический. При его реализации выполняют сортировку от каждого анализируемого куска руды по спектру рентгеновского излучения.

Радиометрическую сепарацию применяют на крупных классах руды: +10 или +20 мм. Наибольшую ценность для металлургии представляют крупнокусковые марганцевые руды, поэтому использование покусковой радиометрической сепарации для марганцевых руд оправдано и обосновано [2].

Определенный интерес обогащения бедного марганецсодержащего сырья представляют биохимические методы извлечения марганца. Сущность таких методов извлечения марганца состоит в том, что бактерии, введенные в марганецсодержащую среду, выделяют органические метаболиты (вещества, возникающие в организме в процессе обмена веществ, например, лимонную, молочную кислоты, аминокислоты), которые, взаимодействуя с марганецсодержащими минералами, переводят марганец в раствор. Затем марганец осаждают из раствора известными методами [3]. В зависимости от типа бактерий фосфор и некоторые другие элементы могут переходить в раствор или оставаться в твердом остатке.

Гидрометаллургические (химические) методы обогащения предусматривают обработку марганцевых концентратов (руд, шламов) щелочными (кислотными, солевыми) растворами с целью удаления фосфора и сохранения (повышения) содержания марганца в твер-

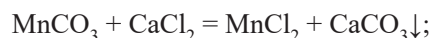
дом остатке. В настоящее время наиболее изучены следующие способы: содовый, гаусманитовый, кальций-хлоридный и дитионатный [4].

Большое число разработанных химических методов дефосфорации руд связано с разнообразием как видов руд, так и форм содержания в них фосфора. Наиболее общим признаком химических методов следует признать состав химического реагента, используемого для выщелачивания марганецсодержащего сырья. В основу классификации может быть положен вид марганецсодержащего минерала, поскольку каждый минерал марганца по-своему взаимодействует с тем или иным химическим реагентом [5 – 14]. Универсальным и перспективным является кальций-хлоридный способ.

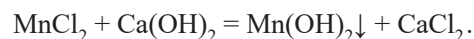
Кальций-хлоридный способ получения высококачественного концентрата предусматривает обработку руды в автоклаве при температуре 200 – 240 °С раствором хлористого кальция. Марганец переходит в раствор в виде хлорида. В концентрат извлекается только марганец, содержащийся в руде в виде карбонатов, поэтому для оксидных и оксидно-карбонатных руд этот способ не пригоден.

Суть этого способа описывается следующими обменными реакциями:

– I стадия



– II стадия



На первой стадии тонко размолотая руда обрабатывается при температуре 220 – 240 °С в автоклаве насыщенным раствором хлористого кальция; на второй стадии проводят обработку раствора известковым молоком после фильтрования. Выпавший осадок прокаливают и анализируют.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Место расположения Усинского месторождения – Алтае-Саянская металлогеническая провинция. Общая характеристика руд приведена в табл. 1. По результатам химического и фазового анализов содержание марганца в рудах месторождения составляет 18 – 22 %, преобладающим типом руд является карбонатный. По химическому составу руды Усинского месторождения можно отнести к бедным марганцевым рудам с высоким содержанием фосфора. В Усинской родохрозитовой руде содержание фосфора колеблется в пределах 0,14 – 0,18 % при содержании марганца 25,5 – 26,0 %.

Карбонатные руды Усинского месторождения относятся к Усинской свите раннекембрийского возраста, которая представлена известняками, доломитами, песчаниками, глинистыми и углистыми сланцами. Среди

Т а б л и ц а 1

Запасы и химический состав марганцевых руд Усинского месторождения

Table 1. Reserves and chemical composition of manganese ores from the Usinskoye deposit

Руды, участки	Запасы по категориям <i>A + B + C</i> , млн т		Содержание, %							
	всего	выше уровня реки Усы	Mn	Fe	P	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
Окисленные	5,70	1,15	—	—	—	—	—	—	—	—
Правобережный	4,54	3,34	26,9	8,50	0,27	0,05	25,30	3,70	5,0	1,30
Левобережный	1,16	—	15,8	12,40	0,33	—	—	—	—	—
Карбонатные	92,85	34,85	19,3	5,96	0,18	1,09	10,33	1,67	14,9	3,17
Правобережный	47,68	27,74	19,5	5,00	0,17	0,94	14,60	1,55	16,5	3,31
в т.ч. родохрозитовые	22,96	—	24,6	5,25	0,16	0,77	13,01	1,35	12,3	3,41
Левобережный	45,17	6,51	19,2	6,60	0,19	1,11	20,10	1,78	16,2	3,04
в т.ч. родохрозитовые	20,7	—	23,6	6,90	0,19	0,73	14,97	1,51	10,4	2,90

П р и м е ч а н и е. По данным института «Уралгипроруд» (г. Екатеринбург) общие запасы руд в контурах открытой и подземной отработки при бортовом содержании марганца 10 % составляют 131 млн т (окисленных 5 млн т и карбонатных 126 млн т).

первичных руд выделяют родохрозитовые, известняково-родохрозитовые, хлорит-родохрозитовые. Среднее содержание в них марганца составляет 19,350 %, фосфора – 0,177 %, серы – 1,090 % [15].

Около 45 % балансовых запасов месторождения составляют запасы родохрозитовых руд, содержащие 20 – 36 % марганца. Суммарные запасы мanganокальцитовых руд составляют 55 % балансовых запасов со средним содержанием марганца 14,5 %. На месторождении разведаны запасы окисленных руд в количестве 5700 тыс. т со средним содержанием марганца в балансовых рудах 26,7 % (максимально до 60,0 %). Это образования коры выветривания, основной минерал в них – псиломелан. Окисленные руды можно обогащать по следующей схеме: дробление, промывка, отсадка, мокрая магнитная сепарация с получением концентрата металлургического сорта (46,3 % Mn, 0,1 % P, 5,4 % Fe).

Селезенское месторождение марганцевых руд находится в 65 км к юго-западу от г. Таштагол Кемеровской области – Кузбасса. В центральной его части выявлены четыре рудных тела, представляющие собой валунчатые железомарганцевые руды.

Среднее содержание по пересечениям колеблется от 5,03 % Mn и 10,06 % Fe до 28,83 % Mn и 21,75 % Fe. По результатам оценки минерального состава преобладают пиролюзит и псиломелан, криптомелан и рамсделлит представлены в меньшей степени. Химический состав руд (с содержанием 14,57 % Mn; 13,87 % Fe_{общ}) следующий, %: 1,53 MnO; 21,19 MnO₂; 19,81 Fe₂O_{3,общ}; 0,28 P₂O₅; 48,01 SiO₂; 2,45 Al₂O₃; 0,097 TiO₂; 0,14 MgO; 0,82 CaO; 0,108 Na₂O; 0,524 K₂O; 1,12 H₂O; 0,06 Cu; 0,033 Ni; 0,052 Co; 0,039 Zn. Из анализа результатов химического и спектрального исследований следует, что руды характеризуются повышенным содержанием ко-

бальта и никеля [16]. Марганец находится в пероксидной форме, коэффициент пероксидности составляет 1,45.

В опойскованной части Селезенского месторождения запасы руд при бортовом содержании марганца около 10 % оцениваются в 2,1 млн т рудной массы.

Сажистые марганцевые руды, представляющие обломки железо-марганцевых руд в суглинках и глинах месторождения, содержат в среднем 6,96 – 8,24 % Mn.

Промывкой из сажистых марганцевых руд получают продукты с содержанием в них (среднее по фракциям –50 ÷ +0,16) 16,66 % Mn; 17,74 % Fe; 42,86 % SiO₂; 0,16 % P при выходе 39,2 %. Сажистые марганцевые руды занимают участки Чеболдаг-I и Чеболдаг-II, их запасы в сумме оцениваются примерно 525 тыс. т. Прогнозные ресурсы валунчатых марганцевых руд остальной площади оцениваются в 5,0 млн т.

Дурновское месторождение марганцевых руд расположено в 6 км западнее села Красное Ленинск-Кузнецкого района Кемеровской области – Кузбасса. Химический состав марганцевых руд Дурновского месторождения неоднороден: 19 – 55 % оксид марганца, 7,93 – 32,57 % диоксид кремния, 0,01 до 0,20 % пентаоксид фосфора.

Результаты рентгеноструктурного анализа подтвердили преобладание (около 78 %) псиломелана (MnO·MnO₂·nH₂O), а также присутствие в незначительных (3,9 %) количествах пиролюзита (MnO₂), браунита (3Mn₂O₃·MnSiO₃), кроме этого манганита (MnO₂·Mn(OH)₂).

Рудные тела в зоне окисления представлены псиломеланом и рассматривались в качестве образований коры выветривания. Проведенные работы с рудными телами показали, что оруденение не ограничивается корой выветривания и псиломелановые руды на глубине

сменяются гаусманит-браунитовыми и манганокальцитовыми [17]. Железомарганцевые руды составляют большую часть запасов марганцевых руд Дурновского месторождения.

Сводные данные суммарного ($C_1 + C_2$) подсчета запасов руды и содержания марганца по рудным телам, при бортовом содержании марганца 10 %, представлены в табл. 2. Оценка металлургической ценности этих руд по показателям отношений $\frac{Fe}{Mn}$, $\frac{P}{Mn}$ и $\frac{(Mn)_p}{(SiO_2)_p}$ указывает на то, что оба типа руд не могут быть использованы для получения стандартных ферро- и силико-марганца.

Выявленные проявления качественных марганцевых руд в пределах участка Чумай (Тисульский район Кемеровской области) имеют в своем составе до 54,0 % марганца, 0,2 % фосфора и примеси цветных металлов (до 0,5 % Ni, до 3,0 % Co, до 0,2 % Cu). Они относятся к полиметаллическим марганцевым рудам. Химический состав марганцевых руд приведен ниже:

Элемент	Содержание, % (по массе)
Mn _{общ}	54,6
Fe _{общ}	4,60
P	0,20
SiO ₂	7,52
CaO	0,76
Al ₂ O ₃	1,94
BaO	0,07
Ni	0,50
Co	3,00
Cu	0,20

По результатам рентгенофазового анализа в рудах участка Чумай преобладают марганцевые руды брекчиевой текстуры, состоящей из угловатых обломков и цементирующей массы, которые различаются минеральным составом, структурой или генезисом породы [3].

Исследуемые марганцевые руды представлены различными минералами, среди которых преобладает криптомелан-голландит ($K_2Mn^{2+}Mn_6^{4+}O_{16}(OH)_4BaMn^{2+}Mn_6^{4+}O_{16}(OH)_4$), встречаются в незначительных количествах вернадит ($MnO_2 \cdot H_2O$) и пиролюзит (MnO_2). Кроме основных минералов в марганцевых рудах встречается гетит в незначительных количествах, присутствующий в рудах в виде тонкозернистых агрегатов. Наличие перечисленных минералов свидетельствует о том, что исследуемые руды относятся к вторичным окисленным марганцевым рудам.

Для комплексного подхода к решению проблемы извлечения марганца следует технически и экономически обосновать все этапы (разведку месторождений, добычу и обогащение марганцевых руд, последующую их

Т а б л и ц а 2

Запасы Дурновского месторождения

Table 2. Reserves of the Durnovskoye deposit

Рудные тела	Запасы, тыс. т	Содержание марганца в руде, %
Окисленные руды:		
рудное тело 1	68,541	20,99
рудное тело 2	21,554	17,92
рудное тело 3	136,283	14,89
рудное тело 4	3,468	13,07
рудное тело 5	0,937	18,75
рудное тело 6	49,232	20,01
рудное тело 7	17,123	23,42
Итого по окисленным рудам	297,139	17,86
Осадочные руды (Северо-Западная залежь)	9,000	28,33
Итого по месторождению	306,139	18,16

переработку и потребление) вовлечения в производство марганцевых руд месторождений Кемеровской области – Кузбасса.

Применение рентгенорадиометрической сепарации позволило получить из карбонатных руд Усинского месторождения два концентрата: первый – с содержанием марганца 37,6 % при выходе 25,4 % от исходной руды (20,2 % Mn); второй – с содержанием 33,2 % марганца (выход 26,4 %). Содержание фосфора в концентратах составило 0,110 и 0,127 % соответственно.

Концентрат, в составе которого 46,5 % Mn, 1,0 % Fe, 15,8 % SiO₂, 0,07 % P при выходе 9,95 % получен из руд Селезеньского месторождения (14,16 % Mn; 15,23 % Fe) путем обогащения методом рентгенорадиометрической сепарации. При применении этого метода глубокой дефосфорации не достигается, так как большая часть соединений фосфора находится в сростках с минералами марганца.

В результате биохимического обогащения карбонатных руд Усинского месторождения с помощью микроорганизмов при содержании 0,12 % фосфора в исходном продукте получен продукт обогащения с содержанием 0,030 – 0,082 % P. Из манганокальцитовой руды с содержанием марганца 17,55 % был также получен положительный результат.

Высококачественные марганцевые концентраты (KXO) по разработанной технологии кальция-хлоридного обогащения получены из карбонатных, в том числе высокофосфористых руд Усинского месторождения, бедных окисдных и железомарганцевых руд Селезеньского и Дурновского месторождений. Состав полученного концентрата: 58 – 64 % марганца; менее 0,01 % фосфора; 0,02 – 0,05 % оксида железа; 0,5 – 1,0 % ди-

Химический состав концентратов

Table 3. Chemical composition of the concentrates

Концентрат	Содержание, % (по массе)					Извлечение основного элемента, %
	Ni	Mn	Fe	Co	Cu	
Никелевый	45,0	2,30	1,40	0,50	0,10	95
Марганцевый	0,78	57,10	4,30	5,78	0,09	92
Железный	2,60	5,310	58,01	6,90	0,11	93
Кобальтовый	0,08	25,62	14,32	32,27	менее 0,02	60

оксида кремния; следы серы. Процент извлечения марганца из марганцевых руд этих месторождений составляет не менее 90 % [18].

В ходе реализации кальций-хлоридного способа для выщелачивания марганца расходуется доступный, недорогой реагент (известь), хлористый кальций при этом регенерируется. Вредные примеси марганцевой руды, представляющие собой соединения серы, фосфора и диоксида кремния, в насыщенном растворе хлористого кальция не растворяются, следовательно, отсутствует необходимость очистки раствора от вредных примесей. Все вышеперечисленное является достоинством кальций-хлоридного способа.

Экспериментальные исследования, подтверждающие термодинамические расчеты по обогащению полиметаллических марганцевых руд, расположенных на участке Чумай, позволили определить основные технологические параметры извлечения ценных компонентов. При этом в качестве растворителей использовали водные растворы хлоридов железа и кальция или сульфата железа и хлорида кальция.

При применении оптимальных технологических параметров обогащения извлечение из сырья марганца достигает 95 – 97 %, а никеля 98 – 99 %.

При обогащении происходит переход в раствор не только марганца и никеля, но и присутствующих в марганецсодержащем сырье железа и кобальта. Условия селективного осаждения этих элементов были определены экспериментально.

Состав концентратов, полученных из полиметаллического марганецсодержащего сырья, представлен в табл. 3.

Высокому извлечению оксидов марганца и никеля из полиметаллических руд способствует высокая (475 – 500 К) температура процесса, которая позволяет осуществить очистку раствора от избыточного количества хлористого железа. Это объясняется тем, что его избыток при рассматриваемой температуре гидролизуются и выпадает в осадок. Полученный марганцевый концентрат содержит в своем составе 55 – 64 % марганца; $30 - 130 \frac{(Mn)_p}{(SiO_2)_p}$; $0,3 \cdot 10^{-5} - 0,16 \cdot 10^{-3} \frac{(P)_p}{(Mn)_p}$. Таких высоких показателей по качеству марганцевых кон-

центратов при других способах обогащения получить невозможно [19, 20].

Выводы

На основании термодинамических расчетов и экспериментальных исследований разработаны технологии кальций-хлоридного обогащения марганцевых руд, которые обеспечивают повышение сквозного коэффициента извлечения марганца путем создания рациональной комбинации технологических решений при максимально эффективном использовании физико-химических свойств марганецсодержащих руд месторождений Кемеровской области – Кузбасса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Литвинцева Э.Г., Тигунов Л.П., Броницкая Е.С. и др. Разработка эффективных способов обогащения и переработки окисленных и карбонатных руд марганца месторождений России. – В кн.: Состояние марганцево-рудной базы России и вопросы обеспечения промышленности марганцем. – Красноярск: КНИИГиМС, 2001. С. 138 – 143.
2. Федоров Ю.О. Опыт и практика рентгенорадиометрического обогащения марганцевых руд. – В кн.: Состояние марганцево-рудной базы России и вопросы обеспечения промышленности марганцем. – Красноярск: КНИИГиМС, 2001. С. 163 – 165.
3. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Прошунин И.Е. Получение высококачественных концентратов при обогащении марганцевых руд: монография. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. – 182 с.
4. Сутырин Ю. Анализ состояния гидрометаллургической переработки марганцевого сырья // Национальная металлургия. 2003. № 2. С. 99 – 104.
5. Vracar R.Z., Cerovic K.P. Manganese leaching in the $FeS_2 - MnO_2 - O_2 - H_2O$ system at high temperature in an autoclave // Hydrometallurgy. 2000. Vol. 55. No. 1. P. 79 – 92.
6. Hatk P.K., Sukla L.B., Das S.C. Aqueous SO_2 leaching studies on Nishikhal manganese ore through factorial experiment // Hydrometallurgy. 2000. Vol. 54. No. 2-3. P. 217 – 228.
7. Trifoni M., Toso L., Vegliu F. Reductive leaching of manganiferous ores by glucose and H_2SO_4 : Effect of alcohols // Hydrometallurgy. 2001. Vol. 59. No. 1. P. 1 – 14.
8. Veglio F., Trifoni M., Abbruzzese C., Toro L. Column leaching of a manganese dioxide ore: A study by using fractional factorial design // Hydrometallurgy. 2001. Vol. 59. No. 1. P. 31 – 44.
9. Peng Ding, Quanjun Liu, Wenhao Pang. A review of manganese ore beneficiation situation and development // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 380-384. P. 4431 – 4433.

10. Tingting Kang, Yi Liu, Yongbing Huang, Jing Dong, Qian Huang, Yuying Li. Synthesis and dephosphorization of iron manganese composite oxide by acid Leaching on Iron manganese ore // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 554-556. P. 489 – 493.
11. Sun Da, Li Mao-lin, Li Can-hua, Cul Rui, Zheng Xia-yu. A green enriching process of Mn from low grade ore of manganese carbonate // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 644-650. P. 5427 – 5430.
12. Zhizheng Yang, Guangqiang Li, Chenghong Huang, Jinfa Ding. Mn ore smelting reduction based on double slag operation in BOF // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 753. P. 76 – 80.
13. Pan M.C., Liu X.L., Zou R., Huang J., Han J.C. Study of heat treatment technology on medium-carbon-low-alloy-steel large hammer formation of gradient performance // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 881. P. 1288 – 1292.
14. Šalák A., Selecká M. Effect of manganese addition and sintering conditions on mechanical properties of low carbon 3Cr prealloyed steels // *Materials Science Forum*. 2011. No. 672. P. 55 – 58.
15. Борисов С.М., Зябкин А.В., Старкин С.С. Результаты геологоразведочных работ на марганцевые руды в Кемеровской области. – В кн.: *Состояние марганцево-рудной базы России и вопросы обеспечения промышленности марганцем*. – Красноярск: КНИИГиМС, 2001. С. 36 – 38.
16. Яшин В.Д., Колпак В.П., Дмитриенко В.И. и др. Селезенская площадь проявлений марганцевых руд и перспективы их использования на ОАО «Запсибметкомбинат». – В кн.: *Состояние марганцево-рудной базы России и вопросы обеспечения промышленности марганцем*. – Красноярск: КНИИГиМС, 2001. С. 44, 45.
17. Писарев Л.Н., Цильковский В.Н., Писаревский В.А. Становление Дурновского месторождения // *Природно-ресурсные «Ведомости»*. 2001. № 19. С. 39, 40.
18. Нохрина О.И., Рожихина И.Д. Получение малофосфористого концентрата из руд и железомарганцевых конкреций // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2000. № 8. С. 40 – 45.
19. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Прошунин И.Е., Ходосов И.Е. Обогащение полиметаллических марганцесодержащих руд и рациональное использование полученных концентратов // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2015. Т. 58. № 5. С. 309 – 315.
20. Пат. № 2583224 РФ. Способ химического обогащения полиметаллических марганцесодержащих руд / О.И. Нохрина, И.Д. Рожихина, П.Д. Кравченко, О.Ю. Кичигина, М.С. Костюк. 2016. Бюл. № 13.

Поступила в редакцию 3 февраля 2019 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. 344–350.

MANGANESE ORES OF THE KEMEROVO REGION – KUZBASS AND METHODS OF THEIR ENRICHMENT

**O.I. Nokhrina¹, I.D. Rozhikhina¹, A.I. Edil'baev²,
B.A. Edil'baev³**

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

² LLP “Gornoe byuro”, Almaty, Republic of Kazakhstan

³ LLP “Elektromarganets”, Tekeli, Almaty Region, Republic of Kazakhstan

Abstract. Manganese ores of the vast majority of domestic deposits are of low quality: with low content of manganese (18 – 24 %) and high specific content of phosphorus (ratio P/Mn > 0.006). They have an increased content of iron and silicon and they are difficult to enrich. The main part of balance reserves of manganese ores – 98.5 million tons (64.2 %) is concentrated in large Usinskoye field in the Kemerovo region. In addition to Usinskoye, there are also deposits in this region – Kaigadatskoye (32.7 million tons), Durnovskoye (300 thousand tons), Selezenskoye fields and the Chumay plot. For a comprehensive approach to solving the proposed problem it is needed to assess technical and economic feasibility of all stages (exploration, extraction and enrichment of manganese ores, their subsequent processing and consumption) of involvement of manganese ores from these deposits in production. Using developed technology of calcium-chloride enrichment, high-quality manganese concentrates are obtained from carbonate, including high-phosphorous ores of the Usinskoye field, poor oxide and ferromanganese ores of the Selezenskoye and the Durnovskoye fields. Extraction of manganese from manganese-containing raw materials into concentrate was at least 90 %. The resulting concentrate contains 58 – 64 % of manganese, less than 0.01 % of phosphorus, 0.02 – 0.05 % of iron oxide, 0.5 – 1.0 % of silica and sulfur. Thermodynamic calculations and experimental studies on the enrichment of polymetallic manganese-containing ores from the Chumay plot allowed us to determine the main technological parameters for extracting valuable components. The use of optimal technological parameters of enrichment allows extraction of up to 95 – 97 % of manganese and 98 – 99 % of nickel from raw materials.

Keywords: manganese ores, concentrate of chemical enrichment, calcium-chloride enrichment method, polymetallic manganese ores, thermodynamic calculations, nickel concentrate, iron concentrate.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-344-350

REFERENCES

1. Litvintseva E.G., Tiginov L.P., Bronitskaya E.S. etc. Development of effective methods for enrichment and processing of oxidized and carbonate ores of manganese deposits in Russia. In: *Sb. nauch. tr.: Sostoyanie margantsevo-rudnoi bazy Rossii i voprosy obespecheniya promyshlennosti margantsem* [Coll. of Sci. Papers: State of the manganese ore base in Russia and issues of the industry provision with manganese]. Krasnoyarsk: KNIIGiMS, 2001, pp. 138–143. (In Russ.).
2. Fedorov Yu.O. Experience and practice of X-ray radiometric concentration of manganese ores. In: *Sb. nauch. tr.: Sostoyanie margantsevo-rudnoi bazy Rossii i voprosy obespecheniya promyshlennosti margantsem* [Coll. of Sci. Papers: State of the manganese ore base in Russia and issues of the industry provision with manganese]. Krasnoyarsk: KNIIGiMS, 2001, pp. 163–165. (In Russ.).
3. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Proshunin I.E. *Poluchenie vysokokachestvennykh kontsentratsiy pri obogashchenii margantsevykh rud: monografiya* [Obtaining high-quality concentrates at enrichment of manganese ores: Monograph]. Novokuznetsk: ITs SiBGiU, 2019, 182 p. (In Russ.).
4. Sutyurin Yu. Analysis of hydrometallurgical processing of manganese raw materials. *Natsional'naya metallurgiya*. 2003, no. 2, pp. 99–104. (In Russ.).
5. Vracar R.Z., Cerovic K.P. Manganese leaching in the FeS₂–MnO₂–O₂–H₂O system at high temperature in an autoclave. *Hydrometallurgy*. 2000, vol. 55, no. 1, pp. 79–92.
6. Hatk P.K., Sukla L.B., Das S.C. Aqueous SO₂ leaching studies on Nishikhal manganese ore through factorial experiment. *Hydrometallurgy*. 2000, vol. 54, no. 2-3, pp. 217–228.

7. Trifoni M., Toso L., Veglio F. Reductive leaching of manganiferous ores by glucose and H_2SO_4 : Effect of alcohols. *Hydrometallurgy*. 2001, vol. 59, no. 1, pp. 1–14.
 8. Veglio F., Trifoni M., Abbruzzese C., Toro L. Column leaching of a manganese dioxide ore: A study by using fractional factorial design. *Hydrometallurgy*. 2001, vol. 59, no. 1, pp. 31–44.
 9. Peng Ding, Qunjun Liu, Wenhao Pang. A review of manganese ore beneficiation situation and development. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, vol. 380–384, pp. 4431–4433.
 10. Tingting Kang, Yi Liu, Yongbing Huang, Jing Dong, Qian Huang, Yuying Li. Synthesis and dephosphorization of iron manganese composite oxide by acid Leaching on Iron manganese ore. *Advanced Materials Research*. 2012, vol. 554–556, pp. 489–493.
 11. Sun Da, Li Mao-lin, Li Can-hua, Cul Rui, Zheng Xia-yu. A green enriching process of Mn from low grade ore of manganese carbonate. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 644–650, pp. 5427–5430.
 12. Zhizheng Yang, Guangqiang Li, Chenghong Huang, Jinfa Ding. Mn Ore Smelting Reduction Based on Double Slag Operation in BOF. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, vol. 753, pp. 76–80.
 13. Pan M.C., Liu X.L., Zou R., Huang J., Han J.C. Study of heat treatment technology on medium-carbon-low-alloy-steel large hammer formation of gradient performance. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 881, pp. 1288–1292.
 14. Šalak A., Selecká M. Effect of manganese addition and sintering conditions on mechanical properties of low carbon 3Cr prealloyed steels. *Materials Science Forum*. 2011, no. 672, pp. 55–58.
 15. Borisov S.M., Zyabkin A.V., Starkin S.S. Results of exploration for manganese ores in the Kemerovo region. In: *Sb. nauch. tr.: Sostoyanie margantsevo-rudnoi bazy Rossii i voprosy obespecheniya promyshlennosti margantsem*. [Coll. of Sci. Papers: State of the manganese ore base in Russia and issues of the industries provision with manganese]. Krasnoyarsk: KNIIGiMS, 2001, pp. 36–38. (In Russ.).
 16. Yashin V.D., Kolpak V.P., Dmitrienko V.I. etc. Selezenskaya plot of manganese ores deposit and prospects for their use at OJSC “Zapsibmetkombinat”. In: *Sb. nauch. tr.: Sostoyanie margantsevo-rudnoi bazy Rossii i voprosy obespecheniya promyshlennosti margantsem* [Coll. of Sci. Papers: State of the manganese ore base in Russia and issues of the industries provision with manganese]. Krasnoyarsk: KNIIGiMS, 2001, pp. 44, 45. (In Russ.).
 17. Pisarev L.N., Tsil'kovskii V.N., Pisarevskii V.A. Formation of the Durnovskoye deposit. *Prirodno-resursnye "Vedomosti"*. 2001, no. 19, pp. 39, 40. (In Russ.).
 18. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D. Obtaining of low-phosphorous concentrate from ores and ferromanganese nodules. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2000, no. 8, pp. 40–45. (In Russ.).
 19. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Proshunin I.E., Khodosov I.E. Polymetallic manganese ore dressing and optimal use of the obtained concentrates. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 5, pp. 309–315. (In Russ.).
 20. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Kravchenko P.D., Kichigina O.Yu., Kostyuk M.S. *Sposob khimicheskogo obogashcheniya polimetallicheskih marganetssoedержashchikh rud* [Method of chemical enrichment of polymetallic manganese-containing ores]. Patent RF no. 2583224. *Bulleten' izobretenii*. 2016, no. 13. (In Russ.).
- Funding.** The study was financially supported by the RFBR and the Russian Federation region (Kemerovo Region – Kuzbass) within the framework of the scientific project No. 20-48-420001/20.
- Information about the authors:**
- O.I. Nokhrina**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy (kafamsf@sibsiu.ru)
- I.D. Rozhikhina**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy (rogihina_id@mail.ru)
- A.I. Edil'baev**, Dr. Sci. (Eng.), General Director (ayedilbayev@mail.ru)
- B.A. Edil'baev**, Director (ayedilbayev@mail.ru)

Received February 3, 2020
 Revised February 21, 2020
 Accepted February 25, 2020

УДК 621.793.74:[669.018.25:[669.295+661.65]]

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ТИТАНОМ И БОРОМ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК10КС НА ЕГО СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА*

Осколкова Т.Н., д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением
и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК» (osolkova@kuz.ru)

Симачев А.С., к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением
и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК» (simachev_as@mail.ru)

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

Аннотация. Рассмотрено модифицирование поверхности твердого сплава ВК10КС титаном совместно с бором способом импульсно-плазменного воздействия (электровзрывного легирования). При этом формируется сверхтвердый (нанотвердость 27 500 МПа) слой толщиной 2,0 – 2,5 мкм с низким ($\mu = 0,10$) коэффициентом трения по сравнению с коэффициентом трения твердого сплава в спеченном состоянии ($\mu = 0,41$). Этот слой состоит из мелкодисперсных высокотвердых фаз TiB_2 , (Ti, W)C, W_2C (по данным растровой, просвечивающей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа). Ниже располагается упрочненный (с нанотвердостью 17 000 МПа) приповерхностный слой (зона термического влияния) толщиной 10 – 15 мкм, идентифицированный карбидами W_2C и WC и легированный кобальтовой связующей. Этот слой плавно переходит в основу. Профилометрическими исследованиями установлено, что после электровзрывного легирования титаном с бором шероховатость увеличивается ($Ra = 2,00$ мкм) по сравнению с исходной ($Ra = 1,32$ мкм), но сохраняется в пределах технических требований ($Ra = 2,50$ мкм). Исследованиями выявлены изменения, возникающие в поверхностной карбидной и приповерхностной кобальтовой фазах при электровзрывном легировании. В карбидной фазе выявлены скопления дислокаций. В кобальтовой связующей выявлены деформационные полосы (полосы скольжения), единичные дислокации, а также мелкодисперсные выделения карбидов вольфрама). Указанное изменение можно объяснить стабилизацией кубической модификации кобальта, кристаллическая решетка которого обладает большим числом плоскостей скольжения при деформации и большей способностью к упрочнению по сравнению с гексагональной модификацией кобальта. Дополнительное легирование кобальтовой связующей положительно влияет на эксплуатационную стойкость карбидовольфрамовых твердых сплавов в целом из-за своей стабилизации.

Ключевые слова: импульсная плазменная обработка, твердые сплавы, нанотвердость, износостойкость, взрываемый проводник, микроструктура, кобальтовая связующая.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-351-356

ВВЕДЕНИЕ

Развитие машиностроения, горнодобывающей и деревообрабатывающей промышленности в нашей стране напрямую связано с применением спеченных твердых сплавов, которые широко используют в качестве инструментальных материалов. Сплавы WC–Co – наиболее прочные из известных твердых сплавов. Однако эти сплавы не всегда удовлетворяют требованиям по эксплуатационной стойкости, поэтому одним из перспективных направлений их совершенствования является разработка технологий, которые обеспечивают повышение износостойкости при сохранении вязкости [1 – 6]. Для поверхностного упрочнения твердых сплавов в последнее время все чаще стали применять концентрированные потоки энергии, используя импульсные плазменные ускорители [7 – 12].

* Авторы выражают благодарность д.т.н., профессору кафедры естественнонаучных дисциплин им. В.М. Финкеля Е.А. Будовских за предоставленную возможность в проведении эксперимента.

Целью настоящей работы явилось получение упрочненного слоя на поверхности сплава ВК10КС способом электровзрывного легирования с использованием титана и бора, исследование его структуры и свойств.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Стремление интенсифицировать процесс получения упрочненных слоев-покрытий, повысить их чистоту и адгезию к подложкам привело к применению импульсных плазменных ускорителей. При импульсно-плазменном нанесении покрытий используют более плотные потоки плазмы, чем при ионно-плазменном напылении.

Одним из способов импульсного плазменного воздействия является электровзрывное легирование (ЭВЛ), сущность которого основана на накоплении энергии батарей импульсных конденсаторов до 1 – 10 кДж и ее последующем разряде в течение 100 мкс через проводник, испытывающий при этом взрывное разрушение. Способ ЭВЛ вольфрамокобальтового твердосплавного

инструмента включает нагрев поверхности и насыщение ее продуктами взрыва с последующей самозакалкой путем отвода тепла в глубь материала и окружающую среду. Инструментом теплового воздействия на поверхность и источником легирующих элементов при ЭВЛ является импульсная многофазная плазменная струя. Она формируется из материала взрываемого проводника, закрепленного на коаксиально-торцевых электродах плазменного ускорителя. Область взрыва локализована конической разрядной камерой, переходящей в цилиндрическое сопло, через которое продукты взрыва истекают в вакуумную технологическую камеру установки с остаточным давлением 100 Па [13].

Обработку поверхности твердого сплава ВК10КС проводили в высокоэнергетическом режиме при интенсивности воздействия $6,0 \text{ ГВт/м}^2$ (диаметр d внутреннего электрода 15 мм; диаметр d_0 канала сопла 10 мм; расстояние x от облучаемой поверхности до среза сопла 20 мм; величина зарядного напряжения $U = 2,3 \text{ кВ}$). Облучаемая поверхность твердого сплава испытывала оплавление и интенсивное конвективное перемешивание расплава из-за неоднородного давления, оказываемого плазменной струей на поверхность [14].

В работе исследовали титан ВТ1-00 в виде фольги толщиной 25 мкм. При взрыве титана можно ожидать формирования на поверхности твердых сплавов группы ВК карбидов титана TiC – основу твердых сплавов группы ТК, используемых при высоких скоростях резания [15].

В работе [16] установлено, что ЭВЛ сплава ВК10КС титаном позволяет повысить поверхностную твердость до 25 000 МПа. Возможности такой обработки могут быть увеличены при совместном взрыве титановой фольги и порошка бора, которые переносятся формируемой струей на облучаемую поверхность. Эффективность нанесения на поверхность твердых сплавов боридных покрытий для повышения их микротвердости и износостойкости показана в работе [17].

При использовании титана в качестве проводника совместно с порошком бора в поверхностном слое твердого сплава, куда продукты взрыва переносятся как в плазменном, так и в конденсированном состоянии, возможно образование карбидов и боридов, которые обладают высокой твердостью. В настоящей работе использовали порошок аморфного бора марки А фракцией 5 мкм из расчета 60 мг порошка на 15 см^2 обрабатываемой поверхности.

В работе для электровзрывной обработки использовали твердый сплав марки ВК10КС производства ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» (Россия).

Исследования структуры твердого сплава после ЭВЛ осуществляли с помощью растрового («Philips SEM 515») и просвечивающего (марки Теснаі 20 G2 TWIN фирмы FEI) электронных микроскопов. Химический состав поверхностного и приповерхностного

слоев твердого сплава до и после электровзрывной обработки определяли на растровых электронных микроскопах «Philips XL-30», «Philips SEM 515». Рентгенофазовые исследования проводили с помощью дифрактометра ДРОН-2,0 в K_α -излучении железа. Оценку нанотвердости поверхностного слоя после упрочнения проводили на приборе «Nano Hardness Tester» фирмы CSEM на трех образцах по 10 замеров на каждом. Испытания образцов на износостойкость в исходном состоянии и после упрочнения проводили с помощью трибометра «PC-Operated High Temperature Tribometer» при комнатной температуре. Износ образцов определяли путем измерения глубины и площади трека износа, образованного в результате действия вращающегося алмазного индентора на неподвижном образце (нагрузка, действующая на индентор, оставляла 3 Н, количество вращений – 4000 оборотов, линейная скорость движения индентора $2,5 \text{ см/с}$) с помощью высокоточной измерительной установки «Micro Measure 3D station» с программным обеспечением. Анализ полученных профилей осуществлен с использованием компьютерной программы Mountains Map Universal, версия 2.0.13. Результаты трибологических испытаний представлены как среднеарифметические значения, полученные на трех образцах по 10 замеров на каждом. Оценку шероховатости проводили с помощью установки «Micro Measure 3D station» фирмы CSEM.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При ЭВЛ в высокоэнергетическом режиме происходит расплавление поверхностного слоя твердого сплава, насыщение этого слоя продуктами взрыва, интенсивное перемешивание под действием плазменной струи, дальнейшее ускоренное охлаждение и кристаллизация расплавленного слоя. Металлографические исследования показали (рис. 1), что при импульсной плазменной обработке твердосплавных пластин титаном с бором образуется плохо травящаяся зона тол-

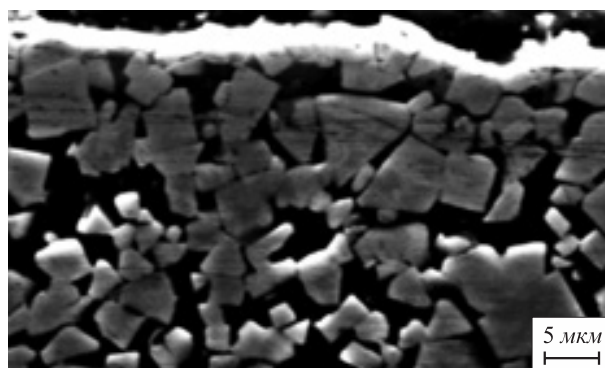


Рис. 1. Микроструктура сплава ВК10КС после электровзрывного легирования титаном с бором

Fig. 1. Microstructure of VK10KS alloy after electroexplosive alloying with titanium and boron

щиной 2,0 – 2,5 мкм следующего химического состава: 16,35 % Ti; 74,9 % W; 4,65 % B; 4,1 % C. Эта зона связана с формированием новых упрочняющих мелкодисперсных фаз и состоит по данным рентгенофазовых исследований из диборида титана TiB_2 (15 %) и карбидов (Ti, W)C (30 %), W_2C (20 %), WC (35 %) (рис. 2). По мнению авторов работы [17] борсодержащие фазы, образующиеся в твердых сплавах после борирования, позволяют сохранять устойчивость этих сплавов в течение длительной эксплуатации при повышенных температурах.

Оценка нанотвердости этого слоя твердого сплава BK10KS после ЭВЛ титаном с бором выявило ее увеличение до 27 500 МПа. Высокие значения нанотвердости связаны с формированием при электровзрыве титановой фольги с бором новых мелкодисперсных высокопрочных фаз – TiB_2 , W_2C , (Ti, W)C. Новые образующиеся фазы содержат бор и позволяют эксплуатировать твердые сплавы длительное время при повышенных температурах [17 – 19].

Ниже располагается упрочненный поверхностный слой толщиной 10 – 15 мкм, плавно переходящий в основу без образования микротрещин. В этом слое кристаллизуются карбиды вольфрама W_2C и WC с уменьшенными (3 – 4 мкм) размерами по сравнению с исходными (5 – 7 мкм). Причиной кристаллизации карбидов W_2C в данной зоне является недостаток углерода, который был востребован для образования карбида (Ti, W)C. Нанотвердость этого слоя составляет 17 000 МПа. Эта зона затрагивает еще изменения кобальтовой фазы, которые связаны с дополнительным ее легированием химическими элементами, входящими в состав взрывааемых материалов и основы. Кобальтовая фаза представляет собой пересыщенный твердый раствор, дополнительно легированный вольфрамом, углеродом, титаном, бором. В дальнейшем этот раствор распадается и насыщает цементирующую связку мелкодисперсными карбидами вольфрама. Увеличение

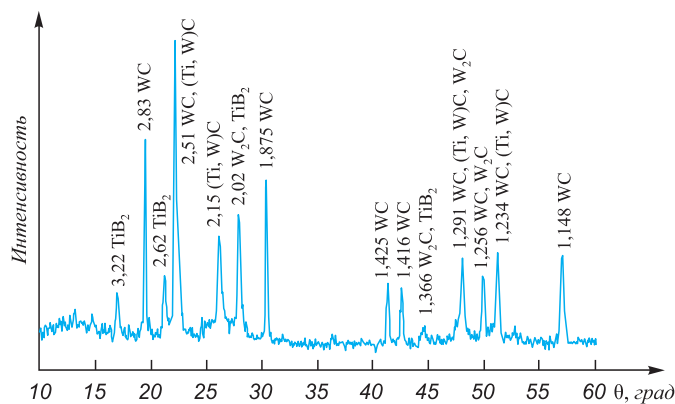


Рис. 2. Фрагмент дифрактограммы сплава BK10KS после электровзрывного легирования титаном с бором

Fig. 2. A fragment of the diffraction pattern of VK10KS alloy after electroexplosive alloying with titanium and boron

степени легирования кобальтовой связующей приведет к стабилизации ГЦК решетки (β -Co), уменьшению разницы в коэффициентах термического расширения WC и Co-фазы, снижению напряженного состояния в кобальтовой фазе и повышению температуры разупрочнения, что положительно повлияет на эксплуатационную стойкость вольфрамокобальтовых твердых сплавов в целом [19]. В работе [17] показано, что при борировании твердого сплава WC – 20 % Co помимо формирования на поверхности сплава соединений, содержащих бор, большое количество активных атомов бора диффундирует в Co-фазу и приводит к образованию соединения $W_2Co_{21}B_6$.

Просвечивающей электронной микроскопией выявлены изменения, возникающие в поверхностной карбидной и приповерхностной кобальтовой фазах при электровзрывном легировании. В карбидной фазе обнаружены как единичные дислокации, так и ячеистая дислокационная структура (рис. 3, а), что приводит к наклепу зерен карбида вольфрама WC.

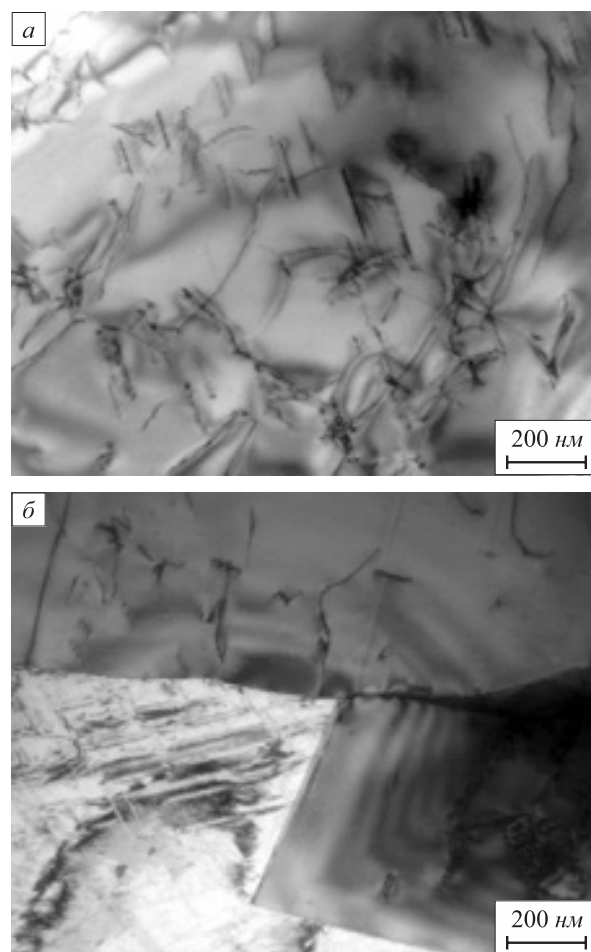


Рис. 3. Структура сплава BK10KS после электровзрывной обработки титаном с бором:

а – поверхность; б – на расстоянии 10 мкм от поверхности

Fig. 3. Structure of VK10KS alloy after electroexplosive treatment with titanium and boron:

а – surface; б – at a distance of 10 μm from the surface

В кобальтовой связующей выявлены деформационные полосы (полосы скольжения), единичные дислокации, а также мелкодисперсные выделения карбидов вольфрама (рис. 3, б). Указанное изменение можно объяснить стабилизацией кубической модификации кобальта, кристаллическая решетка которого обладает большим числом плоскостей скольжения при деформации и большей способностью к упрочнению по сравнению с гексагональной модификацией кобальта [20].

Механизм формирования упрочненного слоя на сплаве ВК10КС, образованного при электровзрывном легировании титаном с бором в высокоэнергетическом режиме, состоит в следующем: при обработке происходит расплавление поверхностного слоя твердого сплава, насыщение этого слоя продуктами взрыва, интенсивное перемешивание под действием плазменной струи, дальнейшее ускоренное охлаждение и кристаллизация расплавленного слоя. В результате на поверхности кристаллизуется слой, состоящий из борида титана TiB_2 и легированного карбида титана $(Ti, W)C$. Эти фазы имеют большую (3230 и 3257 °С) температуру плавления, а также более низкую (4,52 и 4,92 г/см³) плотность соответственно, чем карбиды вольфрама, поэтому кристаллизуются в первую очередь на поверхности твердого сплава. В этом же слое кристаллизуются карбиды W_2C и WC . Под этим слоем располагаются карбиды вольфрама W_2C и WC с уменьшенными (3–4 мкм) размерами по сравнению с исходными (5–7 мкм). Причиной кристаллизации карбида W_2C в данной зоне является недостаток углерода, который был востребован для образования карбида $(Ti, W)C$. Глубже располагается зона, в которой наблюдаются изменения только кобальтовой фазы, связанные с дополнительным ее легированием. Данная зона плавно переходит в основной материал (исходное состояние) твердого сплава.

Трибологические испытания образцов после электровзрывного легирования выявили, что глубина треков

износа спеченных образцов ВК10КС составляет в среднем 58 мкм, а после импульсной обработки титаном с бором 2,42 мкм. Площадь трека у спеченных образцов составляет 12 921 мкм², а после электровзрывного легирования титаном с бором – 155 мкм² (рис. 4).

Коэффициент трения (μ) на стадии приработки исходных образцов в спеченном состоянии составляет 0,41, а обработанных ЭВЛ титаном с бором 0,10.

Очевидно, что незначительный износ упрочненных образцов связан с образованием на поверхности твердого сплава ВК10КС карбидов типа $(Ti, W)C$, B_4C , карбида вольфрама W_2C , а также боридов W_2B_5 , $(Co_{1,25}W_{1,75})B_2$ и борида титана TiB_2 с высокими значениями твердости.

Профилометрические исследования показали, что после обработки ЭВЛ титаном с бором шероховатость увеличивается ($Ra = 2,00$ мкм) по сравнению с исходной ($Ra = 1,32$ мкм), но остается в пределах технических требований ($Ra = 2,50$ мкм). Такое повышение шероховатости можно объяснить формированием покрытия, образованного конденсированными частицами продуктов взрыва титановой фольги, которые, располагаясь в тылу струи, достигают облучаемой поверхности уже на стадии ее кристаллизации, при конденсации на поверхности отдельных капель продуктов взрыва фольги они растекаются по ней и формируют новый рельеф [14].

Выводы

Установлено, что модифицирование поверхности твердого сплава ВК10КС титаном совместно с бором способом ЭВЛ формирует упрочненный слой толщиной 2,0–2,5 мкм с нанотвердостью 27 500 МПа, состоящий из мелкодисперсных высокотвердых фаз TiB_2 , $(Ti, W)C$, W_2C . Ниже располагается упрочненный (с нанотвердостью 17 000 МПа) приповерхностный слой (зона

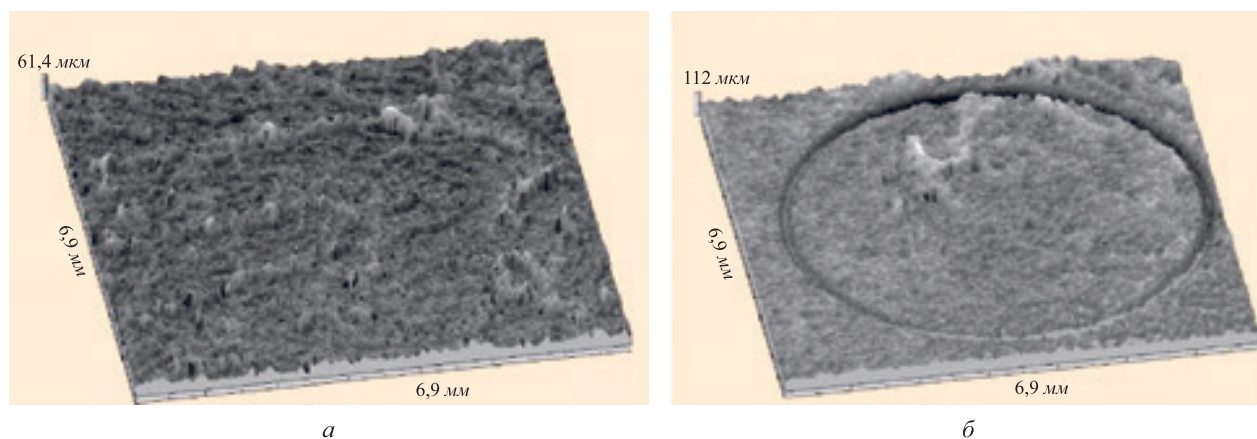


Рис. 4. Внешний вид треков при трибологических испытаниях:
а – сплав ВК10КС после обработки; б – исходный сплав

Fig. 4. Appearance of tracks during tribological tests:
а – VK10KS alloy after treatment; б – initial alloy

термического влияния) толщиной 10 – 15 мкм, идентифицированный карбидами W_2C и WC и легированный кобальтовой связующей. Этот слой плавно переходит в основу. С увеличением поверхностной твердости возрастает износостойкость и уменьшается коэффициент трения до 0,1 (в исходном спеченном состоянии коэффициент трения составляет 0,41).

Исследованиями выявлены изменения, возникающие в поверхностной карбидной и приповерхностной кобальтовой фазах при электровзрывном легировании. В карбидной фазе выявлены скопления дислокаций. Помимо дополнительного легирования в кобальтовой связующей элементами взрывааемых проводников и основного материала выявлены выделения из пересыщенного кобальтового твердого раствора карбидов вольфрама, выявлены деформационные полосы (полосы скольжения), единичные дислокации. Дополнительное легирование кобальтовой связующей положительно повлияет на эксплуатационную стойкость вольфрамокобальтовых твердых сплавов в целом из-за своей стабилизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Верещака А.С., Верещака А.А. Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 9. С. 9 – 18.
2. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 2008. – 311 с.
3. Liu Y., Vid Q., Li Y. Synthesis and tribological behavior of electrodeless Ni-P-WC nanocomposite coatings // Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 201. No. 16-17. P. 7246 – 7251.
4. Oskolkova T.N. Wear resistant coating on hard alloy // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 788. P. 281 – 285.
5. Veprek S., Veprek-Hejman M.G.J., Kavrankova P., Prohazka J. Different approaches to superhard coatings and nanocomposition // Thin Solid Films. 2005. Vol. 476. P. 1 – 29.
6. Ramkumar J., Aravindan S., Malhotra S.K., Krishnamurthy R. Enhancing the metallurgical properties of WC insert (K-20) cutting tool through microwave treatment // Material Letters. 2002. Vol. 53. No. 3. P. 200 – 204.
7. Осколкова Т.Н., Глезер А.М. Современное состояние научной проблемы поверхностного упрочнения карбидовольфрамовых твердых сплавов (обзор) // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 12. С. 980 – 991.
8. Тюрин Ю.Н., Кульков С.Н., Колисниченко О.В. Импульсно-плазменное модифицирование поверхности изделия из сплава $WC + 20\% Co$ // Физ. инженерия поверхности. 2009. Т. 7. № 3. С. 262 – 267.
9. Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В., Игнатюк В.Д. Термическая обработка неперетачиваемых пластин из твердого сплава T15K6 непрерывным лазерным излучением // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 1 (169). С. 26 – 30.
10. Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В. Исследование влияния температурных полей нагрева при непрерывной лазерной обработке на эксплуатационные свойства пластин твердого сплава T15K6 // Изв. вуз. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2018. № 2. С. 76 – 84.
11. Tyurin Yu.N., Kul'kov S.N., Kolisnichenko O.V. Improving the wear resistance of hard-alloy rolling disk by pulsed-plasma treatment // Steel in Translation. 2009. Vol. 39. No. 10. P. 948 – 951.
12. Kozakov A.T., Yaresko S.I. Using auger electron spectroscopy for studying the composition of the surface of multicomponent alloys under the effect of pulsed laser irradiation // Inorganic Materials: Applied Research. 2011. Vol. 2. No. 3. P. 254 – 260.
13. Oskolkova T.N., Glezer A.M. Wear-Resistant Coatings on WC-Co Hard Alloys Synthesized by Concentrated Energy Flows // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10. No. 1. P. 146 – 154.
14. 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.
15. Лидин Р.А., Молочко В.А., Андреева Л.Л. Реакции неорганических веществ: справочник. – М.: Дрофа, 2007. – 637 с.
16. Oskolkova T.N., Budovskikh E.A., Goryushkin V.F. Features of structure formation of the surface layer in the course of electro-explosive alloying tungsten carbide hard alloy // Non-Ferrous Metals. 2014. Vol. 55. No. 2. P. 196 – 200.
17. Shourong L., Jianmin H., Liang C., Juntong S. Mechanism of hard-facing alloy's WC-Co boronizing with rare-earth metals // Rare Metal Materials and Engineering. 2003. Vol. 32. No. 4. P. 305 – 308.
18. Хижняк В.Г., Долгих В.Ю., Король В.И. Строение и некоторые свойства диффузионных покрытий титана, ванадия, хрома и бора на твердых сплавах // Научные вести национ. техн. ун-та Украины «Киевский политехнический институт». 2002. № 1. С. 74 – 79.
19. Панов В.С., Чувиллин А.М., Фальковский В.А. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. – М.: МИСиС, 2004. – 464 с.
20. Yaresko S.I. The influence of the composition of cobalt phase of hard alloys on tool wear upon laser hardening // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2009. Vol. 50. No. 5. С. 556 – 562.

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. 5, pp. 351–356.

INFLUENCE OF PULSE-PLASMA MODIFICATION OF VK10KS SOLID ALLOY SURFACE BY TITANIUM AND BORON ON ITS STRUCTURE AND PROPERTIES

T.N. Oskolkova, A.S. Simachev

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. Modification of the surface of VK10KS solid alloy with titanium alongside with boron by the method of pulse-plasma exposure (electro-explosive alloying) is considered. In this case, a superhard (27,500 MPa nanohardness) layer is formed with a thickness of 2.0 – 2.5 μm and

a low ($\mu = 0.10$) friction coefficient compared to the friction coefficient of a hard alloy in the sintered state ($\mu = 0.41$). This layer consists of finely dispersed high-hard phases TiB_2 , $(Ti, W)C$, W_2C (according to scanning, transmission electron microscopy and X-ray phase analysis). Below is a hardened (with a nanohardness of 17,000 MPa) surface layer (heat affected zone) 10 – 15 μm thick, identified by W_2C and WC carbides and alloyed with a cobalt binder. This layer smoothly passes into the base. By profilometric studies it was established that after electroexplosive alloying with titanium and boron, the roughness

increases ($R_a = 2.00 \mu\text{m}$) compared to the initial one ($R_a = 1.32 \mu\text{m}$), but remains within the specifications ($R_a = 2.50 \mu\text{m}$). The authors have revealed changes that occur in the surface carbide and near-surface cobalt phases during electroexplosive alloying. In the carbide phase, accumulations of dislocations were indicated. In the cobalt binder, deformation bands (slip bands), single dislocations, and also finely dispersed tungsten carbide precipitates were found. This change can be explained by stabilization of the cubic modification of cobalt, the crystal lattice of which has a large number of slip planes during deformation and a greater ability to harden compared to the hexagonal modification of cobalt. Additional alloying with a cobalt binder will positively affect the operational stability of tungsten carbide alloys as a whole due to their stabilization.

Keywords: pulse-plasma treatment, hard alloys, nanohardness, wear resistance, exploding conductor, microstructure, cobalt binder.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-351-356

REFERENCES

- Vereshchaka A.S., Vereshchaka A.A. Improvement of the tool effectiveness by controlling the composition, structure and properties of coatings. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2005, no. 9, pp. 9–18. (In Russ.).
- Tabakov V.P. *Formirovanie iznosostoikikh ionno-plazmennyykh pokrytii rezhushchego instrumenta* [Formation of wear-resistant ion-plasma coatings of the cutting tool]. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 311 p. (In Russ.).
- Liu Y., Vid Q., Li Y. Synthesis and tribological behavior of electrodeless Ni-P-WC nanocomposite coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2007, vol. 201, no. 16–17, pp. 7246–7251.
- Oskolkova T.N. Wear resistant coating on hard alloy. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, vol. 788, pp. 281–285.
- Veprek S., Veprek-Hejman M.G.J., Kavrunkova P., Prohazka J. Different approaches to superhard coatings and nanocomposition. *Thin Solid Films*. 2005, vol. 476, pp. 1–29.
- Ramkumar J., Aravindan S., Malhotra S.K., Krishnamurthy R. Enhancing the metallurgical properties of WC insert (K-20) cutting tool through microwave treatment. *Material Letters*. 2002, vol. 53, no. 3, pp. 200–204.
- Oskolkova T.N., Glezer A.M. Current state of the scientific problem of WC-Co hard alloys surface hardening (Review). *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 47, no. 12, pp. 980–991. (In Russ.).
- Tyurin Yu.N., Kul'kov S.N., Kolisnichenko O.V. Pulse-plasma modification of surface of product from WC + 20 % Co alloy. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti*. 2009, vol. 7, no. 3, pp. 262–267. (In Russ.).
- Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V., Ignatyuk V.D. Heat treatment of T15K6 solid carbide non-turning plates by continuous laser radiation. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2019, vol. 15, no. 1 (169), pp. 26–30. (In Russ.).
- Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V. Influence of temperature fields of heating during continuous laser processing on the operational properties of T15K6 alloy plates. *Izv. vuz. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2018, no. 2, pp. 76–84. (In Russ.).
- Tyurin Yu.N., Kul'kov S.N., Kolisnichenko O.V. Improving the wear resistance of hard-alloy rolling disk by pulsed-plasma treatment. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 10, pp. 948–951.
- Kozakov A.T., Yaresko S.I. Using auger electron spectroscopy for studying the composition of the surface of multicomponent alloys under the effect of pulsed laser irradiation. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2011, vol. 2, no. 3, pp. 254–260.
- Oskolkova T.N., Glezer A.M. Wear-resistant coatings on WC-Co hard alloys synthesized by concentrated energy flows. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019, vol. 10, no. 1, pp. 146–154.
- Bagautdinov A.Ya., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. *Fizicheskie osnovy elektrovzryvnogo legirovaniya metallov i splavov* [Physical fundamentals of electric explosive alloying of metals and alloys]. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2007, 301 p. (In Russ.).
- Lidin R.A., Molochko V.A., Andreeva L.L. *Reaktsii neorganicheskikh veshchestv: spravochnik* [Reactions of inorganic substances: Guide]. Moscow: Drofa, 2007, 637 p. (In Russ.).
- Oskolkova T.N., Budovskikh E.A., Goryushkin V.F. Features of structure formation of the surface layer in the course of electroexplosive alloying tungsten carbide hard alloy. *Non-Ferrous Metals*. 2014, vol. 55, no. 2, pp. 196–200.
- Shourong L., Jianmin H., Liangjing C., Junting S. Mechanism of hard-facing alloy's WC-Co boronizing with rare-earth metals. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2003, vol. 32, no. 4, pp. 305–308.
- Khizhnyak V.G., Dolgikh V.Yu., Korol' V.I. Structure and some properties of diffusion coatings of titanium, vanadium, chromium and boron on hard alloys. *Nauchnye vesti natsion. tekhn. un-ta Ukrainy "Kievskii politekhnicheskii institut"*. 2002, no. 1, pp. 74–79. (In Russ.).
- Panov V.S., Chuvilin A.M., Fal'kovskii V.A. *Tekhnologiya i svoystva spechennykh tverdykh splavov i izdelii iz nikh* [Technology and properties of sintered hard alloys and products from them]. Moscow: MISiS, 2004, 464 p. (In Russ.).
- Yaresko S.I. The influence of the composition of cobalt phase of hard alloys on tool wear upon laser hardening. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2009, vol. 50, no. 5, pp. 556–562.

Acknowledgements. The authors are grateful to Budovskikh E.A. Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Science named after V.M. Finkel for the opportunity to conduct an experiment.

Information about the authors:

T.N. Oskolkova, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair «Metal Forming and Metal Science. EVRAZ ZSMK» (osolkova@kuz.ru)
A.S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair «Metal Forming and Metal Science. EVRAZ ZSMK», Deputy Director of the Center for Collective Use «Materials Science» (simachev_as@mail.ru)

Received January 21, 2020

Revised March 2, 2020

Accepted March 10, 2020

УДК 538.911

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРОЦЕСС КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НИКЕЛЯ В ОБЛАСТИ ТРОЙНОГО СТЫКА ГРАНИЦ ЗЕРЕН: МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Зоря И.В.¹, к.т.н., доцент, директор архитектурно-строительного института (zorya.i@mail.ru)

Полетаев Г.М.², д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой высшей математики
и математического моделирования (gmpoletaev@mail.ru)

Старостенков М.Д.², д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики (genphys@mail.ru)

Ракитин Р.Ю.³, к.ф.-м.н., доцент, директор колледжа (rakitinry@email.asu.ru)

Коханенко Д.В.⁴, к.ф.-м.н., доцент (DVKohanenko@fa.ru)

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

² Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
(656038, Россия, Алтайский край, Барнаул, пр. Ленина, 46)

³ Алтайский государственный университет
(656049, Россия, Алтайский край, Барнаул, пр. Ленина, 61)

⁴ Финансовый университет при Правительстве РФ
(125993, Россия, Москва, пр. Ленинградский, 49)

Аннотация. Методом молекулярной динамики проведено исследование влияния примесей легких элементов (углерода, азота и кислорода) на процесс кристаллизации в области тройного стыка границ зерен в никеле. В качестве границ зерен рассматривались границы наклона с осью разориентации $\langle 111 \rangle$. Расчетная ячейка имела форму цилиндра, ось которого совпадала с линией тройного стыка и осью разориентации зерен. Вдоль оси цилиндра были наложены периодические граничные условия, атомы на боковой поверхности цилиндра были неподвижны. Для моделирования кристаллизации расчетная ячейка плавилась путем нагревания до температуры, значительно превышающей температуру плавления никеля. После того как моделируемый поликристалл становился жидким, включался термостат и проводилось выдерживание при постоянной температуре ниже температуры плавления. Жесткие граничные условия на боковой поверхности цилиндрической расчетной ячейки имитировали в данном случае фронты кристаллизации от трех центров кристаллизации. Область вблизи тройного стыка кристаллизовалась в последнюю очередь. В этой области концентрировались дефекты и свободный объем. Наличие примесей приводило к существенному замедлению скорости кристаллизации. При введении 10 % примесных атомов скорость движения фронта кристаллизации падала в несколько раз. Влияние примесей на скорость кристаллизации усиливалось в направлении C–N–O, что связано с отличием деформации кристаллической решетки, которую вызывают примесные атомы: чем больше эта деформация, тем сильнее примесные атомы тормозят фронт кристаллизации. Для примесных атомов углерода характерным было образование агрегатов при достаточно высоких концентрациях. Фронт кристаллизации задерживался на данных агрегатах. Атомы кислорода и азота не образовывали агрегатов, тем не менее вследствие вызываемых ими искажений кристаллической решетки также сильно тормозили фронт кристаллизации.

Ключевые слова: молекулярная динамика, металл, примесь, тройной стык, кристаллизация, свободный объем.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-357-363

ВВЕДЕНИЕ

Тройной стык зерен представляет собой линейный дефект, вдоль которого сопрягаются три различно ориентированных зерна или три зернограницных поверхности. Согласно экспериментальным данным диффузия в области тройного стыка границ зерен протекает значительно интенсивнее, чем вдоль самих границ [1 – 6]. Вклад тройных стыков в диффузию возрастает по мере уменьшения среднего размера зерен в материале [6 – 8]. Кроме того, тройные стыки играют важную роль в процессах, связанных с пластической деформацией, генерацией дислокаций, рекристаллиза-

цией [9]. Тройной стык зачастую характеризуется относительно более «рыхлой» структурой (даже с включениями аморфной фазы [10]), то есть с более высоким содержанием свободного объема по сравнению с образующими этот стык границами зерен [6, 11, 12].

Ранее в работе [13] показано, что тройные стыки, содержащие избыточный свободный объем, образуются преимущественно в процессе кристаллизации в результате «запирания» плотности жидкой фазы при встрече трех фронтов кристаллизации и, как следствие, концентрирования избыточного свободного объема в тройном стыке после затвердевания. Свободный объем в тройных стыках играет важную роль не только в процессе

диффузии [4, 6, 14], но и в процессах их миграции [15], деформации с их участием [16].

Взаимодействие примесных атомов легких элементов с металлами имеет большой научный и технологический интерес. Атомы углерода, азота, кислорода даже при небольших концентрациях существенно влияют на свойства металлов, что, в первую очередь, обусловлено их взаимодействием с дефектами кристаллической решетки [17, 18]. Несмотря на важность понимания механизмов и процессов, лежащих в основе влияния легирования примесями легких элементов на свойства металлов, в настоящее время остается много вопросов, касающихся поведения примесей на атомном уровне в металлической матрице.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния примесных атомов углерода, азота и кислорода на процесс кристаллизации в области тройных стыков границ наклона в ГЦК металлах на примере никеля.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Тройной стык границ наклона создавали в центре расчетной ячейки путем сопряжения трех зерен, разориентированных относительно друг друга с помощью поворота вокруг оси $\langle 111 \rangle$, параллельной линии тройного стыка. Начальные углы между границами в стыке задавали 120° . В течение молекулярно-динамического эксперимента границы могли мигрировать и углы между границами в итоге могли отличаться от 120° . После

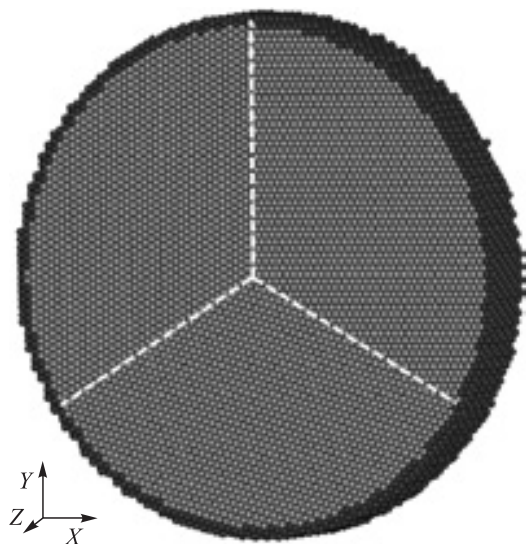


Рис. 1. Пример цилиндрической расчетной ячейки, содержащей тройной стык границ наклона $\langle 111 \rangle$ с углами разориентации 15, 15 и 30° (границы зерен обозначены белыми штриховыми линиями; темно-серые атомы в процессе моделирования оставались неподвижными (жесткие граничные условия))

Fig. 1. An example of cylindrical computational cell containing triple interface of tilt grain boundaries $\langle 111 \rangle$ with misorientation angles of 15, 15, and 30° (grain boundaries are indicated by white dashed lines; dark gray atoms remained steady during the simulation (hard boundary constraints))

вырезания сегментов (рис. 1) проводили сопряжение зерен, при котором удаляли атомы, находящиеся от соседнего атома на расстоянии менее 0,05 нм. Заключительным этапом являлось вырезание конечной расчетной ячейки в форме цилиндра. На границы расчетной ячейки вдоль оси наклона всех зерен (то есть вдоль линии тройного стыка) налагали периодические граничные условия (имитировалось бесконечное повторение цилиндрической расчетной ячейки вдоль оси Z). На боковую поверхность цилиндра были наложены жесткие условия: атомы вблизи боковой поверхности в процессе компьютерного эксперимента оставались неподвижными (на рис. 1 жестко закрепленные атомы показаны темно-серым цветом). Размер расчетной ячейки подбирали достаточно большим, чтобы избежать влияния жестких граничных условий на краю ячейки. Радиус цилиндрической ячейки был равен 17,5 нм, длина – 2,5 нм. Количество атомов составляло примерно 55 000.

Взаимодействия атомов никеля друг с другом описывались многочастичным потенциалом Клери-Розато [19], построенным в рамках модели сильной связи. Потенциальная энергия i -го атома в этом случае находится по выражению

$$U_i = \sum_j A \exp \left[-p \left(\frac{r_{ij}}{r_0} - 1 \right) \right] - \sqrt{\sum_j \xi^2 \exp \left[-2q \left(\frac{r_{ij}}{r_0} - 1 \right) \right]}, \quad (1)$$

где A, p, q, ξ, r_0 – параметры потенциала; r_{ij} – расстояние между i -м и j -м атомами.

Параметры потенциалов Клери-Розато были взяты из работы [19].

Для описания взаимодействий атомов примесей легких элементов с атомами никеля и атомов примесей друг с другом использовали парные потенциалы Морзе [20]:

$$\varphi(r_{ij}) = D\beta e^{-\alpha r_{ij}} \left(\beta e^{-\alpha r_{ij}} - 2 \right), \quad (2)$$

где α, β, D – параметры потенциала.

Оба потенциала хорошо зарекомендовали себя в ряде расчетов, выполненных методом молекулярной динамики [21, 22]. Параметры потенциалов для описания взаимодействий примесных атомов углерода, азота и кислорода с атомами никеля были взяты из работы [20], где они были найдены с учетом эмпирических зависимостей и известных характеристик, таких как температура плавления или разложения соответствующего химического соединения металла с легким элементом, энергия активации диффузии примесного атома в кристаллической решетке металла. Для описания взаимодействий атомов примеси друг с другом в металлах в работе [20] за основу были взяты потенциалы,

предложенные другими авторами. Для связи С–С парный потенциал из работы [23] был трансформирован в потенциал Морзе. Для связей N–N и O–O были взяты потенциалы из работ [24, 25]. Радиус действия всех потенциалов ограничивался пятью координационными сферами. Параметры потенциалов Морзе для описания взаимодействий атомов углерода и кислорода с атомами металла и друг с другом [20] приведены ниже:

Связь	α , Å ⁻¹	β	D , эВ
Ni–C	2,63598	200	0,200
Ni–N	3,03257	370	0,300
Ni–O	2,71735	170	0,600
C–C	2,62351	190	0,650
N–N	1,55580	700	0,001
O–O	1,26829	500	0,001

Шаг интегрирования по времени в методе молекулярной динамики составлял 1 фс. Температуру в модели задавали через начальные скорости атомов согласно распределению Максвелла, при этом учитывали тепловое расширение металла. Для сохранения температуры постоянной в процессе моделирования использовали термостат Нозе-Гувера.

Для моделирования кристаллизации расчетная ячейка плавилась путем нагревания до температуры, значительно превышающей температуру плавления никеля. После того, как моделируемый поликристалл становился жидким, включали термостат и выдерживали при постоянной температуре ниже температуры плав-

ления, как правило, при $0,7T_{пл}$ (где $T_{пл}$ – температура плавления). Жесткие граничные условия (т.е. жестко закрепленные атомы на боковой поверхности цилиндрической расчетной ячейки – темно-серые на рис. 1) имитировали в этом случае фронты кристаллизации от трех центров кристаллизации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Скорость движения фронта кристаллизации на порядок ниже скорости звука, в связи с чем большинство дефектов формируется при кристаллизации в последнюю очередь – в местах сопряжения кристаллов с разной ориентацией, то есть на границах зерен и тройных стыках. На рис. 2 представлены изображения расчетной ячейки никеля в процессе кристаллизации в разные моменты времени. Как можно видеть, область вблизи тройного стыка кристаллизуется в последнюю очередь. В этой области происходит концентрирование дефектов и свободного объема [13].

Примесные атомы легких элементов вводили на этапе жидкого состояния расчетной ячейки. На рис. 3 изображены примеры распределения примесных атомов углерода и кислорода в области тройного стыка границ наклона $\langle 111 \rangle$ 15, 15 и 30° в никеле после моделирования кристаллизации при температуре 1200 К. Введение примесей приводило к существенному замедлению скорости кристаллизации. Примесные атомы углерода формируют в процессе кристаллизации агрегаты (рис. 3, а), некоторые из которых закрепляются на границах зерен и являются стопорами для

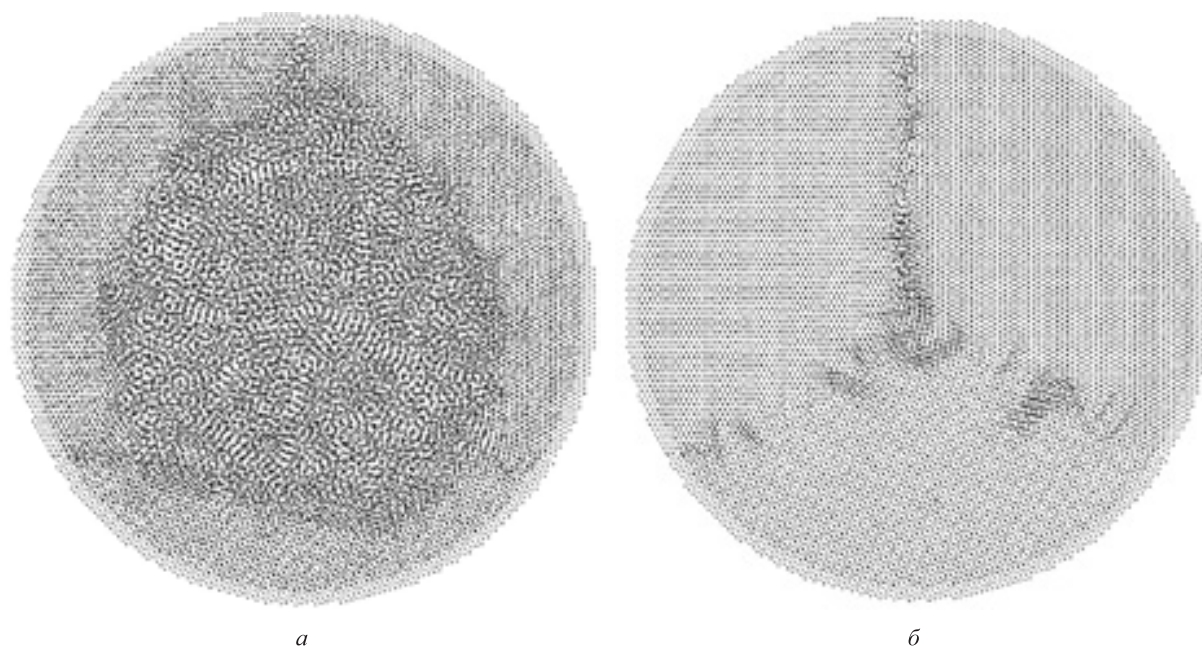


Рис. 2. Кристаллизация чистого никеля в области тройного стыка границ наклона $\langle 111 \rangle$ 15, 15 и 30° при температуре 1200 К после 10 пс (а) и после 40 пс и последующего охлаждения (б)

Fig. 2. Crystallization of pure nickel in the area of triple interface of the tilt grain boundaries $\langle 111 \rangle$ of 15, 15, and 30° at a temperature of 1200 K after 10 ps (a) and after 40 ps and subsequent cooling (b)

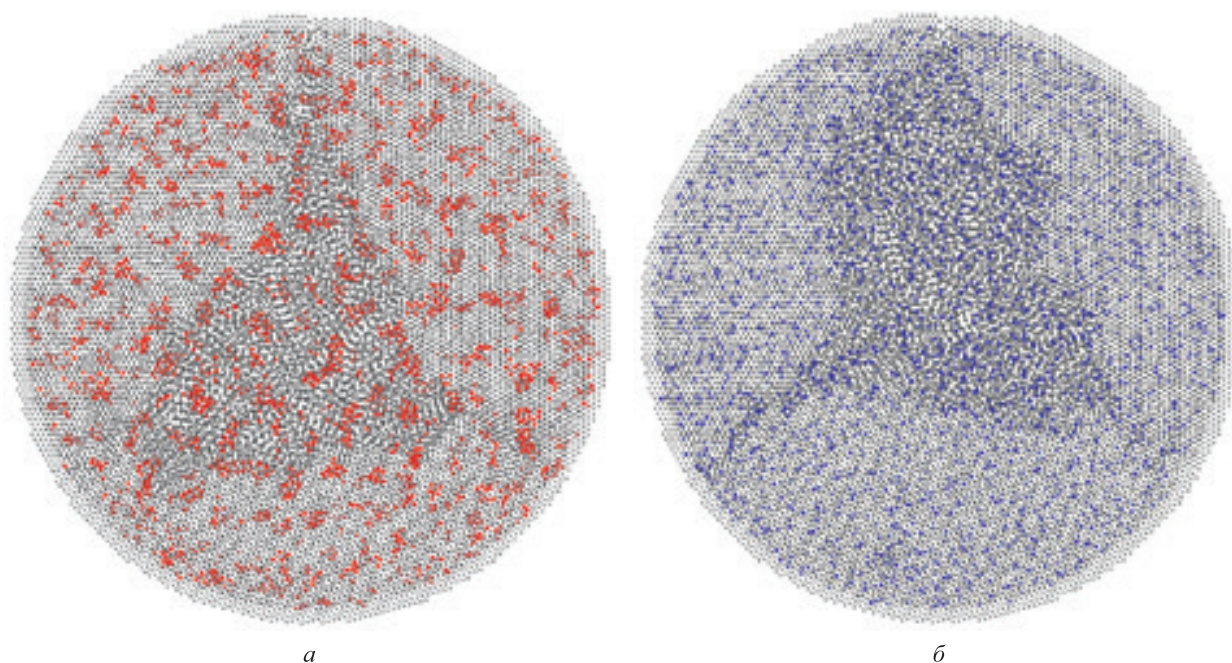


Рис. 3. Распределение примесных атомов углерода (красные атомы) (а) и кислорода (синие атомы) (б) при концентрации 10 % в области тройного стыка в никеле после моделирования кристаллизации при температуре 1200 К в течение 75 пс (а) и 200 пс (б)

Fig. 3. Distribution of carbon (red atoms) (a) and oxygen impurity atoms (blue atoms) (b) at concentration of 10 % in the area of triple interface in nickel after crystallization modeling at temperature of 1200 K for 75 ps (a) and 200 ps (b)

границ, определяя структуру тройного стыка. В случае примеси кислорода область тройного стыка остается аморфной даже после моделирования в течение 200 пс (рис. 3, б), что в несколько раз больше обычного времени кристаллизации всей расчетной ячейки в отсутствии примесей.

Следует отметить особенности кристаллизации при содержании в металлах различных примесей. Для углерода характерным было образование агрегатов при достаточно высоких концентрациях примесных атомов. Фронт кристаллизации задерживался на данных агрегатах (рис. 3, а). Атомы кислорода и азота не образовывали агрегатов, тем не менее, вследствие вызываемых ими искажений кристаллической решетки также сильно тормозили фронт кристаллизации.

На рис. 4 изображены зависимости средней скорости v движения фронта кристаллизации в рассматриваемой модели при температуре 1200 К от концентрации примесных атомов. Как видно, введение примесных атомов существенно снижает скорость кристаллизации, при введении 10 % атомов углерода и кислорода скорость движения фронта кристаллизации падает в несколько раз: в три раза для углерода и в 9 – 10 раз для кислорода.

Механизм торможения кристаллизации примесными атомами заключается во внесении ими разупорядочивающего эффекта при образовании атомной структуры. Положение примесных атомов в кристаллической решетке металла не является идеальным и согласующимся с положениями соседних потенциальных

ям в кристалле, которые занимают атомы. Напротив, примесные атомы вызывают локальную деформацию, искажение кристаллической решетки. Введение примесного атома в кристалл металла приводит к смещению соседних атомов. При этом наибольшие смещения атомов никеля вблизи примеси, находящейся в октаэдрической поре ГЦК решетки металла, в работе [20] наблюдали как раз для атомов кислорода.

В работе [26] предложена формула для расчета скорости движения фронта кристаллизации в металле:

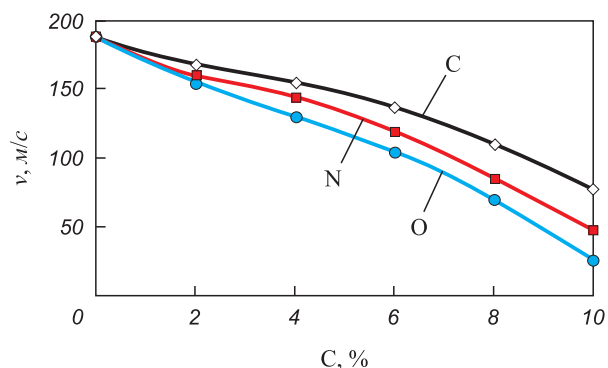


Рис. 4. Зависимости средней скорости движения фронта кристаллизации при кристаллизации в области тройного стыка в никеле при температуре 1200 К от концентрации примесных атомов углерода (C), азота (N) и кислорода (O)

Fig. 4. Dependence of average velocity of crystallization front during crystallization in the area of triple interface in nickel at temperature of 1200 K on concentration of impurity atoms of carbon (C), nitrogen (N), and oxygen (O)

$$v(T) = A \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta\mu}{kT}\right)\right], \quad (3)$$

где A – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации миграции атома в жидкой фазе; k – постоянная Больцмана; T – температура; m – масса атома; $\Delta\mu$ – разность свободной энергии металла, находящегося в жидком и кристаллическом состояниях, приходящейся на один атом.

С ростом концентрации примесных атомов в металле средние значения E и $\Delta\mu$, очевидно, будут изменяться: энергия активации E из-за относительно крепких связей примесных атомов с атомами металла будет повышаться, а величина $\Delta\mu$ из-за разупорядочивающего эффекта примесей – снижаться. И то, и другое приводит, согласно формуле (3), к снижению скорости движения фронта кристаллизации.

Выводы

Методом молекулярной динамики проведено исследование процесса кристаллизации в области тройного стыка границ зерен наклона в никеле в условиях наличия примесных атомов углерода, азота и кислорода. Область вблизи тройного стыка кристаллизуется в последнюю очередь. В этой области происходит концентрирование дефектов и свободного объема. Показано, что наличие примесей приводит к существенному замедлению скорости кристаллизации. При введении 10 % примесных атомов скорость движения фронта кристаллизации падает в несколько раз. Влияние примесей на скорость кристаллизации усиливается в направлении C–N–O, что связано с отличием деформации кристаллической решетки, которую вызывают примесные атомы: чем больше эта деформация, тем сильнее примесные атомы тормозят фронт кристаллизации. Для примесных атомов углерода характерным является образование агрегатов при достаточно высоких концентрациях. Фронт кристаллизации задерживается на этих агрегатах. Атомы кислорода и азота не образовывали агрегатов, тем не менее, вследствие вызываемых ими искажений кристаллической решетки также сильно тормозят фронт кристаллизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Palumbo G., Aust K.T. A coincident axial direction (CAD) approach to the structure of triple junctions in polycrystalline materials // *Scripta Metallurgica et Materialia*. 1990. Vol. 24. No. 9. P. 1771 – 1776.
2. Bokstein B., Ivanov V., Oreshina O., Peteline A., Peteline S. Direct experimental observation of accelerated Zn diffusion along triple junctions in Al // *Materials Science and Engineering: A*. 2001. Vol. 302. No. 1. P. 151 – 153.
3. Bokstein B.S., Rodin A.O., Straumal B.B. Diffusion controlled grain triple junctions wetting in metals // *Defect and Diffusion Forum*. 2011. Vol. 309-310. P. 231 – 238.
4. Wegner M., Leuthold J., Peterlechner M., Song X., Divinski S.V., Wilde G. Grain boundary and triple junction diffusion in nanocrystalline copper // *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 116. P. 093514-1 – 093514-7.
5. Beke D.L., Lakatos A., Erdelyi G., Makovecz A., Langer G.A., Daroczy L., Vad K., Csik A. Investigation of grain boundary diffusion in thin films by SNMS technique // *Defect and Diffusion Forum*. 2011. Vol. 312-315. P. 1208 – 1215.
6. Fedorov A.A., Gutkin M.Yu., Ovid'ko I.A. Triple junction diffusion and plastic flow in fine-grained materials // *Scripta Materialia*. 2002. Vol. 47. P. 51 – 55.
7. Гусев А.И. Эффекты нанокристаллического состояния в компактных металлах и соединениях // *Успехи физических наук*. 1998. Т. 168. № 1. С. 55 – 83.
8. Li M., Xu T. Topological and atomic scale characterization of grain boundary networks in polycrystalline and nanocrystalline materials // *Progress in Materials Science*. 2011. Vol. 56. No. 6. P. 864 – 899.
9. Гуткин М.Ю., Овидько И.А. Предел текучести и пластическая деформация нанокристаллических материалов // *Успехи механики*. 2003. № 1. С. 68 – 125.
10. Rodriguez P., Sundararaman D., Divakar R., Raghunathan V.S. Structure of grain boundaries in nanocrystalline and quasicrystalline materials // *Chemistry for Sustainable Development*. 2000. Vol. 8. P. 69 – 72.
11. Schaefer H.-E., Wurschum R., Birringer R., Gleiter H. Structure of nanometer-sized polycrystalline iron investigated by positron lifetime spectroscopy // *Physical Review B*. 1988. Vol. 38. No. 14-15. Article 9545.
12. Muktepavela F., Bakradze G., Sursaeva V. Micromechanical properties of grain boundaries and triple junctions in polycrystalline metal exhibiting grain-boundary sliding at 293 K // *Journal of Materials Science*. 2008. Vol. 43. P. 3848 – 3854.
13. Poletaev G.M., Novoselova D.V., Zorya I.V., Starostenkov M.D. Formation of the excess free volume in triple junctions during nickel crystallization // *Physics of the Solid State*. 2018. Vol. 60. No. 5. P. 847 – 851.
14. Psakhie S.G., Zolnikov K.P., Kryzhevich D.S., Korchuganov A.V. Key role of excess atomic volume in structural rearrangements at the front of moving partial dislocations in copper nanocrystals // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. P. 3867-1 – 3867-6.
15. Poletaev G., Zorya I., Rakitin R. Molecular dynamics study of migration mechanism of triple junctions of tilt boundaries in FCC metals // *Computational Materials Science*. 2018. Vol. 148. P. 184 – 189.
16. Козлов Э.В., Конева Н.А., Попова Н.А. Зеренная структура, геометрически необходимые дислокации и частицы вторых фаз в поликристаллах микро- и мезоуровня // *Физическая мезомеханика*. 2009. Т. 12. № 4. С. 93 – 106.
17. Гольдшмидт Х.Дж. Сплавы внедрения. – М.: Мир, 1971. – 424 с.
18. Toth L.E. Transition metal carbides and nitrides. – New York: Academic Press, 1971. – 276 p.
19. Cleri F., Rosato V. Tight-binding potentials for transition metals and alloys // *Physical Review B*. 1993. Vol. 48. No. 1. P. 22 – 33.
20. Poletaev G.M., Zorya I.V., Rakitin R.Y., Iliina M.A. Interatomic potentials for describing impurity atoms of light elements in FCC metals // *Materials Physics and Mechanics*. 2019. Vol. 42. No. 4. P. 380 – 388.
21. Poletaev G.M., Zorya I.V., Novoselova D.V., Starostenkov M.D. Molecular dynamics simulation of hydrogen atom diffusion in crystal lattice of fcc metals // *International Journal of Materials Research*. 2017. Vol. 108. No. 10. P. 785 – 790.
22. Poletaev G.M., Zorya I.V., Starostenkov M.D., Rakitin R.Yu., Tabakov P.Ya. Molecular dynamics simulation of the migration of tilt grain boundaries in Ni and Ni3Al // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2019. Vol. 128. No. 1. P. 88 – 93.
23. Ruda M., Farkas D., Garcia G. Atomistic simulations in the Fe–C system // *Computational Materials Science*. 2009. Vol. 45. No. 2. P. 550 – 560.

24. Vashishta P., Kalia R.K., Nakano A., Rino J.P. Interaction potentials for alumina and molecular dynamics simulations of amorphous and liquid alumina // *Journal of Applied Physics*. 2008. Vol. 103. No. 8. P. 083504.
25. San Miguel M.A., Sanz J.F. Molecular-dynamics simulations of liquid aluminum oxide // *Physical Review B*. 1998. Vol. 58. P. 2369 – 2371.

26. Chan W.-L., Averback R.S., Cahill D.G., Ashkenazy Y. Solidification velocities in deeply undercooled silver // *Physical Review Letters*. 2009. Vol. 102. No. 9. Article 095701.

Поступила в редакцию 15 декабря 2019 г.

После доработки 27 января 2020 г.

Принята к публикации 28 января 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 5, pp. 357–363.

EFFECT OF LIGHT ELEMENTS IMPURITY ON PROCESS OF NICKEL CRYSTALLIZATION NEAR THE TRIPLE INTERFACE OF GRAIN BOUNDARIES: A MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION

I.V. Zorya¹, G.M. Poletaev², M.D. Starostenkov², R.Yu. Rakitin³, D.V. Kokhanenko⁴

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

²Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Altai Territory, Russia

³Altai State University, Barnaul, Altai Territory, Russia

⁴Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

Abstract. Molecular dynamics method was used to study the effect of impurities of light elements of carbon, nitrogen and oxygen on crystallization process near the triple interface of grain boundaries in nickel. Tilt boundaries with misorientation axis $\langle 111 \rangle$ were considered as the grain boundaries. Interactions of nickel atoms with each other were described by many-particle Clery-Rosato potential constructed within the framework of the tight binding model. To describe interactions of atoms of light elements impurities with nickel atoms and atoms of impurities with each other, Morse pair potentials were used. Calculation cell had a shape of cylinder, axis of which coincided with the line of triple interface and the axis of grain misorientation. Periodic boundary conditions were imposed along the cylinder axis, and the atoms on side surface of cylinder were motionless. To simulate crystallization, calculation cell was melted by heating to a temperature well above the melting temperature of nickel. After the simulated polycrystal become liquid, the thermostat was turned on and held at a constant temperature below the melting temperature. Rigid boundary conditions on the lateral surface of cylindrical calculation cell in this case simulated crystallization fronts from three crystallization centers. The area near the triple interface had crystallized the last. In this area, defects and free volume were concentrated. Presence of impurities led to a significant slowdown in the rate of crystallization. With introduction of 10 % of impurity atoms, the rate of motion of crystallization front decreased several times. The effect of impurities on crystallization rate was enhanced in C–N–O direction, which is due to difference in crystal lattice deformation caused by impurity atoms. The greater this deformation was, the stronger was impurity atoms inhibit crystallization front. Formation of aggregates at fairly high concentrations was typical for impurity carbon atoms. Crystallization front had impeded on these aggregates. The oxygen and nitrogen atoms did not form aggregates. However, due to distortions of crystal lattice caused by them, they also strongly slowed down the crystallization front.

Keywords: molecular dynamics, metal, impurity, triple interface, crystallization, free volume.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-357-363

REFERENCES

1. Palumbo G., Aust K.T. A coincident axial direction (CAD) approach to the structure of triple junctions in polycrystalline materials. *Scripta Metallurgica et Materialia*. 1990, vol. 24, no. 9, pp. 1771–1776.

2. Bokstein B., Ivanov V., Oreshina O., Peteline A., Peteline S. Direct experimental observation of accelerated Zn diffusion along triple junctions in Al. *Materials Science and Engineering: A*. 2001, vol. 302, no. 1, pp. 151–153.
3. Bokstein B.S., Rodin A.O., Straumal B.B. Diffusion controlled grain triple junctions wetting in metals. *Defect and Diffusion Forum*. 2011, vol. 309-310, pp. 231–238.
4. Wegner M., Leuthold J., Peterlechner M., Song X., Divinski S.V., Wilde G. Grain boundary and triple junction diffusion in nanocrystalline copper. *Journal of Applied Physics*. 2014, vol. 116, pp. 093514-1–093514-7.
5. Beke D.L., Lakatos A., Erdelyi G., Makovecz A., Langer G.A., Daroczi L., Vad K., Csik A. Investigation of grain boundary diffusion in thin films by SNMS technique. *Defect and Diffusion Forum*. 2011, vol. 312-315, pp. 1208–1215.
6. Fedorov A.A., Gutkin M.Yu., Ovid'ko I.A. Triple junction diffusion and plastic flow in fine-grained materials. *Scripta Materialia*. 2002, vol. 47, pp. 51–55.
7. Gusev A.I. Effects of the nanocrystalline state in solids. *Physico-Uspekhi*. 1998, vol. 41, no. 1, pp. 49–76.
8. Li M., Xu T. Topological and atomic scale characterization of grain boundary networks in polycrystalline and nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*. 2011, vol. 56, no. 6, pp. 864–899.
9. Gutkin M.Yu., Ovid'ko I.A. Yield strength and plastic deformation of nanocrystalline materials. *Uspekhi mekhaniki*. 2003, no. 1, pp. 68–125. (In Russ.).
10. Rodriguez P., Sundararaman D., Divakar R., Raghunathan V.S. Structure of grain boundaries in nanocrystalline and quasicrystalline materials. *Chemistry for Sustainable Development*. 2000, vol. 8, pp. 69–72.
11. Schaefer H.-E., Wurschum R., Birringer R., Gleiter H. Structure of nanometer-sized polycrystalline iron investigated by positron lifetime spectroscopy. *Physical Review B*. 1988, vol. 38, no. 14-15, article 9545.
12. Muktepavela F., Bakradze G., Sursaeva V. Micromechanical properties of grain boundaries and triple junctions in polycrystalline metal exhibiting grain-boundary sliding at 293 K. *Journal of Materials Science*. 2008, vol. 43, pp. 3848–3854.
13. Poletaev G.M., Novoselova D.V., Zorya I.V., Starostenkov M.D. Formation of the excess free volume in triple junctions during nickel crystallization. *Physics of the Solid State*. 2018, vol. 60, no. 5, pp. 847–851.
14. Psakhie S.G., Zolnikov K.P., Kryzhevich D.S., Korchuganov A.V. Key role of excess atomic volume in structural rearrangements at the front of moving partial dislocations in copper nanocrystals. *Scientific Reports*. 2019, vol. 9, pp. 3867-1–3867-6.
15. Poletaev G., Zorya I., Rakitin R. Molecular dynamics study of migration mechanism of triple junctions of tilt boundaries in FCC metals. *Computational Materials Science*. 2018, vol. 148, pp. 184–189.
16. Kozlov E.V., Koneva N.A., Popova N.A. Grain structure, geometrically necessary dislocations and second-phase particles in polycrystals of micro- and mesolevels. *Physical Mesomechanics*. 2009, vol. 12, no. 5-6, pp. 280-292.

17. Goldschmidt H.J. *Interstitial alloys*. London: Butterworth-Heinemann, 1967, 640 p. (Russ. ed.: Goldschmidt H.J. *Splavy vnedreniya*. Moscow: Mir, 1971, 424 p.).
18. Toth L.E. *Transition metal carbides and nitrides*. New York: Academic Press, 1971, 276 p.
19. Cleri F., Rosato V. Tight-binding potentials for transition metals and alloys. *Physical Review B*. 1993, vol. 48, no. 1, pp. 22–33.
20. Poletaev G.M., Zorya I.V., Rakitin R.Y., Iliina M.A. Interatomic potentials for describing impurity atoms of light elements in FCC metals. *Materials Physics and Mechanics*. 2019, vol. 42, no. 4, pp. 380–388.
21. Poletaev G.M., Zorya I.V., Novoselova D.V., Starostenkov M.D. Molecular dynamics simulation of hydrogen atom diffusion in crystal lattice of fcc metals. *International Journal of Materials Research*. 2017, vol. 108, no. 10, pp. 785–790.
22. Poletaev G.M., Zorya I.V., Starostenkov M.D., Rakitin R.Yu., Tabakov P.Ya. Molecular dynamics simulation of the migration of tilt grain boundaries in Ni and Ni3Al. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2019, vol. 128, no. 1, pp. 88–93.
23. Ruda M., Farkas D., Garcia G. Atomistic simulations in the Fe–C system. *Computational Materials Science*. 2009, vol. 45, no. 2, pp. 550–560.
24. Vashishta P., Kalia R.K., Nakano A., Rino J.P. Interaction potentials for alumina and molecular dynamics simulations of amorphous and liquid alumina. *Journal of Applied Physics*. 2008, vol. 103, no. 8, pp. 083504.
25. San Miguel M.A., Sanz J.F. Molecular-dynamics simulations of liquid aluminum oxide. *Physical Review B*. 1998, vol. 58, pp. 2369–2371.
26. Chan W.-L., Averbach R.S., Cahill D.G., Ashkenazy Y. Solidification velocities in deeply undercooled silver. *Physical Review Letters*. 2009, vol. 102, no. 9, article 095701.

Information about the authors:

I.V. Zorya, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Director the Institute of Architecture and Construction (zorya.i@mail.ru)

G.M. Poletaev, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of Advanced Mathematics and Mathematical Modeling (gmpoletaev@mail.ru)

M.D. Starostenkov, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of Physics (genphys@mail.ru)

R.Yu. Rakitin, Cand. Sci. (Phys.-math.), Assist. Professor, Director of College (rakitinry@email.asu.ru)

D.V. Kokhanenko, Cand. Sci. (Phys.-math.), Assist. Professor (DVKokhanenko@fa.ru)

Received December 15, 2019

Revised January 27, 2020

Accepted January 28, 2020

МЕТОД И ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССОВ ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В АГРЕГАТЕ СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОГО ТИПА

*Рыбенко И.А.¹, д.т.н., профессор кафедры прикладных информационных технологий
и программирования (rybenkoi@mail.ru)*

Роос Ханс-Гёрг², д.т.н., профессор математики (hans-goerg.roos@tu-dresden.de)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(6540007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Технический университет Дрездена
(MommSENstraße13, 01069 Dresden, Sachsen, Deutschland)

Аннотация. Представлены метод и инструментальная система моделирования и оптимизации технологических режимов процессов прямого восстановления металлов в агрегате струйно-эмульсионного типа. Рассмотрены этапы метода: постановка задачи (формирование целевых условий, выбор типа процесса, вида задачи и системы критериев оптимизации); выделение объекта исследования (задание параметров входных-выходных потоков, процесса, стадий и подпроцессов); термодинамическое моделирование для оценки конечного равновесного состояния (решается задача оптимизации по определению наилучших условий реализации процессов восстановления металлов из оксидов в модельных системах и разработка металлургической технологии путем нахождения оптимальных режимов и определения путей достижения этих режимов для заданных параметров выходного потока и процесса при оптимизации технико-экономических показателей). В рамках четвертого этапа разработан комплекс математических моделей, отражающих взаимосвязь потоков и процессов в металлургическом агрегате. Представлена структура инструментальной системы, в которой реализованы математические модели и алгоритм определения оптимальных технологических режимов металлургической технологии. Разработан комплекс критериев оптимизации. Приведена схема решения двухконтурной задачи оптимизации для решения оптимизационных задач: нахождение оптимальных условий протекания восстановительных процессов в термодинамических системах; определение оптимальных режимов технологий прямого восстановления металлов. Показано применение метода для разработки оптимальных технологических режимов процессов прямого получения металла в агрегате типа СЭР: получение металла из чугуна и прокатной окалины, прямое восстановление металла из пылевидных руд и железосодержащих техногенных материалов, получение марганцевых сплавов из карбонатных и оксидных руд, переработка титано-магнетитовых концентратов с практически полным разделением железо- и титансодержащей составляющих, прямое восстановления железа с попутным получением высококалорийного синтез-газа в агрегате струйно-эмульсионного типа.

Ключевые слова: метод, инструментальная система, математическое моделирование, прямое восстановление металлов, технологический режим.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-364-372

ВВЕДЕНИЕ

Металлургия является одной из ресурсоемких отраслей промышленности. Необходимость снижения энерго- и материалоемкости металлургической продукции требует как совершенствования традиционных схем производства чугуна и стали, так и создания новых металлургических процессов и агрегатов, обеспечивающих прямое получение металлов. За последние 10 лет в мире построено и введено в эксплуатацию, а также находится в стадии проектирования и разработки более 100 установок прямого восстановления [1 – 5]. С точки зрения энергоэффективности наиболее перспективными являются процессы в струйно-эмульсионных системах, для которых характерны высокие скорости физико-химических превращений и большие поверхности взаимодействия фаз. К таким процессам относится не-

прерывный металлургический процесс струйно-эмульсионного типа (СЭР), характеризующийся низкими себестоимостью, энергоемкостью и высокой экологичностью, обладающий универсальностью, позволяющий реализовать в одном агрегате различные технологии.

Принципы создания и теоретические основы процесса и агрегата СЭР подробно изложены в работе [6]. В этом процессе высокая степень диспергации шихты позволяет создавать газозвесь или эмульсию, для описания состояния которой с достаточной степенью приближения выполняются основные допущения классической термодинамики. Благодаря созданию вынужденного движения рабочей смеси в замкнутой системе, имеется возможность поддерживать процесс в стационарном режиме, а струйно-эмульсионный агрегат рассматривать как реактор текущего равновесия, для математического описания которого допустимо ис-

пользование фундаментальных законов термодинамики, позволяющих решать две важные для металлургии группы задач: составление энергетических балансов и определение характеристик равновесного состояния.

В настоящее время существует более 100 программ, реализующих расчеты термодинамического равновесия, однако они имеют узкую область применения, могут быть использованы только для конкретного типа задач в определенной области знаний и не позволяют решать оптимизационные задачи [7 – 16]. Поэтому при совершенствовании существующих и разработке новых ресурсосберегающих металлургических технологий прямого восстановления металлов необходимо решить комплекс задач, направленных на создание средств повышения эффективности исследований (математических моделей, метода и инструментальной системы

моделирования и оптимизации, методик исследования), которые позволят определить оптимальные условия реализации процессов восстановления металлов в модельных системах, оптимальные режимы технологий в агрегате струйно-эмульсионного типа, технологий прямого легирования металла с использованием оксидных материалов и других.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ

Для решения этих задач разработан метод, особенностью которого является решение ряда оптимизационных задач по определению наилучших условий их реализации и путей достижения этих условий. Метод включает ряд этапов (рис. 1) [17].



Рис. 1. Этапы, задачи и результаты метода моделирования и оптимизации

Fig. 1. Stages, tasks and results of the method of modeling and optimization

На первом этапе в результате определения цели и постановки задачи формируют целевые условия, включающие выбор типа процесса, вида задачи и системы критериев оптимизации.

На втором этапе выделения объекта исследования осуществляют задание параметров входных-выходных потоков, параметров процесса и описание стадий и подпроцессов.

На третьем этапе с использованием методов термодинамического моделирования выделяют области протекания окислительно-восстановительных процессов, проводят оценку конечного равновесного состояния, решают задачу оптимизации по определению наилучших условий реализации процессов восстановления металлов из оксидов в модельных системах, а также проводят лабораторные эксперименты. Для решения этих задач предложен метод термодинамического моделирования, основанный на поиске принципа максимума энтропии, и разработана методика, включающая следующие этапы: выделение областей протекания окислительных и восстановительных процессов; определение условий (диапазона температур, расходных показателей, составов газовой фазы) осуществления моделируемого процесса; формирование параметров входного потока, обеспечивающих достижение необходимых условий реализации процесса и оптимизацию параметров входного потока и системы при заданных условиях осуществления процесса.

Для характеристики свойств термодинамической системы в рамках третьего этапа метода разработан комплекс показателей, отражающих окислительно-восстановительный потенциал не только расплава, но и объемлющей системы, в том числе газовой фазы рабочего пространства агрегата:

– окислительный потенциал $\alpha = m/k$ газовой фазы, определяемый как отношение количества газообразного кислорода m к количеству k углерода в веществах газовой фазы;

– окислительный потенциал $\alpha^* = \frac{m}{n+k}$ системы – отношение количества газообразного кислорода к общему количеству углерода в системе;

– восстановительный потенциал Z газовой фазы – отношение суммы концентраций оксида углерода CO и водорода H_2 к суммарному содержанию соединений $\{CO\}$, $\{H_2\}$, $\{CO_2\}$, $\{H_2O\}$ в газовой фазе:

$$Z = \frac{\{CO\} + \{H_2\}}{\{CO\} + \{H_2\} + \{CO_2\} + \{H_2O\}} 100 \%;$$

– показатель $\gamma = \frac{m+p}{n+k}$, характеризующий окислительный потенциал системы и учитывающий количество кислорода в оксидах; здесь m , k , n и p – количество

газообразного кислорода, углерода в веществах газовой фазы, конденсированного углерода и кислорода в оксидах, моль.

В качестве инструмента при выполнении вычислительных экспериментов на этапе термодинамического моделирования выбран программный комплекс Терра, созданный в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана [18], а также модифицированная версия предыдущего варианта (Авто-Астра) программы Терра, позволяющая осуществлять уникальные расчеты по определению условий реализации процессов, в частности, равновесных температур, что открыло дополнительные возможности при проектировании новых технологий.

Термодинамическое моделирование реализовано для модельных систем с использованием метода векторной оптимизации – исследования пространства параметров объекта, заключающегося в нахождении допустимой реализуемой области в результате многовариантных расчетов равновесных составов конечного состояния системы, анализе результатов и выборе оптимального варианта.

По результатам термодинамического моделирования формируют исходные данные для реализации четвертого этапа, в рамках которого разработан комплекс математических моделей для описания взаимосвязи параметров входных-выходных потоков и физико-химических процессов в металлургическом агрегате.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Математические модели включают расчеты материального и теплового балансов, определение термодинамических функций и параметров веществ, химических реакций, а также активностей компонентов фаз.

Уравнения материального баланса разработаны на основе закона сохранения масс относительно составляющих гетерогенной системы. Получены уравнения для баланса масс потоков, веществ и элементов.

Уравнение материального баланса входных-выходных потоков имеет вид:

$$\sum_{k=1}^{K^f} G_k^f + \sum_{k=1}^{K^r} G_k^r = \sum_{l=1}^{L^f} G_l^f + G^r, \quad (1)$$

где K^f , K^r и G_k^f , G_k^r – количество и массовый расход конденсированных, газообразных входных потоков соответственно; L^f – количество конденсированных выходных потоков; G_l^f и G^r – массовый выход l -го конденсированного и газообразного выходных потоков.

Баланс на уровне потоков веществ представлен уравнением:

$$\sum_{k=1}^{K^f} \sum_{m=1}^{N_k^f} \frac{G_k^f |R_m|_k}{100} + \sum_{k=1}^{K^r} \sum_{m=1}^{N_k^r} \frac{G_k^r \{R_m\}_k}{100} = \sum_{l=1}^{L^f} \sum_{n=1}^{N_l^f} \frac{G_l^f |R_n|_l}{100} + \sum_{n=1}^{N^r} \frac{G^r \{R_n\}}{100}, \quad (2)$$

где N_k^f и N_k^r – количество веществ в k -ом конденсированном и газообразном входных потоках; $|R_m|_k$ и $\{R_m\}_k$ – содержание R_m вещества в k -ом конденсированном и газообразном входных потоках, %; N_l^f и N^r – количество веществ в l -ом конденсированном и газообразном выходных потоках; $|R_n|_l$ и $\{R_n\}$ – содержание R_n вещества в l -ом конденсированном и газообразном выходных потоках, %.

Уравнения баланса по каждому элементу E_i , который может присутствовать в разных фазах в виде различных соединений, выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{K^f} \sum_{m=1}^{N_k^{E_i^f}} \frac{G_k^f |E_{ix_m} E_{jy_m}|_k}{100} \frac{x_m M_{E_i}}{M_{E_{ix_m} E_{jy_m}}} + \\ & + \sum_{k=1}^{K^r} \sum_{m=1}^{N_k^{E_i^r}} \frac{G_k^r \{E_{ix_m} E_{jy_m}\}_k}{100} \frac{x_m M_{E_i}}{M_{E_{ix_m} E_{jy_m}}} = \\ & = \sum_{l=1}^{L^f} \sum_{n=1}^{N_l^{E_i^f}} \frac{G_l^f |E_{ix_n} E_{jy_n}|_l}{100} \frac{x_n M_{E_i}}{M_{E_{ix_n} E_{jy_n}}} + \\ & + \sum_{n=1}^{N^{E_i^r}} \frac{G^r \{E_{ix_n} E_{jy_n}\}_l}{100} \frac{x_n M_{E_i}}{M_{E_{ix_n} E_{jy_n}}}, \quad (3) \end{aligned}$$

где $|E_{ix_m} E_{jy_m}|_k$, $\{E_{ix_m} E_{jy_m}\}_k$ – концентрация m -го вещества, содержащего элемент E_i в k -ом конденсированном или газообразном входном потоке, %; $|E_{ix_n} E_{jy_n}|_l$, $\{E_{ix_n} E_{jy_n}\}_l$ – концентрация n -го вещества, содержащего элемент E_i в l -ом конденсированном или газообразном выходном потоке, %; $N_k^{E_i^f}$ и $N_k^{E_i^r}$ – количество веществ, содержащих элемент E_i в k -ом конденсированном и газообразном входном потоке; $N_l^{E_i^f}$ и $N_l^{E_i^r}$ – количество веществ, содержащих элемент E_i в l -ом конденсированном и газообразном выходном потоке; x_m, y_m и x_n, y_n – стехиометрические коэффициенты m -го и n -го соединений элемента E_i ; M_{E_i} , $M_{E_{ix_m} E_{jy_m}}$, $M_{E_{ix_n} E_{jy_n}}$ – молярные массы элемента E_i и его соединений, кг/моль.

Основными определяющими процессами для теплового состояния являются приток и отток тепла через входные и выходные материальные потоки, теплообмен с окружающей средой и химические реакции с соответствующими тепловыми эффектами:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{K^f} G_k^f \Delta H_k^f + \sum_{k=1}^{K^r} G_k^r \Delta H_k^r + Q_{\text{ист}} = \\ & = \sum_{l=1}^{L^f} G_l^f \Delta H_l^f + G^r \Delta H^r + \sum \Delta H_{x.p} + Q_{\text{пот}}, \quad (4) \end{aligned}$$

где ΔH_k^f , ΔH_k^r , ΔH_l^f , ΔH^r – изменение удельных энтальпий входных-выходных потоков при нагреве от 298 К до температуры T , кДж/кг; $Q_{\text{ист}}$ – приход тепла внешних источников, кДж; $Q_{\text{пот}}$ – тепловые потери в окружающую среду, кДж; $\sum \Delta H_{x.p}$ – суммарный тепловой эффект независимых реакций перехода системы из начального состояния в конечное, кДж.

Уравнение (4) можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{K^f} \sum_{m=1}^{N_k^f} \left(\Delta H_T^\circ \right)_m \frac{G_k^f |R_m|_k}{100 M_{R_m}} + \\ & + \sum_{k=1}^{K^r} \sum_{m=1}^{N_k^r} \left(\Delta H_T^\circ \right)_m \frac{G_k^r \{R_m\}_k}{100 M_{R_m}} + Q_{\text{ист}} = \\ & = \sum_{l=1}^{L^f} G_l^f \Delta H_l^f + G^r \Delta H^r + \\ & + \sum_{w=1}^W \Delta H_w^\circ \left(\sum_{k=1}^K \frac{G_k R_{kw}}{100} - \sum_{l=1}^L \frac{G_l R_{lw}}{100} \right) + Q_{\text{пот}}, \quad (5) \end{aligned}$$

где W – число независимых реакций в системе; $\left(\Delta H_T^\circ \right)_m$ и $\left(\Delta H_T^\circ \right)_n$ – изменение удельных энтальпий веществ R_m и R_n при нагреве от 298 К до заданной температуры T с учетом фазовых переходов, кДж/моль; ΔH_w° – тепловой эффект w -ой химической реакции, кДж/моль.

Используемые в моделях термодинамические функции веществ и химических реакций рассчитываются при любой температуре в диапазоне температур от 298 до 6000 К с учетом фазовых переходов на основе справочных данных. При определении активностей компонентов шлака предусмотрена возможность использования следующих моделей строения фаз: теории коллективизированных электронов А.Г. Пономаренко и теории регулярных ионных растворов В.А. Кожеурова. Для расчета активностей компонентов металла используют теорию К. Вагнера.

СОЗДАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ «ИНЖИНИРИНГ – МЕТАЛЛУРГИЯ»

Математические модели реализованы в инструментальной системе «Инжиниринг – Металлургия», разработанной средствами MS Excel и Delphi, путем осуществления связей и математических расчетов между элементами совокупности таблиц и применения встроенного программного сервиса Solver. Модель представляет собой комплекс программ и

баз данных, адаптированных для ряда металлургических технологий [19]. Инструментальная система состоит из блоков, позволяющих в интерактивном режиме вводить исходные данные по расходам, температуре, химическому составу материалов и технологическим параметрам процесса, рассчитывать все стадии и подпроцессы, материальный и тепловой балансы, определять энтальпии входных-выходных потоков, рассчитывать активности компонентов фаз, термодинамические характеристики химических реакций и технико-экономические показатели процесса.

Для разработанных программ созданы следующие базы данных: «Химический состав материалов», «Термодинамические свойства индивидуальных веществ», «Параметры взаимодействия первого порядка», «Атомные параметры», «Термодинамические характеристики реакций фазовых переходов и растворения элементов», «Удельные энергоёмкости». Для согласования и передачи данных в другие модули системы разработаны соответствующие интерфейсы. С использованием инструментальной системы можно проводить исследования путем реализации многовариантных расчетов с представлением информации в удобном для пользователя виде, решать прямую и обратную задачи, строить зависимости различных показателей от требуемых параметров и решать оптимизационные задачи по различным критериям.

В рамках четвертого этапа с использованием инструментальной системы осуществляют разработку металлургической технологии путем нахождения оптимальных режимов и определения путей достижения этих режимов для заданных параметров выходного потока и процесса при оптимизации технико-экономических показателей.

Определение оптимальных технологических режимов проводят по следующему алгоритму. После формирования исходных данных рассчитывают все стадии и подпроцессы для заданного варианта технологии: горение топлива, выделение и горение летучих компонентов, испарение влаги, разложение карбонатов, окислительно-восстановительные процессы, шлакообразование. Осуществляют расчет материального баланса процесса на уровне потоков, веществ и элементов, а также определяют массы и химический состав продуктов (металла, шлака, газа). Проводят термодинамический анализ независимых химических реакций перехода системы из начального состояния в конечное. Определяют энтальпии входных и выходных потоков и изменение энтальпии системы в результате протекания химических реакций, после чего рассчитывают тепловой баланс и определяют температуры металла, шлака и газа. Рассчитывают технико-экономические показатели, решают задачу оптимизации по формальным критериям.

РЕШЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

Постановка оптимизационной задачи заключается в определении управляющих воздействий на процесс путем поиска экстремума требуемого критерия при соблюдении системы ограничений. В качестве критериев могут быть выбраны следующие показатели:

– суммарный расход шихтовых материалов на единицу продукции, кг/т:

$$P = \sum_{k=1}^K g_k = \frac{\sum_{k=1}^K G_k}{G_{\text{прод}}} 1000 \rightarrow \min, \quad (6)$$

– затраты на единицу продукции, руб/т:

$$C = \frac{\sum_{k=1}^K G_k \Pi_k}{G_{\text{прод}}} \rightarrow \min, \quad (7)$$

– энергозатраты на единицу продукции, ГДж/т:

$$\Theta = \frac{\sum_{k=1}^K G_k \Theta_k}{G_{\text{прод}}} \rightarrow \min, \quad (8)$$

– производительность агрегата:

$$\Pi = G_m = \sum_{n=1}^{N_m} G_{[R_n]}^{\text{вых}} \rightarrow \max, \quad (9)$$

где g_k – удельный расход k -го материала, кг/т; G_k – расход k -го материала, кг; $G_{\text{прод}}$ – выход продукта, кг; Π_k – цена k -го материала входного потока, руб/т; Θ_k – удельная энергоёмкость k -го материала, ГДж/т; G_m – масса металла, кг; N_m – количество компонентов металла; $G_{[R_n]}^{\text{вых}}$ – масса n -го компонента металла, кг.

Решение задачи оптимизации заключается в определении экстремума одного из вышеперечисленных критериев при соблюдении следующих ограничений.

1. Ограничения на диапазоны изменения расходов компонентов входных потоков:

$$G_{k_{\min}} < G_k < G_{k_{\max}}. \quad (10)$$

2. Ограничения на параметры выходных потоков:

$$R_{n_{\min}} < R_n < R_{n_{\max}}; \\ T_{\min} < T < T_{\max}. \quad (11)$$

3. Соблюдение закона сохранения массы на уровне потоков, веществ и элементов:

$$\sum_{k=1}^{K^f} G_k^f + \sum_{k=1}^{K^r} G_k^r = \sum_{l=1}^{L^f} G_l^f + G^r; \quad (12.1)$$

$$\sum_{k=1}^{K^f} \sum_{m=1}^{N_k^f} \frac{G_k^f |R_m|_k}{100} + \sum_{k=1}^{K^r} \sum_{m=1}^{N_k^r} \frac{G_k^r \{R_m\}_k}{100} =$$

$$= \sum_{l=1}^{L^f} \sum_{n=1}^{N_l^f} \frac{G_l^f |R_n|_l}{100} + \sum_{n=1}^{N^r} \frac{G^r \{R_n\}}{100}; \quad (12.2)$$

$$\sum_{k=1}^{K^f} \sum_{m=1}^{N_k^{E_i^f}} \frac{G_k^f |E_{ix_m} E_{jy_m}|_k}{100} \frac{x_m M_{E_i}}{M_{E_{ix_m} E_{jy_m}}} +$$

$$+ \sum_{k=1}^{K^r} \sum_{m=1}^{N_k^{E_i^r}} \frac{G_k^r \{E_{ix_m} E_{jy_m}\}_k}{100} \frac{x_m M_{E_i}}{M_{E_{ix_m} E_{jy_m}}} =$$

$$= \sum_{l=1}^{L^f} \sum_{n=1}^{N_l^{E_i^f}} \frac{G_l^f |E_{ix_n} E_{jy_n}|_l}{100} \frac{x_n M_{E_i}}{M_{E_{ix_n} E_{jy_n}}} +$$

$$+ \sum_{n=1}^{N_l^{E_i^r}} \frac{G_l^r \{E_{ix_n} E_{jy_n}\}_l}{100} \frac{x_n M_{E_i}}{M_{E_{ix_n} E_{jy_n}}}; \quad (12.3)$$

4. Соблюдение закона сохранения энергии:

$$\sum_{k=1}^{K^f} \sum_{m=1}^{N_k^f} (\Delta H_T^{\circ})_m \frac{G_k^f |R_m|_k}{100 M_{R_m}} +$$

$$+ \sum_{k=1}^{K^r} \sum_{m=1}^{N_k^r} (\Delta H_T^{\circ})_m \frac{G_k^r \{R_m\}_k}{100 M_{R_m}} + Q_{ист} =$$

$$= \sum_{l=1}^{L^f} G_l^f \Delta H_l^f + G^r \Delta H^r +$$

$$\sum_{w=1}^W \Delta H_w^{\circ} \left(\sum_{k=1}^K \frac{G_k R_{kw}}{100} - \sum_{l=1}^L \frac{G_l R_{lw}}{100} \right) + Q_{пот}. \quad (13)$$

5. Выполнение целевых условий по остальным критериям.

На последнем пятом этапе реализуется апробирование и отладка технологий в промышленных условиях.

При реализации этапов разработанного метода осуществляется двухконтурная оптимизация (рис. 2) путем решения оптимизационных задач двух видов: нахождение оптимальных условий протекания восстановительных процессов в термодинамических системах и определение оптимальных режимов технологий прямого восстановления металлов.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЙ В АГРЕГАТЕ СЭР

С использованием созданных метода и инструментальной системы разработаны оптимальные режимы ряда энерго- и ресурсосберегающих технологий для но-

вого непрерывного металлургического процесса струйно-эмульсионного типа в агрегате СЭР [20]:

- получение металла из чугуна и прокатной окалины с энергоемкостью 21,2 ГДж/т при расходе окалины 6 кг/с и степени дожигания отходящих газов 50 %;

- прямое восстановление металла из пылевидных руд и железосодержащих техногенных материалов без агломерации с энергоемкостью процесса 14 – 16 ГДж/т при степени дожигания отходящих газов от 50 до 70 %;

- получение марганцевых сплавов из карбонатных и оксидных руд, особенностью которого является предварительное восстановление или обжиг руды в агрегате кипящего слоя в потоке технологического газа, отходящего из агрегата СЭР, в результате чего достигается снижение энергоемкости процесса – с 97,6 до 43,1 ГДж/т для оксидной селезеньской марганцевой руды и с 94,1 до 54,6 ГДж/т для карбонатной усинской руды;

- переработка титано-магнетитовых концентратов с практически полным разделением железо- и титансодержащей (с содержанием оксидов титана 46 %) составляющей.

Разработана технология прямого восстановления железа с попутным получением высококалорийного синтез-газа в агрегате струйно-эмульсионного типа, которая в результате совмещения пароугольного газификатора с металлургическим агрегатом позволяет использовать химическую и физическую энергии отходящего технологического газа и дает возможность получения удвоенного количества кондиционного синтез-газа с калорийностью 16 525 кДж/кг, являющегося товарным продуктом для последующей его переработки в моторное топливо.

Выводы

Создан метод системного решения взаимосвязанных задач по определению наилучших условий реализации технологий прямого восстановления металлов, особенностью которого является решение в рамках двухконтурной оптимизации многокритериальных задач двух видов: нахождение оптимальных условий протекания восстановительных процессов в термодинамической системе и определение оптимальных режимов ресурсосберегающих металлургических технологий. В рамках решения задачи определения оптимальных условий протекания процессов в металлургической системе разработана методика термодинамического моделирования и предложены показатели, отражающие окислительно-восстановительный потенциал системы. Разработаны математические модели, осуществляющие взаимосвязь параметров потоков и физико-химических процессов в металлургическом агрегате на основе фундаментальных законов термодинамики и современных теорий строения фаз. Математические модели реализованы в инструментальной системе «Инжиниринг – Металлургия», которая включает комплекс программ и баз

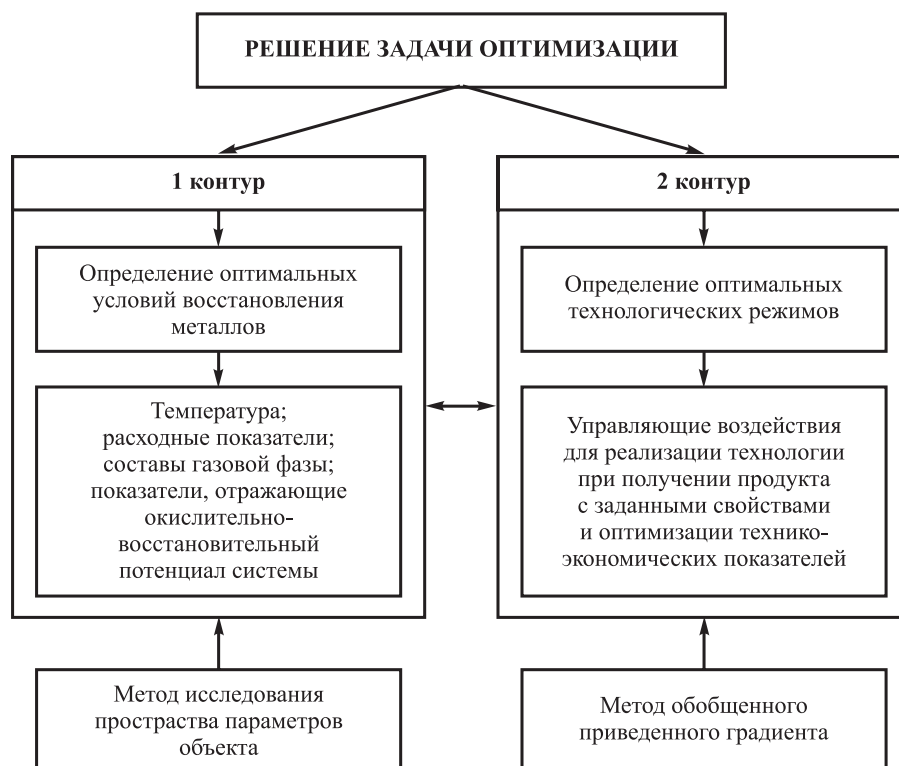


Рис. 2. Схема решения задачи оптимизации

Fig. 2. Scheme for optimization problem solving

данных применительно к решению широкого круга оптимизационных задач ряда металлургических технологий. Разработана методика исследования и расчета оптимальных технологических режимов процессов прямого восстановления металлов с использованием инструментальной системы «Инжиниринг – Металлургия». В инструментальной системе поставлена и решена оптимизационная задача по определению управляющих воздействий на процесс путем поиска экстремума требуемого критерия, в качестве которого могут быть выбраны суммарный расход шихтовых материалов на единицу продукции, себестоимость, энергоемкость или производительность агрегата, при соблюдении ограничений на состав и температуру получаемых продуктов, диапазоны изменения расходов компонентов входных потоков и параметров состояния системы, при соблюдении закона сохранения массы на уровне потоков, веществ и элементов, закона сохранения энергии и выполнении целевых условий по остальным критериям. С использованием инструментальной системы «Инжиниринг – Металлургия» разработаны оптимальные режимы энерго- и ресурсосберегающих технологий для нового непрерывного металлургического процесса струйно-эмульсионного типа в агрегате СЭР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юсфин Ю.С., Гиммельфарб А.А., Пашков Н.Ф. Новые процессы получения металла. – М.: Металлургия, 1994. – 320 с.
2. Лисиенко В.Г., Соловьева Н.В., Трофимова О.Г. Альтернативная металлургия: проблема легирования, модельные оценки эффективности. – М.: Теплотехник, 2007. – 440 с.
3. Процессы преимущественно жидкофазного восстановления железа // Технические науки. Металлургия и обработка металлов. [Электронный ресурс]. URL: <http://knigi.link/obrabotka-metallov-metallurgiya/protsessyi-preimuschestvenno-jidkofaznogo-12575.html>. (дата обращения: 09.04.2020).
4. Князев В.Ф., Гиммельфарб А.И., Неменов А.М. Бескоксовая металлургия железа. – М.: Металлургия, 1972. – 272 с.
5. Роменец В.А. Процесс Ромелт. – М.: ИД «Руда и Металлы», 2005. – 400 с.
6. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, И.А. Рыбенко и др. – М.: Металлургиздат, 2014. – 488 с.
7. Chemical WorkBench. URL: <http://www.kintech.ru/>. (дата обращения: 09.04.2020).
8. NIST-JANAF URL: <http://webbook.nist.gov>. (дата обращения: 09.04.2020).
9. NASA CEA URL: <http://www.lerc.nasa.gov/WWW/CEAWeb/>. (дата обращения: 09.04.2020).
10. MTDATA URL: <http://www.npl.co.uk/npl/cmmt/mtdata/mtdata.htm>. (дата обращения: 09.04.2020).
11. Thermo-Calc. URL: <http://www.thermocalc.se>. (дата обращения: 09.04.2020).
12. MALT2 URL: <http://www.kagaku.com/malt>. (дата обращения: 09.04.2020).
13. HSC Chemistry. URL: <http://www.outokumpu.fi/hsc/>. (дата обращения: 09.04.2020).
14. EQS4WIN. URL: <http://www.mathhtrek.com/>. (дата обращения: 09.04.2020).
15. ThermoChemical Calculator. URL: <http://blue.caltech.edu/tcc/index.html>. (дата обращения: 09.04.2020).
16. F*A*C*T. URL: <http://www.crct.polymtl.ca/fact/fact.htm>. (дата обращения: 09.04.2020).

17. Рыбенко И.А. Развитие теоретических основ и разработка ресурсосберегающих технологий прямого восстановления металлов с использованием метода и инструментальной системы моделирования и оптимизации. Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.16.02. – Новокузнецк, 2018. – 40 с.
18. Рыбенко И.А. Инструментальная система «Инжиниринг – Металлургия» для широкого круга оптимизационных задач. – В кн.: Металлургия: технологии, инновации, качество: тр. XX междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2017. С. 75 – 81.
19. Трусков Б.Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. – В кн.: III междунар. симпозиум «Горение и плазмохимия». 24 – 26 августа 2005. Алматы, Казахстан. – Алматы: изд. Казак университета, 2005. С. 52 – 58.
20. Рыбенко И.А. Разработка оптимальных технологических режимов получения металлов с использованием методов математического моделирования и инструментальных систем // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2018. № 2. С. 57 – 61.

Поступила в редакцию 20 января 2020 г.

После доработки 5 февраля 2020 г.

Принята к публикации 7 февраля 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 5, pp. 364–372.

TECHNOLOGICAL MODES OF METALS DIRECT REDUCTION IN AN AGGREGATE OF JET-EMULSION TYPE

I.A. Rybenko¹, Roos Hans-Görg²

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

² Technische Universität Dresden, Dresden, Sachsen, Germany

Abstract. The paper presents the method and instrumental system for modeling and optimizing technological modes of direct metal reduction processes in a jet-emulsion aggregate (JER). Stages of the method are considered. The first one is the problem statement: formation of target conditions, choice of the process type, the task and system of optimization criteria. The second stage includes selection of the object of study: setting parameters of input and output flows, process parameters, stages and subprocesses. The third one includes thermodynamic modeling to assess the final equilibrium state in which optimization problem is solved to determine the best conditions for implementation of the processes of metal reduction from oxides in model systems. The fourth stage is development of metallurgical technology (finding the optimum modes and ways for achieving these modes by specified output stream parameters). And the final one is process optimization in technical and economic indicators. As part of the fourth stage, the complex of mathematical models has been developed that reflects relationship of flows and processes in a metallurgical unit. The structure of instrumental system is presented, in which mathematical models and an algorithm for determining optimal technological modes are implemented. A set of optimization criteria has been developed and a scheme for solving two types of optimization problems are presented: finding optimal conditions for reduction processes in thermodynamic systems and determining optimal modes of direct metal reduction. Application of the method to develop optimal technological modes of direct metal production in a JER-type aggregate is shown: metal production from cast iron and mill scale; direct reduction of metal from dusty ores and iron-containing man-made materials; obtaining manganese alloys from carbonate and oxide ores; processing titanium-magnetite concentrates with an almost complete separation of iron-containing and titanium-containing component; and direct reduction of iron with associated production of high-calorie synthesis gas.

Keywords: method, instrumental system, mathematical modeling, optimization, direct metal reduction, technological mode.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-364-372

REFERENCES

1. Yusfin Yu.S., Gimmel'farb A.A., Pashkov N.F. *Novye protsessy polucheniya metalla* [New processes of metal production]. Moscow: Metallurgiya, 1994, 320 p. (In Russ.).
2. Lisienko V.G., Solov'eva N.V., Trofimova O.G. *Alternativnaya metallurgiya: problema legirovaniya, model'nye otsenki effektivnosti* [Alternative metallurgy: problem of alloying, model effectiveness evaluation]. Moscow: Teplotekhnika, 2007, 440 p. (In Russ.).
3. Processes of predominantly liquid-phase reduction of iron. *Tekhnicheskie nauki. Metallurgiya i obrabotka metallov* [Technical science. Metallurgy and metal processing]. Available at URL: <http://knigi.link/obrabotka-metallov-metallurgiya/protsessyi-preimushchestvenno-jidkofaznogo-12575.html>. (Accessed: 09.04.2020). (In Russ.).
4. Knyazev V.F., Gimmel'farb A.I., Nemenov A.M. *Beskoksovaya metallurgiya zheleza* [Non-coking metallurgy of iron]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 272 p. (In Russ.).
5. Romanets V.A. *Protsess Romelt* [Romelt process]. Moscow: ID Ruda i Metally, 2005, 400 p. (In Russ.).
6. Tsybal V.P., Mochalov S.P., Rybenko I.A. etc. *Protsess SER – metallurgicheskii struino-emul'sionnyi reaktor* [JER process – metallurgical jet-emulsion reactor]. Moscow: Metallurgizdat, 2014, 488 p. (In Russ.).
7. *Chemical WorkBench*. Available at URL: <http://www.kintech.ru/>. (Accessed: 09.04.2020).
8. *NIST-JANAF*. Available at URL: <http://webbook.nist.gov>. (Accessed: 09.04.2020).
9. *NASA CEA*. Available at URL: <http://www.lerc.nasa.gov/WWW/CEAWeb/>. (Accessed: 09.04.2020).
10. *MTDATA*. Available at URL: <http://www.npl.co.uk/npl/cmmt/mt-data/mtdata.htm>. (Accessed: 09.04.2020).
11. *Thermo-Calc*. Available at URL: <http://www.thermocalc.se>. (Accessed: 09.04.2020).
12. *MALT2*. Available at URL: <http://www.kagaku.com/malt>. (Accessed: 09.04.2020).
13. *HSC Chemistry*. Available at URL: <http://www.outokumpu.fi/hsc/>. (Accessed: 09.04.2020).
14. *EQS4WIN*. Available at URL: <http://www.math.trek.com/>. (Accessed: 09.04.2020).
15. *ThermoChemical Calculator*. Available at URL: <http://blue.caltech.edu/tcc/index.html>. (Accessed: 09.04.2020).
16. *F*A*C*T*. Available at URL: <http://www.crct.polymtl.ca/fact/fact.htm>. (Accessed: 09.04.2020).
17. Rybenko I.A. *Razvitie teoreticheskikh osnov i razrabotka resurso-sberegayushchikh tekhnologii priyamo go vosstanovleniya metallov s ispol'zovaniem metoda i instrumental'noi sistemy modelirovaniya i optimizatsii. Avtoref. dis... dokt. tekhn. nauk* [Development of theoretical foundations and resource-saving technologies for direct reduction of metals using method and instrumental system of modeling and optimization. Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Novokuznetsk, 2018, 40 p. (In Russ.).
18. Rybenko I.A. "Engineering-Metallurgy" instrumental system for a wide range of optimization tasks. In: *Metallurgiya: tekhnologii*,

innovatsii, kachestvo: tr. XX mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Ch. 1. [Metallurgy: technology, innovation, quality: Papers of the XX Int. Sci.-Pract. Conf. Part 1]. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2017, pp. 75–81. (In Russ.).

19. Trusov B.G. TERRA software system for modeling phase and chemical equilibria at high temperatures. In: *III mezhd. simpozium "Gorenie i plazmokhimiya", 24 – 26 avgusta 2005, Almaty, Kazakhstan* [III Int. Symposium "Combustion and Plasma Chemistry". August 24 – 26, 2005, Almaty, Kazakhstan]. Almaty: izd. Kazak universiteti, 2005, pp. 52–58. (In Russ.).
20. Rybenko I.A. Development of optimal technological modes for producing metals using methods of mathematical modeling and instru-

mental systems. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2018, no. 2, pp. 57–61. (In Russ.).

Information about the authors:

I.A. Rybenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Applied Information Technology and Programming (rybenkoi@mail.ru)

Roos Hans-Görg, Ph.D, Professor of Mathematics
hans-goerg.roos@tu-dresden.de)

Received January 20, 2020

Revised February 5, 2020

Accepted February 7, 2020

УДК 519.876.2

ПЛАНИРОВАНИЕ РАЗВЕРТЫВАНИЯ СЕРВИСНЫХ АКТИВОВ, ОСНОВАННОЕ НА ДАННЫХ О ПРИМЕНЕНИИ ИТ-СЕРВИСОВ

Зимин А.В.¹, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем (zimin.0169@yandex.ru)

Золин И.А.¹, магистрант кафедры автоматизации и информационных систем (igorzolin007@yandex.kz)

Буркова И.В.², д.т.н., ведущий научный сотрудник (irbur27@mail.ru)

Зимин В.В.¹, д.т.н., профессор кафедры автоматизации и информационных систем (zimin.1945@mail.ru)

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

² Институт проблем управления РАН
(117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 65)

Аннотация. Развертывание новых сервисных активов в эксплуатационной ИТ-среде связано с риском нарушений активов ее «базового» состояния. Такие нарушения вызывают отказы эксплуатируемых сервисов. Для снижения риска нарушений сервисные активы, подлежащие развертыванию, разбивают на релизы (подмножества сервисных активов), встраиваемые в ИТ-среду за один прием. Традиционный подход к формированию и развертыванию релизов использует сведения о структурных свойствах сервисов для прогнозирования числа отказов, обусловленных развертыванием каждого сервисного актива, каждого релиза, каждой поступившей заявки на развертывание. В результате задача управления развертыванием сервисных активов сводится к последовательному решению трех задач: определение количества релизов, определение состава релизов, построение расписания развертывания релизов. Указанный подход опирается на предположение о том, что некорректное развертывание релизов проявляется через отказы сервисов непосредственно после развертывания. На практике это допущение, как правило, не выполняется, так как применение различных сервисов пользователями, выявляющими отказы сервисов, носит циклический (ежедневный, еженедельный, ежемесячный, ежеквартальный, ежегодный) характер. Многие отказы сервисов могут быть обнаружены пользователями в периоды времени, достаточно удаленные от времени развертывания соответствующих ИТ-активов. Рассмотрен случай, когда процесс управления конфигурациями ИТ-провайдера металлургической компании хорошо развит, то есть конфигурационная база данных ИТ-провайдера содержит информацию о частоте использования различных сервисов в различные периоды времени. Сведения о динамике применения сервисов пользователями используются для прогнозирования временной последовательности отказов эксплуатируемых сервисов, обусловленной развертыванием каждой заявки. В результате задача формирования и календарного планирования развертывания релизов формализована в виде дискретной задачи нелинейного программирования, процедура решения которой позволяет одновременно определять количество релизов, их состав и расписание их развертывания.

Ключевые слова: металлургическая компания, ИТ-сервис, сервисные активы, эксплуатационная ИТ-среда, «базовое» состояние ИТ-среды, заявка на развертывание, проектирование, внедрение, релиз, отказ сервиса, канал обслуживания.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-373-378

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных и сложных задач внедрения ИТ-сервисов является задача развертывания их конфигурационных элементов в эксплуатационной ИТ-среде металлургического комбината, в которой несколько тысяч пользователей эксплуатируют многие сотни ИТ-сервисов [1 – 3]. Развертывание сервисных активов связано с существенным риском нарушения «базового» состояния ИТ-среды, которое может вызвать множественные отказы находящихся в эксплуатации ИТ-сервисов. Эти отказы могут привести к нарушению финансово-хозяйственной деятельности металлургической компа-

нии и вызвать существенные сбои канала обслуживания отказов [4 – 7].

Управлять риском (интенсивностью потока отказов сервисов), обусловленным ошибками развертывания, можно посредством формирования релизов (подмножеств ИТ-активов сервисов, встраиваемых в ИТ-среду за один прием). Релизы формируются на основе заявок на развертывание, направляемых в службу внедрения проектными подразделениями. Один из возможных подходов к решению рассматриваемой задачи изложен в работах [8 – 10]. Он включает, в частности, предположение о том, что некорректное развертывание релизов проявляется через отказы сервисов непосред-

ственно после развертывания. На практике это допущение, как правило, не выполняется, так как применение различных сервисов пользователями, выявляющими отказы сервисов, носит циклический (ежедневный, еженедельный, ежемесячный, ежеквартальный, ежегодный) характер. Многие отказы сервисов могут быть обнаружены пользователями в периоды времени, достаточно удаленные от времени развертывания соответствующих ИТ-активов [8].

В настоящей работе рассмотрен случай, когда процесс управления конфигурациями ИТ-провайдера металлургической компании хорошо развит, а его конфигурационная база данных содержит информацию о частоте использования различных сервисов в различные периоды времени [11 – 14]. Эта информация формируется процессом управления мощностью ИТ-сервисов для управления нагрузкой вычислительной системы [15 – 18]. Кроме того, динамика применения сервисов нужна для присвоения приоритета сервису при его отказе (приоритет задает очередность восстановления сервиса). Целесообразно использовать сведения о динамике применения сервисов пользователями при формулировании и решении задачи формирования и календарного планирования развертывания релизов.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

Обозначим через $A = \{A_i | i = \overline{1, n}\}$ множество заявок на обновление ИТ-среды, где $A_i = \{a_{ij} | j = \overline{1, n_i}\}$ и a_{ij} – обновляемые конфигурационные элементы. Обозначим через $m_i = m(A_i)$ среднее прогнозируемое число отказов сервисов в результате развертывания активов отдельной заявки A_i [19 – 21]. Тогда ожидаемое число $m(A)$ отказов сервисов от всего множества заявок $A = \{A_i | a_{ij} = \overline{1, n_i}\}$ будет определяться соотношением [8]:

$$m(A) = \sum_{i=1}^n m(A_i). \quad (1)$$

Пусть $\{u_r | r = \overline{1, R}\}$ множество пользователей сервисов эксплуатационной среды S , и $S^r = \{s_d^r | d = \overline{1, d^r}, s_d^r \in S\}$, $r = \overline{1, R}$ – роли пользователей (d^r – количество сервисов, применяемых r -ым пользователем). Обозначим через $S^r(a_{ij})$ множество тех сервисов, которые применяет r -ый пользователь и в состав активов которых входит конфигурационный компонент a_{ij} заявки на развертывание A_i . Согласно определению

$$S^r(a_{ij}) = \{s^r(a_{ij}) | s^r(a_{ij}) \in [S(a_{ij}) \cap S^r]\}. \quad (2)$$

Некорректное развертывание актива a_{ij} будет обнаружено в случае, когда хотя бы один из пользователей

обратится к сервису, в числе конфигурационных элементов которого будет этот актив.

Пусть $(0, T)$ – текущий плановый период; $(t^1, t^2, \dots, t^p, \dots, t^{p_T})$ – последовательность, описывающая дни регламентного развертывания релизов в этом периоде; p_T – количество таких развертываний; $\Delta t_p^{p+1} = (t^p, t^{p+1})$ – произвольный интервал времени планового периода. Обозначим через $m_{ip} = m_i(\Delta t_p^{p+1})$ количество ожидаемых отказов сервисов в интервале Δt_p^{p+1} вследствие развертывания активов заявки A_i . Тогда последовательность m_i , описывающая прогнозируемые отказы от заявки A_i на интервале $(0, T)$, будет

$$m_i = (m_{i1}, m_{i2}, m_{i3}, \dots, m_{i(p_T-1)}). \quad (3)$$

Обозначим через $m(\Delta t_p^{p+1})$ число ожидаемых отказов сервисов на интервале времени Δt_p^{p+1} как результат развертывания активов всего множества заявок $A = \{A_i | i = \overline{1, n}\}$:

$$m_p = m(\Delta t_p^{p+1}) = \sum_{i=1}^n m_i(\Delta t_p^{p+1}). \quad (4)$$

Помимо отказов от развертывания заявок множества A в плановом периоде реализуется множество отказов, обусловленных развертыванием релизов, выполненных в периоды времени, предшествующие плановому периоду $(0, T)$, то есть развернутыми в интервале времени (∞, T) . Обозначим через $m^{-0}(\Delta t_p^{p+1})$ количество отказов, обусловленных такими релизами и приходящееся на интервал Δt_p^{p+1} . Тогда

$$(m^{-0}(\Delta t_p^{p+1}) | p = \overline{1, (p_T-1)}) = (m_p^{-0} | p = \overline{1, (p_T-1)}) \quad (5)$$

последовательность, описывающая прогнозируемые количества таких отказов, приходящихся на соответствующие периоды развертывания в плановом периоде $(0, T)$.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ РЕЛИЗОВ

Прогнозируемая динамика отказов сервисов в результате развертывания активов заявок $A_i \in A$ описывается, согласно выражению (5), совокупностью последовательностей

$$\left\{ (m_{i1}, m_{i2}, m_{i3}, \dots, m_{i(p_T-1)}) | i = \overline{1, n} \right\}. \quad (6)$$

Сдвигая эти последовательности на различное число $\eta \leq \eta^*$ временных интервалов Δt вправо (задавая момент времени развертывания соответствующей заявки), можно сформировать допустимую нагрузку для канала

обслуживания отказов. Количество релизов при этом будет определяться числом $(\eta^* + 1)$, состав релизов – подмножествами заявок, которые подлежат развертыванию в одном временном периоде, а календарный план развертывания релизов будет задан «привязкой» каждого релиза к соответствующему моменту времени его развертывания.

Пусть η^* – заданное максимальное число интервалов Δt , на которое может быть сдвинута вправо каждая из последовательностей (6). Это значит, что каждой заявке A_i поставлена в соответствие $(\eta^* + 1)$ следующая последовательность

$$\begin{aligned} \eta = 0: m_i^0 &= (m_{i1}^0, m_{i2}^0, \dots, m_{i(p_T-1)}^0); \\ \eta = 1: m_i^1 &= (0, m_{i1}^1, m_{i2}^1, \dots, m_{i(p_T-2)}^1); \\ &\dots \\ \eta = \eta^*: m_i^{\eta^*} &= (0, \dots, 0, m_{i1}^{\eta^*}, m_{i2}^{\eta^*}, \dots, m_{i(p_T-1-\eta^*)}^{\eta^*}). \end{aligned} \quad (7)$$

Переобозначим и перенумеруем элементы последовательностей (7) в соответствии с их новыми порядковыми номерами:

$$\begin{aligned} \eta = 0: m_i^0 &= (m_{i1}^0, m_{i2}^0, \dots, m_{i(p_T-1)}^0); \\ \eta = 1: m_i^1 &= (m_{i1}^1, m_{i2}^1, \dots, m_{i(p_T-1)}^1); \\ &\dots \\ \eta = \eta^*: m_i^{\eta^*} &= (m_{i1}^{\eta^*}, m_{i2}^{\eta^*}, \dots, m_{i(p_T-1)}^{\eta^*}). \end{aligned} \quad (8)$$

Множество возможных последовательностей (8) для множества заявок $A = \{A_i | i = \overline{1, n}\}$ можно кратко описать следующим соотношением:

$$\left\{ \left\{ m_i^\eta \mid \eta = \overline{0, \eta^*} \right\} \mid i = \overline{1, n} \right\}. \quad (9)$$

Введем переменную

$$x_i^\eta = \begin{cases} 1, & \text{если } m_i^\eta \text{ выбирается в качестве} \\ & \text{решения для заявки } A_i; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (10)$$

Сформулируем следующим образом задачу формирования количества релизов, их состава и календарного плана развертывания:

$$q(A) = \max_p \left[\left(\sum_{i=1}^n \sum_{\eta=0}^{\eta^*} m_{ip}^\eta x_i^\eta \right) + m_p^{-0} \right] \rightarrow \min; \quad (11)$$

$$m(A) = \sum_{p=1}^{p_T-1} \left[\left(\sum_{i=1}^n \sum_{\eta=0}^{\eta^*} m_{ip}^\eta x_i^\eta \right) + m_p^{-0} \right] \geq m^*; \quad (12)$$

$$\sum_{\eta=0}^{\eta^*} x_i^\eta = 1, \quad i = \overline{1, n}. \quad (13)$$

Критерий (11) на множестве допустимых совокупностей последовательностей выбирает в качестве лучшей ту совокупность, которая минимизирует максимальное число прогнозируемых отказов в отдельном интервале времени планового периода. Ограничение (12) делает допустимыми только те совокупности последовательностей из выражения (9), для которых суммарное количество прогнозируемых отказов в планируемом периоде $(0, T)$, с учетом несдвигаемой последовательности (5), превышает заданное значение m^* . Ограничение (13) требует, чтобы заявка A_i была представлена в решении одной из последовательностей (9).

Задание величины η^* определяет диапазон возможного изменения величины m^* . Действительно, если обозначить через $m_{\max}(A)$ количество всех отказов от развертывания заявок множества A

$$m_{\max}(A) = \sum_{p=1}^{p_T-1} \left[\left(\sum_{i=1}^n m_{ip} \right) + m_p^{-0} \right], \quad (14)$$

а через $m(\eta^*)$ общее количество отказов в последних η^* интервалах периода $(0, T)$, получим уравнение:

$$m(\eta^*) = \sum_{p=(p_T-1-\eta^*)}^{p_T-1} \left[\left(\sum_{i=1}^n m_{ip} \right) + m_p^{-0} \right]. \quad (15)$$

Очевидно, имеет место соотношение

$$m^* \in \left[(m_{\max}(A) - m(\eta^*)), m_{\max}(A) \right]. \quad (16)$$

С увеличением значения η^* увеличивается диапазон изменения величины m^* и расширяются возможности по снижению нагрузки на канал обслуживания за счет перемещения большего числа прогнозируемых отказов за пределы планового периода $(0, T)$. Задание значений η^* и m^* в задачах (11) – (13) является результатом компромисса между руководством процесса управления релизами, которое заинтересовано в минимизации количества релизов, и руководством канала обслуживания отказов сервисов, которому необходимо, чтобы выполнялось неравенство

$$\frac{m^*}{p_T - 1} \leq \beta, \quad (17)$$

где β – интенсивность обработки отказов каналом обслуживания.

Задача (11) – (13) является дискретной и нелинейной. Для ее решения применен метод полного перебора вариантов. Мощность множества решений задачи равна

$(\eta^* + 1)^n$. Перебор вариантов гарантирует нахождение глобального оптимума задачи (11) – (13) и позволяет при необходимости решить двухкритериальную задачу:

$$(q(A), m(A)) \rightarrow \text{opt}; \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i^n = 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad (19)$$

то есть найти наилучшее сочетание значений $q(A)$ и $m(A)$.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Пусть плановый период $(0, T)$ включает четыре временных интервала Δt , множество A состоит из четырех заявок ($n = 4$), а прогнозируемая динамика отказов сервисов от развертывания заявок, включая последовательность $(m_p^0 | p = \overline{1, (p_T - 1)})$, описывающую отказы, которые обусловлены развертыванием релизов до начала планового периода $(0, T)$, заданы ниже:

Δt_p	Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4	Σ
m_{1p}	4	3	0	2	9
m_{2p}	5	4	1	3	13
m_{3p}	4	2	2	1	9
m_{4p}	1	2	1	1	5
m_p^0	1	1	0	3	5
Σ	15	12	4	10	41

Пусть $\eta^* = 1$, значит $m^* \in [41, (41 - 7)]$; $m^* = 36$, то есть за пределы периода $(0, T)$ допускается переместить не более пяти прогнозируемых отказов. Мощность множества решений $(\eta^* + 1)^n$ задачи равна $2^4 = 16$.

Варианты решений для первых двух заявок и не-сдвигаемой последовательности m_p^0 приведены ниже:

	9	10
m_1^1	(6, 9, 4, 6)	(1, 10, 7, 4)
	25	22
	10	8
m_1^0	(10, 8, 1, 8)	(5, 8, 4, 6)
	27	23
m_1	m_2^0	m_1^0
m_2		

В верхней строке клетки приведено значение максимального элемента последовательности отказов. Сама последовательность размещена в центре клетки, а сумма элементов последовательности – в третьей строке.

Варианты решений для первых трех заявок и не-сдвигаемой последовательности m_p^0 приведены ниже:

	12	14
$m_1^1 m_2^1$	(5, 12, 9, 5)	(1, 14, 9, 6)
	30	31
	11	13
$m_1^1 m_2^0$	(10, 11, 6, 7)	(6, 13, 6, 8)
	34	33
	10	12
$m_1^0 m_2^1$	(9, 10, 6, 7)	(5, 12, 6, 8)
	32	31
	14	12
$m_1^0 m_2^0$	(14, 10, 3, 9)	(10, 12, 3, 10)
	36	35
$m_1 m_2$	m_3^0	m_3^1
m_3		

Варианты решений для всех четырех заявок и не-сдвигаемой последовательности m_p^0 приведены ниже:

	16	15
$m_1^1 m_2^1 m_3^1$	(2, 16, 10, 7)	(1, 15, 11, 7)
	35	34
	14	13
$m_1^1 m_2^1 m_3^0$	(6, 14, 10, 6)	(5, 13, 11, 6)
	36	35
	15	14
$m_1^1 m_2^0 m_3^1$	(7, 15, 7, 9)	(7, 14, 8, 9)
	38	38
	13	12
$m_1^1 m_2^0 m_3^0$	(11, 13, 7, 8)	(10, 12, 8, 8)
	39	38
	14	13
$m_1^0 m_2^1 m_3^1$	(6, 14, 7, 9)	(5, 13, 8, 9)
	36	35
	12	11
$m_1^0 m_2^1 m_3^0$	(10, 12, 7, 8)	(9, 11, 8, 8)
	37	36
	14	13
$m_1^0 m_2^0 m_3^1$	(11, 14, 4, 11)	(10, 13, 5, 11)
	40	39
	15	14
$m_1^0 m_2^0 m_3^0$	(15, 12, 4, 10)	(14, 11, 5, 10)
	41	40
$m_1 m_2 m_3$	m_4^0	m_4^1
m_4		

Допустимые решения выделены курсивом. Оптимальное решение выделено полужирным курсивом – решение $m_1^0 m_2^1 m_3^0 m_4^1$, которое включает два релиза: первый $A^1 = \{m_1^0, m_3^0\}$ (первая и третья заявки, подлежащие развертыванию в момент времени t_1) и второй $A^2 = \{m_2^1, m_4^1\}$ (вторая и четвертая заявки, подлежащие развертыванию в момент времени t_2). Для оптимального решения $q(A) = 11$, $m = 36$, а последовательность количеств отказов сервисов имеет вид (9, 11, 8, 8).

Выводы

Полученные выше решения со значениями критерия $q(A)$ и ограничения $m(A)$ могут быть использованы для определения решения двухкритериальных задач (18), (19). Если из 16 решений q , m (см. выше) убрать доминируемые, останется пять Парето решений, которые представлены ниже:

q	11	12	13	14	15
m	36	38	39	40	41

Лицо, принимающее решение, может непосредственно выбрать решение с лучшим для него сочетанием q и m , либо задать весовые коэффициенты критериев q и m , позволяющие выполнить свертку критериев и найти единственный оптимум.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев А.В. ИТ-инфраструктура предприятия: эффективное управление (ITSM), мониторинг и аудит // Вестник научных конференций. 2016. № 10-7 (14). С. 19 – 22.
2. Смирнов А.В. ITSM-подход к управлению и организации ИТ-услуг как фактор повышения конкурентоспособности предприятия // Аллея науки. 2018. Т. 1. № 11 (27). С. 16 – 20.
3. Кряжев С.А., Кузнецова Е.В., Макаров Е.Н. Управление портфелем ИТ-проектов как инструмент реализации ИТ-стратегии // Информационные технологии. 2017. Т. 23. № 11. С. 833 – 840.
4. Berrahal W., Marghoubi R. Lean continuous improvement to information technology service management implementation: Projection of ITIL framework. In: Int. Conf. on Information Technology for Organizations Development. 2016. IT4OD. P. 1 – 6.
5. Rahman A.A. Defining methodology for multi model software process improvement framework. In: Proceedings – AIMS 2015, 3rd Int. Conf. on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation. 2015. P. 245 – 249.
6. Суровцев А.С. Модели ITSM и системы ITIL как основа систем управления // Центральный научный вестник. 2017. Т. 2. № 18(35). С. 10, 11.
7. Скрипкин К. ITIL и ИТ-революция внутри ИТ-службы // Открытые системы. СУБД. 2017. № 3. С. 26 – 29.
8. Zimin A.V., Burkova I.V., Zimin V.V. Models and mechanisms for managing the deployment of IT service releases in the operational environment // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. No. 377. Article 012045.
9. Ванина М.Ф., Ерохин А.Г., Фролова Е.А. Применение математических моделей для оценки эффективности внедрения процесса компьютерного тестирования // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 5. С. 83 – 85.
10. Мельников А.В., Мищенко А.В. Тестирование промышленных программных систем с использованием пирамиды тестирования // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2019. Т. 7. № 1 (44). С. 257 – 261.
11. Saarelainen K., Jäntti M., Hujo M. A model for analyzing of information systems incidents: Proactive approach. In: Proceedings of the 13th European, Mediterranean and Middle Eastern Conf. on Information Systems, EMCIS. 2016. P. 305 – 319.
12. Mora M., Wang F., Gómez J.M., Díaz O. A Comparative Review on the Agile Tenets in the IT Service Management and the Software Engineering Domains // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. No. 1071. P. 102 – 115.
13. Titah R. Conceptualizing IT service management as a management control system for business-IT alignment // Americas Conf. on Information Systems 2018: Digital Disruption, AMCIS. 2018.
14. Teubner A., Remfert C. Giving IT services a theoretical backing // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2017. 10273 LNCS. P. 448 – 468.
15. Зимин В.В., Буркова И.В., Зимин А.В. Модели и механизмы управления жизненным циклом ИТ-сервисов (научная монография). – Saarbrücken: LAB LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 328 с.
16. Юрченко А.Н. Функциональное тестирование как одна из методологий тестирования программного обеспечения // Вестник современных исследований. 2018. № 1-1 (16). С. 155, 156.
17. Heikkinen S., Jäntti M. Studying continual service improvement and monitoring the quality of ITSM. In: Quality of Information and Communications Technology. Proc. of 12th Int. Conf. QUATIC 2019, Ciudad Real, Spain, September 11–13, 2019. Springer. P. 193 – 206.
18. Rouhani S. A fuzzy superiority and inferiority ranking based approach for IT service management software selection // Kybernetes. 2017. Vol. 4. No. 46. P. 728 – 746.
19. Зимин А.В., Зимин В.В., Митьков В.В. Разработка моделей и механизмов управления проектированием и внедрением ERP-системы предприятия. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. – 95 с.
20. Goman M. Current state of IT risk analysis in management frameworks: Is it enough? In: 60th Int. Sci. Conf. on Information Technology and Management Science of Riga Technical University ITMS 2019 – Proceedings.
21. Correa S.L.L., Mexas M.P. The service center implementation according to best practices recommended by ITIL // IEEE Latin America Transactions. 2018. Vol. 16. No. 6. P. 1809 – 1816.

Поступила в редакцию 10 февраля 2020 г.

После доработки 19 февраля 2020 г.

Принята к публикации 25 февраля 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 5, pp. 373–378.

PLANNING SERVICE ASSETS DEPLOYMENT BASED ON INFORMATION ABOUT DYNAMICS OF IT SERVICES USE

A.V. Zimin¹, I.A. Zolin¹, I.V. Burkova², V.V. Zimin¹

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

² V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, RAS, Moscow, Russia

Abstract. Deployment of new service assets in operational IT environment is associated with the risk of disruption of the assets of its “basic”

condition. Such disruptions cause failures of functioning services. To reduce the risk of disruption, the deploying service assets are divided by releases – sub-sets of service assets that will be embedded in the IT environment in one period. The traditional approach to formation and deployment of releases uses information on services structural properties to predict the number of failures due to the deployment of each service asset, each release and each application for deployment. As a result, the task of managing deployment of service assets is reduced to a sequential solution of three tasks: determining number of releases;

determining composition of releases; building a release deployment schedule. The approach is based on the assumption that incorrect deployment of releases is manifested through the failure of services immediately after deployment. In practice, as a rule, this assumption is usually not fulfilled, because the use of various services by users who detect service failures is cyclical (daily, weekly, monthly, quarterly, annual). Many service failures can be detected by users in periods of time that are quite remote from the deployment time of the corresponding IT assets. The article contains the case where the managing process of IT provider configurations of the metallurgical company is well developed, i.e. its configuration database contains information on frequency of various services use at different periods of time. Information on dynamics of services application by users is used to predict time sequence of operating services failures due to deployment of each application. As a result, the task of forming and scheduling deployment of releases is formalized in the form of a discrete nonlinear programming task, the solution procedure of which allows simultaneous determination of number of releases, their composition and schedule for their deployment.

Keywords: IT service, service assets, operational IT environment, “basic” condition of IT environment, deployment request, design, introduction, release, service failure, service channel.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-373-378

REFERENCES

1. Andreev A.V. Enterprise IT infrastructure: Effective management (ITSM), monitoring and auditing. *Vestnik nauchnykh konferentsii*. 2016, no. 10-7 (14), pp. 19–22. (In Russ.).
2. Smirnov A.V. ITSM as an approach to management and organization of IT services as a factor in increasing enterprise competitiveness. *Alleya nauki*. 2018, vol. 1, no. 11 (27), pp. 16–20. (In Russ.).
3. Kryazhev S.A., Kuznetsova E.V., Makarov E.N. Management of IT project portfolio as a tool for IT strategy implementation. *Informatsionnye tekhnologii*. 2017, vol. 23, no. 11, pp. 833–840. (In Russ.).
4. Berrahal W., Marghoubi R. Lean continuous improvement to information technology service management implementation: Projection of ITIL framework. In: *Int. Conf. on Information Technology for Organizations Development*. 2016, IT4OD, pp. 1–6.
5. Rahman A.A. Defining methodology for multi model software process improvement framework. In: *Proceedings – AIMS 2015, 3rd Int. Conf. on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation*. 2015, pp. 245–249.
6. Surovtsev A.S. ITSM models and ITIL systems as the basis of management systems. *Tsentral'nyi nauchnyi vestnik*. 2017, vol. 2, no. 18 (35), pp. 10, 11. (In Russ.).
7. Skripkin K. ITIL and IT revolution within the IT service. *Otkrytye sistemy. SUBD*. 2017, no. 3, pp. 26–29. (In Russ.).
8. Zimin A.V., Burkova I.V., Zimin V.V. Models and mechanisms for managing the deployment of IT service releases in the operational environment. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019, no. 377, article 012045.
9. Vanina M.F., Erokhin A.G., Frolova E.A. Use of mathematical models to assess effectiveness of computer testing implementation. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*. 2017, vol. 11, no. 5, pp. 83–85. (In Russ.).
10. Mel'nikov A.V., Mishchenko A.V. Industrial software systems testing using a test pyramid. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*. 2019, vol. 7, no. 1 (44), pp. 257–261. (In Russ.).
11. Saarelainen K., Jäntti M., Hujo M. A model for analyzing of information systems incidents: Proactive approach. In: *Proceedings of the 13th European, Mediterranean and Middle Eastern Conf. on Information Systems, EMCIS*. 2016, pp. 305–319.
12. Mora M., Wang F., Gómez J.M., Díaz O. a comparative review on the agile tenets in the IT service management and the software engineering domains. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, no. 1071, pp. 102–115.
13. Titah R. Conceptualizing IT service management as a management control system for business-IT alignment. *Americas Conf. on Information Systems 2018: Digital Disruption, AMCIS*. 2018.
14. Teubner A., Remfert C. Giving IT services a theoretical backing. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2017, 10273 LNCS, pp. 448–468.
15. Zimin V.V., Burkova I.V., Zimin A.V. *Modeli i mekhanizmy upravleniya zhiznennym tsiklom IT-servisov (nauchnaya monografiya)* [Models and mechanisms for managing the life cycle of IT services (scientific monograph)]. Saarbrücken: LAB LAMBERT Academic Publishing, 2017, 328 p. (In Russ.).
16. Yurchenko A.N. Functional testing as one of the software testing methodologies. *Vestnik sovremennykh issledovaniy*. 2018, no. 1-1 (16), pp. 155, 156. (In Russ.).
17. Heikkinen S., Jäntti M. Studying continual service improvement and monitoring the quality of ITSM. In: *Quality of Information and Communications Technology. Proc. of 12th Int. Conf. QUATIC 2019, Ciudad Real, Spain, September 11–13, 2019*. Springer, pp. 193–206.
18. Rouhani S. A fuzzy superiority and inferiority ranking based approach for IT service management software selection. *Kybernetes*. 2017, vol. 4, no. 46, pp. 728–746.
19. Zimin A.V., Zimin V.V., Mit'kov V.V. *Razrabotka modelei i mekhanizmov upravleniya proektirovaniem i vnedreniem ERP-sistemy predpriyatiya* [Development of models and management mechanisms for design and implementation of an enterprise ERP system]. Novokuznetsk: ITs SiBGIU, 2019, 95 p. (In Russ.).
20. Goman M. Current state of IT risk analysis in management frameworks: Is it enough? In: *60th Int. Sci. Conf. on Information Technology and Management Science of Riga Technical University ITMS 2019 – Proceedings*.
21. Correa S.L.L., Mexas M.P. The service center implementation according to best practices recommended by ITIL. *IEEE Latin America Transactions*. 2018, vol. 16, no. 6, article 8444403, pp. 1809–1816.

Information about the authors:

A.V. Zimin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Automation and Information Systems” (zimin.0169@yandex.ru)
I.A. Zolin, MA Student of the Chair “Automation and Information Systems” (igorzolin007@yandex.ru)
I.V. Burkova, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher (irbur27@mail.ru)
V.V. Zimin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Automation and Information Systems” (zimin.1945@mail.ru)

Received February 10, 2020
 Revised February 19, 2020
 Accepted February 25, 2020

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ КОРПОРАТИВНЫХ СТРАТЕГИЙ ПРЕДПРИЯТИЯМИ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

*Глушакова О.В., д.э.н., профессор кафедры экономики, учета
и финансовых рынков (trinity@ktk.company)*

*Черникова О.П., к.э.н., доцент, заведующий кафедрой экономики, учета
и финансовых рынков (chernikovaop@yandex.ru)*

*Стрекалова С.А., ст. преподаватель кафедры экономики, учета
и финансовых рынков (strekalova.S.A@yandex.ru)*

Сибирского государственного индустриального университета
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Изучение научных трудов отечественных исследователей, а также официальных методик, посвященных различным вопросам оценки результатов функционирования предприятий, позволило сделать вывод о том, что указанные методики, в основном, не ориентированы на учет отраслевой специфики производственно-хозяйственной деятельности, факторов внешней среды. В условиях нарастания скорости изменений наличие инструментария стратегического управления, позволяющего четко идентифицировать позицию предприятия в одноименном отраслевом сегменте, корректировать стратегию, и, тем самым, повышать экономическую эффективность его деятельности, остро востребовано. Исследование основано на методологическом посыле о том, что предприятия, сохранившие устойчивость в условиях кризисных процессов в экономике, реализуют корпоративные стратегии эффективно. Авторами впервые проведена интегральная оценка результатов реализации корпоративных стратегий 28 предприятиями черной металлургии России в условиях кризиса 2014 г. В процессе оценки использован методический инструмент, базирующийся на методологии бенчмаркинга, анализе разрывов, процессном подходе, применении комплексов ключевых показателей, характеризующих эффективность реализации базовых функциональных стратегий. К базовым функциональным стратегиям относим финансовую, маркетинговую, технико-технологическую стратегии и стратегию управления человеческими ресурсами. По мнению авторов успешная реализация именно этих стратегий имеет существенное значение для обеспечения устойчивости предприятия. За счет выделения в 2014 г. «лучших в классе» предприятий черной металлургии и «потенциальных банкротов» были определены границы «коридора», позволяющего идентифицировать текущую позицию конкретного предприятия в исследуемом отраслевом сегменте. Оценка разрывов текущих значений интегральных показателей эффективности реализации базовых функциональных и корпоративной стратегии по сравнению с «лучшими в классе» предприятиями и «потенциальными банкротами» расширяет возможности существующих подходов к стратегическому управлению. Предлагаемый методический инструмент позволяет повысить стратегическую гибкость предприятий реального сектора экономики в условиях высокой изменчивости факторов внешней среды.

Ключевые слова: эффективность реализации корпоративной стратегии, базовые функциональные стратегии, комплексы ключевых показателей, кризисные процессы, анализ разрывов, предприятия черной металлургии.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-379-388

ВВЕДЕНИЕ

Эффективная реализация корпоративной стратегии (адекватной изменениям внешней среды) находит свое отражение в непрерывности функционирования предприятия и в его устойчивом развитии. Достижение целей устойчивости во многом определяется способностью менеджмента обеспечивать генерацию активами, находящимися в распоряжении предприятия, финансовых потоков на непрерывной основе.

Проблематике измерения эффективности корпоративных стратегий посвящены труды зарубежных и отечественных исследователей. В основном для оценки эффективности используют сбалансированные систе-

мы показателей (Balanced Scorecard – BSC) и ключевые показатели эффективности (Key Performance Indicators). Подходы к использованию указанных инструментов при оценке стратегий изложены в работах [1 – 4]. Особое внимание отводится исследованию соответствия содержания корпоративных и функциональных стратегий [5 – 7], в частности, стратегии управления человеческими ресурсами [8, 9], поскольку несоответствие целей и задач, определенных в корпоративной стратегии, уровню квалификации сотрудников выступает причиной ее не эффективной реализации (несоответствие стратегии и возможностей) [2]. Многие исследователи успешное стратегирование связывают с динамическими возможностями организации (предприятия) [10, 11].

В работах [12 – 15] справедливо отмечается влияние корпоративной стратегии на структуру капитала.

Изучение научных трудов отечественных исследователей [16 – 23], а также официальных методик [24 – 27], посвященных различным вопросам оценки результатов функционирования предприятий, позволило сделать вывод о том, что указанные методики в основном не ориентированы на учет отраслевой специфики производственно-хозяйственной деятельности, факторов внешней среды. В системе используемых показателей отсутствуют коэффициенты, отражающие результаты генерации активами предприятия финансовых потоков, что не позволяет сформировать объективную картину об эффективности реализации корпоративной стратегии в условиях нарастания скорости изменений.

Методы исследования

Согласно положениям национального стандарта РФ «Менеджмент организации. Руководящие указания по достижению экономического эффекта в системе менеджмента качества» [28] успешная интеграция принципов менеджмента основывается на применении процессного подхода и методологии PDCA (Plan – Do – Check – Act (план – выполнение – проверка – действие)).

Состояние предприятия любой отраслевой принадлежности и результаты его функционирования рассматриваем как результат реализации интеграционного процесса на всех уровнях управления, объединяющего в себе результаты реализации совокупности бизнес-, функциональных и операционных стратегий. Базовыми в условиях высокой изменчивости факторов внешней среды, определяющими устойчивость предприятия, выступают такие функциональные стратегии, как финансовая, маркетинговая, технико-технологическая стратегии и стратегия управления человеческими ресурсами.

Адекватность реализации финансовой стратегии обеспечивает сбалансированность положительных и отрицательных финансовых потоков предприятия, тем самым способствуя сохранению его финансовой устойчивости. Маркетинговая стратегия отнесена по своей значимости к базовым функциональным, поскольку успешность ее реализации позволяет обеспечить непрерывность генерации положительных финансовых потоков, в особенности в условиях отрицательного изменения рыночной конъюнктуры. Техничко-технологическая стратегия ориентирована на повышение конкурентоспособности производимой предприятием продукции в одноименном отраслевом сегменте. В свою очередь стратегия управления человеческими ресурсами позволяет обеспечить успешность реализации всех выше перечисленных функциональных стратегий, поскольку направлена на формирование кадрового состава, обладающего высоким уровнем профессиональных компетенций.

Основная идея исследования базируется на методологическом посыле о том, что корпоративные стратегии реализуются эффективно теми предприятиями, которые сохранили устойчивость в условиях усиления кризисных процессов во внешней среде, продемонстрировали непрерывность генерации финансовых потоков и положительные финансовые результаты в виде чистой прибыли. В свою очередь, предприятия, в которых наблюдали снижение объема генерации финансовых потоков, темпов роста выручки, платежеспособности, нарушение структуры капитала и отрицательные финансовые результаты в виде чистых убытков, реализуют свои корпоративные стратегии не эффективно.

При разработке методики использованы процессный подход, методы анализа разрывов и бенчмаркинга.

Методика исследования

Паттерн действий по оценке эффективности реализации корпоративной стратегии предприятия можно представить следующим образом:

- обоснование интегрированной системы комплексов ключевых показателей, характеризующих эффективность реализации базовых функциональных стратегий (финансовой, маркетинговой, технико-технологической стратегий и стратегии управления человеческими ресурсами);
- выделение референтных точек по каждому ключевому показателю для обеспечения их сопоставимости методом линейного масштабирования;
- разделение предприятий, участвующих в оценке, на две группы: в первую группу входят предприятия, которые сохранили устойчивость в условиях усиления кризисных процессов во внешней среде («лучшие в классе» предприятия), что позволяет сделать вывод об эффективности реализации базовых функциональных и корпоративных стратегий; во вторую – предприятия, которые не сохранили устойчивость в условиях усиления кризисных процессов во внешней среде («потенциальные банкроты»), что свидетельствует о неэффективности реализации базовых функциональных стратегий и корпоративной стратегии в целом;
- определение средних значений ключевых показателей по каждой группе предприятий и их медианных значений по всей совокупности предприятий в целом, что позволяет рассчитать среднеотраслевые интегральные показатели эффективности реализации базовых функциональных стратегий и корпоративной стратегии «лучшими в классе» предприятиями и «потенциальными банкротами», а также медианное значение интегрального показателя в целом по отрасли;
- по результатам полученных расчетов установление границ «коридора», которые дают возможность судить об эффективности реализации базовых функциональных стратегий и корпоративной стратегии конкретного

предприятия, функционирующего в рассматриваемом отраслевом сегменте;

- расчет интегральных показателей, характеризующих эффективность реализации базовых функциональных стратегий и корпоративной стратегии по каждому исследуемому предприятию и оценка его текущей позиции.

Анализ показателей официального государственного статистического наблюдения за 2008 – 2017 гг. показал, что в 2014 г. в большинстве субъектов РФ, в которых функционируют предприятия черной металлургии, наблюдался самый низкий сальдированный финансовый результат по такому виду экономической деятельности как «Обрабатывающие производства» (табл. 1). Аналогичную ситуацию в 2014 г. наблюдали в угольной отрасли, которая непосредственно связана с черной металлургией [29]. Поэтому в целях оценки был принят именно 2014 г.

Результаты функционирования предприятия могут быть представлены в виде интегрального показателя R_i , находящегося в функциональной зависимости от четырех аргументов:

$$R_i = f(F, M, T, H), \quad (1)$$

где F , M , T и H – комплексы ключевых показателей, отражающих эффективность реализации процессов финансовой, маркетинговой, технико-технологической стратегий и стратегии управления человеческими ресурсами.

Исследование финансовой отчетности за 2014 г. 28 предприятий черной металлургии позволило выделить 16 «лучших в классе» предприятий, которые, несмотря на кризисные процессы в экономике и снижение цен и спроса на продукцию металлургического производства, сохранили свою устойчивость. Стратегиро-

вание их развития позволило обеспечить допустимый уровень снижения генерации финансовых потоков, сохранение платежеспособности, оптимальной структуры капитала и положительный финансовый результат в виде прибыли. Это свидетельствует об эффективности реализации базовых функциональных и корпоративной стратегий в целом.

Согласно положениям национального стандарта РФ «Менеджмент организации. Руководящие указания по достижению экономического эффекта в системе менеджмента качества», один из признаков зрелости организации – использование принципов бенчмаркинга. Это означает, что успешный менеджериальный опыт при стратегировании развития предприятий черной металлургии должен быть принят во внимание другими предприятиями, функционирующими в этом отраслевом сегменте.

Среднеотраслевые результаты функционирования «лучших в классе» предприятий R_{st} , «потенциальных банкротов» R_{bt} и их медианные значения R_m могут быть представлены следующим образом:

$$R_{st} = f(F_{st}, M_{st}, T_{st}, H_{st}); \quad (2)$$

$$R_{bt} = f(F_{bt}, M_{bt}, T_{bt}, H_{bt}); \quad (3)$$

$$R_m = f(F_m, M_m, T_m, H_m). \quad (4)$$

Комплексы ключевых показателей эффективности реализации базовых функциональных стратегий и их обоснование отражены в табл. 2 – 5.

При обосновании интегрированной системы комплексов ключевых показателей из указанной системы с помощью корреляционного анализа были исключены показатели, обладающие сильной связью.

Значение R_i рассчитывается по следующей формуле:

Т а б л и ц а 1

**Сальдированный финансовый результат по виду экономической деятельности
«Обрабатывающие производства» в субъектах РФ***

Table 1. Balanced financial result for “Manufacturing” business operations in the regions of the Russian Federation

Субъект РФ	Сальдовый финансовый результат в									
	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.
Кемеровская область	50 987	3261	17 190	8407	27 849	6882	–19 484	17 545	25 650	12 282
Красноярский край	–32 758	128 868	166 047	160 558	114 003	117 219	95 047	228 442	392 320	294 163
Челябинская область	35 020	36 838	53 180	11 239	35 622	–47 247	14 996	84 014	139 872	129 427
Свердловская область	83 314	–8148	66 875	47 417	92 263	55 225	–5527	40 000	182 966	157 990
Липецкая область	96 503	29 250	42 892	40 511	31 261	–3813	23 035	65 907	61 202	128 627
Пермский край	139 212	49 096	83 504	110 102	117 239	89 270	62 552	100 612	113 421	97 918

* Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. Регионы России. Социально-экономические показатели. URL: http://old.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1138623506156 (дата обращения 22.11.2019).

Т а б л и ц а 2

Комплекс ключевых показателей, отражающих эффективность реализации предприятием процессов финансовой стратегии (F)

Table 2. Set of key performing indicators of financial strategy processes implementation of the enterprise (F)

Показатель	Расчетная формула	Обоснование	+/- (*)	Нормативное значение ключевого показателя
Коэффициент текущей ликвидности (X_1)	Стр. 1200 : (стр. 1510 + стр. 1520 + стр. 1550) бухгалтерского баланса (ББ).	Отражает возможности покрытия краткосрочных обязательств оборотными активами	+	1,5 – 2,0
Коэффициент концентрации заемного капитала (X_2)	(Стр. 1400 + стр. 1500 – стр. 1430 – стр. 1530 – стр. 1540) : стр. 1700 ББ .	Показывает отношение активов, сформированных за счет внешних займов, к общему объему капитала предприятия	–	$\leq 0,5$
Коэффициент покрытия отрицательного денежного потока положительным денежным потоком от инвестиционных операций (X_3)*	Стр. 4210 : стр. 4220 отчета о движении денежных средств (ОДДС)	Отражает эффективность генерации денежных потоков предприятием от инвестиционных операций	+	$\geq 1,0$
Коэффициент покрытия отрицательного денежного потока положительным денежным потоком от финансовых операций (X_4)*	Стр. 4310 : стр. 4320 ОДДС	Отражает эффективность генерации предприятием денежных потоков от финансовых операций	+	$\geq 1,0$
Доля себестоимости в выручке (X_5)	Стр. 2120 : стр. 2110 отчета о финансовых результатах (ОФР)	Отражает эффективность управления затратами	–	Снижение доли себестоимости в выручке в отчетном периоде по сравнению с базовым

* Связь ключевого показателя X_i с интегральным показателем R .

$$R_i = aF_i + bM_i + cT_i + dH_i, \quad (5)$$

где a, b, c, d – значения весовых коэффициентов с учетом значимости того или иного вида функциональной стратегии, установленные экспертным путем с привлечением менеджмента высшего и среднего звена предприятий реального сектора экономики.

Для этих целей был использован метод экспертных оценок. Менеджменту высшего и среднего звена предприятий было предложено присвоить ранги базовым функциональным стратегиям с учетом убывания их значимости по шкале от 1 до 4 (1 – наиболее значимая функциональная стратегия, 4 – наименее значимая функциональная стратегия). Общая сумма весовых коэффициентов равна единице. Аналогичным образом рассчитываются значения показателей R_{st} , R_{bt} и R_m .

Весовые коэффициенты с учетом значимости реализуемых базовых функциональных стратегий приняли следующие значения: $a = 0,4$; $b = 0,3$; $c = 0,2$; $d = 0,1$. Согласованность мнений экспертов подтверждает коэффициент конкордации Кендалла, равный 0,77.

Оценка эффективности реализации базовых функциональных стратегий проводится по следующему выражению:

$$F_i, M_i, T_i, H_i = \frac{\sum_{k=1}^n X_{ik}}{n}, \quad (6)$$

где X_{ik} – масштабированное значение ключевого показателя k в комплексе показателей эффективности реализации базовой функциональной стратегии (финансовой, маркетинговой, технико-технологической, управления человеческими ресурсами) i -го предприятия; n – количество показателей в блоке, по которому производится оценка.

Для обеспечения сопоставимости ключевых показателей используется метод линейного масштабирования.

Для ключевых показателей, имеющих положительную связь с результатами функционирования предприятия, масштабирование производится по формуле

$$X_{km} = \frac{X_k - X_{k_{\min}}}{X_{k_{\max}} - X_{k_{\min}}}. \quad (7)$$

где X_k – фактическое значение показателя; $X_{k_{\min}}$ и $X_{k_{\max}}$ – минимальное и максимальное значения X_k .

В случае, если ключевой показатель отрицательно связан с результатами функционирования предприятия

Т а б л и ц а 3

Комплекс ключевых показателей, отражающих эффективность реализации предприятием процессов маркетинговой стратегии (М)

Table 3. Set of key performing indicators of marketing strategy processes implementation of the enterprise (M)

Показатель	Расчетная формула	Обоснование	+/- (*)	Нормативное значение ключевого показателя
Период обращения кредиторской задолженности (X_6)	$365 : [(стр. 2110 \text{ ОФР} : 0,5 \times (стр. 1520 \text{ отчетн. года} + стр. 1520 \text{ предыдущ. года ББ})]$	Отражает эффективность реализации маркетинговой стратегии в части управления кредиторской задолженностью	—	—
Продолжительность производственного цикла (X_7), рассчитывается на основе показателей периода обращения дебиторской задолженности ($\Pi_{дз}$) и периода обращения запасов (Π_3)	$\Pi_{дз} + \Pi_3 = 365 : [(стр. 2110 \text{ ОФР} : 0,5 \times (стр. 1230 \text{ отчетн. года} + стр. 1230 \text{ предыдущ. года ББ})] + 365 : [(стр. 2120 \text{ ОФР} : 0,5 \times (стр. 1210 \text{ отчетн. года} + стр. 1210 \text{ предыдущ. года ББ})]$	Отражает эффективность реализации маркетинговой стратегии в части управления дебиторской задолженностью и запасами	—	—
Коэффициент динамики выручки (X_8)*	Стр. 2110 отчетн. года : стр. 2110 предыдущ. года ОФР	Отражает эффективность реализации маркетинговой стратегии в части поиска новых рынков сбыта	+	> 1,0
Коэффициент покрытия отрицательного денежного потока положительным денежным потоком от текущих операций (X_9)*	Стр. 4110 : стр. 4120 ОДДС	Отражает эффективность генерации денежных потоков предприятием от текущих операций	+	$\geq 1,0$

* Связь ключевого показателя X_i с интегральным показателем R .

Т а б л и ц а 4

Комплекс ключевых показателей, отражающих эффективность реализации предприятием процессов технико-технологической стратегии (Т)

Table 4. Set of key performing indicators of technological strategy processes implementation of the enterprise (T)

Показатель	Расчетная формула	Обоснование	+/- (*)	Нормативное значение ключевого показателя
Фондоотдача (X_{10})	Стр. 2110 ОФР : $0,5 \times (стр. 1150 \text{ отчетн. года} + стр. 1150 \text{ предыдущ. года ББ})$	Отражает эффективность использования основных средств предприятием	+	Положительная динамика показателя отчетного года по сравнению с предыдущим
Коэффициент износа основных средств (X_{11})	Сумма начисленной амортизации на дату : Первоначальная стоимость основных средств на ту же дату (Пояснение к ББ и ОФР)	Отражает эффективность реализации технико-технологической стратегии в части обновления основных средств	—	0,20 – 0,35
Доля результатов исследований и разработок в общей величине нематериальных активов (X_{12})*	Стр. 1120 : стр. 1110 ББ	Отражает эффективность реализации технико-технологической стратегии в части факта проведения на предприятии НИОКР и положительной динамики указанных затрат	+	Наличие доли результатов исследований и разработок в общей величине нематериальных активов и ее положительная динамика

* Связь ключевого показателя X_i с интегральным показателем R .

Т а б л и ц а 5

Комплекс ключевых показателей, отражающих эффективность реализации предприятием стратегии управления человеческими ресурсами (*H*)

*Table 5. Set of key performance indicators of human resources management strategy implementation of the enterprise (*H*)*

Показатель	Расчетная формула	Обоснование	+/- (*)	Нормативное значение ключевого показателя
Наличие в бюджете предприятия затрат на повышение квалификации персонала (X_{13})*	Рассчитывается по данным системы управленческого учета предприятия	Демонстрирует наличие элементов корпоративной социальной ответственности при реализации стратегии управления человеческими ресурсами	+	Наличие в бюджете статьи затрат на повышение квалификации персонала – значение показателя равно 1. При отсутствии указанной статьи расходов в бюджете – значение показателя равно 0
Наличие на предприятии плана мероприятий по проведению аттестации сотрудников на соответствие требованиям профессиональных стандартов (X_{14})*	Данные системы документационного обеспечения деятельности предприятия	Демонстрирует эффективность реализации стратегии управления человеческими ресурсами в части обеспечения соответствия сотрудников установленным требованиям профессиональных стандартов	+	Наличие плана проведения аттестации сотрудников и его выполнение – значение показателя равно 1. При отсутствии плана – 0
Доля сотрудников, соответствующих требованиям профессиональных стандартов (X_{15})**	Рассчитывается по данным системы управленческого учета предприятия	Демонстрирует эффективность реализации стратегии управления человеческими ресурсами в части обеспечения соответствия сотрудников установленным требованиям профессиональных стандартов	+	Позитивная динамика доли сотрудников, соответствующих требованиям профессиональных стандартов (X_{15} отчетного периода $> X_{15}$ предыдущего периода)

* Связь ключевого показателя X_i с интегральным показателем R .

** Показатели, предложенные авторами.

Т а б л и ц а 6

Референтные значения ключевых показателей эффективности реализации базовых функциональных стратегий предприятиями черной металлургии в 2014 г.

Table 6. Reference values of key performance indicators of basic functional strategies implementation of the ferrous metallurgy enterprises in 2014

Референтные значения	<i>A</i> , доли ед.	<i>B</i> , доли ед.	<i>C</i> , доли ед.	<i>D</i> , доли ед.	<i>E</i> , %	<i>F</i> , дни	<i>G</i> , дни	<i>H</i> , %	<i>K</i> , доли ед.	<i>L</i> , руб./руб.	<i>I</i> , %	<i>M</i> , %
Макс.	16,7	4,29	4,52	4,48	117	723	689	3407	1,33	62,12	60,0	90,86
Мин.	0,21	0,03	0,01	0,16	53	23	27	55	0,66	0,01	27,6	0
Размах	16,49	4,26	4,51	4,32	64	700	662	3352	0,67	62,11	32,4	90,86

П р и м е ч а н и е. *A* – коэффициент текущей ликвидности; *B* – коэффициент концентрации заемного капитала; *C* – коэффициент покрытия отрицательного денежного потока положительным денежным потоком от инвестиционных операций; *D* и *K* – коэффициент покрытия отрицательного денежного потока положительным денежным потоком от финансовых операций и от текущих операций; *E* – доля себестоимости в выручке; *F* – период обращения кредиторской задолженности; *G* – продолжительность производственного цикла; *H* – коэффициент динамики выручки; *L* – фондоотдача; *I* – коэффициент износа основных средств; *M* – доля результатов исследований и разработок в общей величине нематериальных активов.

(коэффициент износа основных средств, продолжительность операционного цикла и др.), масштабирование производится по формуле:

$$X_{k_m} = 1 - \frac{X_k - X_{k_{\min}}}{X_{k_{\max}} - X_{k_{\min}}} \quad (8)$$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Референтные значения ключевых показателей эффективности реализации базовых функциональных стратегий предприятиями черной металлургии в 2014 г. представлены в табл. 6.

Результаты оценки реализации базовых функциональных и корпоративных стратегий на примере предприятий черной металлургии в 2014 г. представлены в табл. 7. Эффективность реализации стратегии управления человеческими ресурсами не оценивали по причине закрытости необходимой информации.

Апробация методики на примере предприятий черной металлургии России проведена впервые. Результаты апробации методики на примере угледобывающих предприятий Кемеровской области, осуществляющих

добычу угля открытым способом, представлены в работе [20].

Выводы

Предлагаемая методика оценки эффективности реализации корпоративных стратегий ориентирована на учет отраслевой специфики деятельности предприятия за счет установления «границ коридора» для каждой из базовых функциональных стратегий и расчета средних

Т а б л и ц а 7

Результаты оценки реализации базовых функциональных и корпоративных стратегий предприятиями черной металлургии России в 2014 г.

Table 7. Results of the assessment of implementation of basic functional and corporate strategies by Russian iron and steel enterprises in 2014

Предприятия черной металлургии	F_i	M_i	T_i	R_i
ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат (ЕВРАЗ ЗСМК)	0,483	0,615	0,440	0,466
Щелковский металлургический завод (Щелмет)	0,418	0,660	0,005	0,366
Оскольский завод металлургического машиностроения (ОЗММ)	0,330	0,868	0,015	0,395
Владимирский завод прецизионных сплавов (ВЗПС)	0,418	0,675	0,185	0,407
Верх-Исетский металлургический завод (Эмальпроизводство)	0,734	0,753	0,025	0,524
Выксунский металлургический завод (ВМЗ)	0,400	0,748	0,035	0,391
Косогорский металлургический завод (КМЗ)	0,344	0,413	0,030	0,267
Красноярский металлургический завод (КраМЗ)	0,316	0,635	0,155	0,348
Магнитогорский металлургический комбинат (ММК)	0,372	0,690	0,030	0,362
Новолипецкий металлургический комбинат (НЛМК)	0,382	0,695	0,020	0,365
Новосибирский металлургический завод им. Кузмина (НМЗ)	0,358	0,625	0,040	0,339
Омутнинский металлургический завод (ОММЕТ)	0,418	0,683	0,020	0,376
Ашинский металлургический завод (АМЕТ)	0,436	0,638	0,010	0,368
Череповецкий металлургический комбинат (Северсталь)	0,554	0,675	0,055	0,435
Уральский металлургический завод (УМЗ)	0,555	0,620	0,020	0,412
Нижнетагильский металлургический завод (НТМК)	0,520	0,648	0,525	0,507
Чусовской металлургический завод (ЧМЗ)	0,398	0,618	0,020	0,349
Электромаш	0,293	0,645	0	0,311
Лысьвенский металлургический завод	0,455	0,630	0,040	0,379
Металлургический завод «Петросталь» (Петросталь)	0,385	0,248	0,025	0,233
Златоустовский металлургический завод (ЗЭМЗ)	0,220	0,375	0	0,201
Ступинская металлургическая компания (СМК)	0,330	0,645	0,030	0,332
Волгоградский металлургический завод (Красный Октябрь)	0,408	0,518	0,010	0,321
Абинский электрометаллургический завод (АЭМЗ)	0,325	0,680	0,015	0,337
Металлургический завод имени А.К. Серова (Метзавод А.К. Серова)	0,310	0,613	0,335	0,375
Нижнесергинский метизно-металлургический завод (НЛМК-Урал)	0,335	0,745	0,010	0,359
Таганрогский металлургический завод (Тагмет)	0,464	0,578	0,010	0,361
Челябинский металлургический завод (Мечел)	0,356	0,635	0,075	0,348
Среднее значение по группе «лучшие в классе» предприятия, R_{st}	0,440	0,665	0,101	0,396
Среднее значение по группе «потенциальные банкроты», R_{bt}	0,357	0,577	0,048	0,325
Медианное значение в целом по отрасли, R_m	0,392	0,641	0,025	0,364

значений интегральных показателей R_{st} , R_{bt} и текущих значений R_i для предприятий, функционирующих в конкретном отраслевом сегменте (предприятий черной металлургии), и расширяет возможности существующего инструментария стратегического управления предприятиями реального сектора экономики в условиях высокой изменчивости факторов внешней среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Malina M.A., Selto F.H. Communicating and controlling strategy: an empirical study of the effectiveness of the Balanced Scorecard. Available at URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.278939>. (дата обращения: 20.01.2020).
2. Campbell D., Datar S., Kulp S., Narayanan V.G. Using the Balanced Scorecard as a control system for monitoring and revising corporate strategy. Harvard NOM Working Paper. No. 02-35. Available at URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.328880>. (дата обращения: 20.01.2020).
3. Lokanandha R.I. Performance measurement using Balanced Score Card. Available at URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.980691>. (дата обращения: 20.01.2020).
4. Silvi R., Macri D.M., Tagliaventi M.R. Performance measurement systems: putting organizational effectiveness ahead. Available at URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1012622>. (дата обращения: 20.01.2020).
5. Dekimpe M.G., Hanssens D.M. Persistence modeling for assessing marketing strategy performance. ERIM Report Series Reference. No. ERS-2003-088-MKT. Available at URL: <https://ssrn.com/abstract=474428>. (дата обращения: 20.01.2020).
6. Farris P., Parry M.E., Borden N., Venkatesan R., Sharpe K. The seven questions of marketing strategy. Darden Case No. UVA-M-0779. Available at URL: <https://ssrn.com/abstract=1584114>. (дата обращения: 20.01.2020).
7. El-Shishini H.M. Integrating financial and non-financial performance measures: the state of the art and research opportunities. Presented at the Management Accounting Research Group Conference, Aston Business School. Available at URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.283651>. (дата обращения: 20.01.2020).
8. Huselid Mark A. The impact of human resource management practices on turnover, productivity, and corporate financial performance. Academy of Management Journal. 1995. Vol. 38. No. 3. P. 635-672.
9. Filatotchev I., Guest D., Piesse J., Jackson G., Gospel H. Corporate governance, human resource management and firm performance. DTI Economics Working Paper. No. 13. Available at URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.906023>. (дата обращения: 20.01.2020).
10. Augier M., Teece D.J. Dynamic capabilities and the role of managers in business strategy and economic performance // Organization Science. 2009. Vol. 20. No. 2. P. 410 – 421.
11. Teece D.J. Dynamic capabilities and strategic management: Organizing for innovation and growth: organizing for innovation and growth. – Oxford: University Press, 2009. – 320 p.
12. Cappa F., Cetrini G., Oriani R. The impact of corporate strategy on capital structure: evidence from Italian listed firms // The Quarterly Review of Economics and Finance, 2019. Available at URL: <https://doi.org/10.1016/j.qref.2019.09.005>. (дата обращения: 20.01.2020).
13. Khémiri W., Noubbigh H. Determinants of capital structure: Evidence from sub-Saharan African firms // The Quarterly Review of Economics and Finance. 2018. Vol. 70. P. 150 – 159.
14. Lowe J., Naughton T., Taylor P. The impact of corporate strategy on the capital structure of Australian companies // Managerial and Decision Economics. 1994. Vol. 15. No. 3. P. 245 – 257.
15. Menéndez-Alonso E.J. Does diversification strategy matter in explaining capital structure? Some evidence from Spain // Applied Financial Economics. 2003. Vol. 13. No. 6. P. 427 – 430.
16. Аврашков Л.Я., Графова Г.Ф., Шахматова С.А. О нормативных значениях коэффициентов при формировании рейтинговой оценки финансово-экономического состояния предприятия // Аудитор. 2015. № 5. С. 40 – 51.
17. Баженов О.В. Комплексный анализ финансового состояния предприятий медной промышленности на основе бухгалтерской отчетности, сформированной в соответствии с РПБУ и МСФО. Сопоставимость полученных результатов // Международный бухгалтерский учет. 2013. № 36. С. 2 – 9.
18. Крамин Т.В., Миргалеева И.В. Формирование корпоративной стратегии управления стоимостью промышленного предприятия // Актуальные проблемы экономики и права. 2015. № 1. С. 187 – 191.
19. Леготин Ф.Я., Бердюгина Л.А., Пряхин Л.А., Горулев Д.П. Оценка эффективности антикризисного управления. – Екатеринбург: изд. Уральского гос. экон. ун-та, 2005. – 52 с.
20. Мартынова Т.А., Наниз К.Р. Аналитические процедуры в оценке непрерывности деятельности организации // Аудиторские ведомости. 2016. № 3. С. 27 – 37.
21. Петров А.Н., Иванова Е.А. Использование logit-моделей в аудиторской практике для оценки непрерывности деятельности организации // Аудиторские ведомости. 2015. № 6. С. 12 – 26.
22. Паштова Л.Г., Емельянова М.О., Шашкова П.Г. Оценка риска банкротства крупных нефтяных корпораций // Финансовый вестник: финансы, налоги, страхование, бухгалтерский учет. 2014. № 11. С. 19 – 29.
23. Сизенко Д.А. Анализ показателей ликвидности и платежеспособности позволяет прогнозировать финансовую стратегию компании // Российский налоговый курьер. 2013. № 19. С. 6 – 9.
24. Постановление Правительства РФ от 14 августа 2012 г. № 825 «О порядке предоставления государственных гарантий Российской Федерации по кредитам либо облигационным займам, привлекаемым юридическими лицами на цели, установленные Правительством Российской Федерации в рамках мер, направленных на повышение устойчивости экономического развития при ухудшении ситуации на финансовых рынках» (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/70216210/> (дата обращения: 20.01.2020).
25. Приказ Минэкономразвития России от 26.06.2019 № 382 «Об утверждении Методики проведения анализа финансового состояния заинтересованного лица в целях установления угрозы возникновения признаков его несостоятельности (банкротства) в случае одновременной уплаты этим лицом налога и о признании утратившим силу приказа Минэкономразвития России от 18 апреля 2011 г. № 175» (Зарегистрировано в Минюсте России 22.07.2019 N 55338) [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_329594/ (дата обращения: 25.03.2020 г.).
26. Приказ Минэкономразвития РФ от 21 апреля 2006 г. № 104 «Об утверждении Методики проведения Федеральной налоговой службой учета и анализа финансового состояния и платежеспособности стратегических предприятий и организаций» (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/12147934/> (дата обращения: 25.03.2020 г.).
27. Приказ Минфина РФ от 06.11.2001 № 274 (ред. от 15.02.2002) «Об утверждении Порядка проверки текущего финансового состояния организации – получателя бюджетного кредита» (вместе с «Порядком проверки текущего финансового состояния организации – получателя бюджетного кредита на осуществление инвестиционных проектов в угольной отрасли, размещаемых на конкурсной основе») [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34136/ (дата обращения: 25.03.2020 г.).

28. Национальный стандарт Российской Федерации «Менеджмент организации. Руководящие указания по достижению экономического эффекта в системе менеджмента качества» (утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18.12.2008 г. № 472-ст) [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200068728/> (дата обращения: 25.03.2020 г.).
29. Глушакова О.В., Сычева-Передеро О.В. Корпоративная стратегия антикризисного управления имуществом комплексом организации. – Новосибирск: САФБД, 2017. – 283 с.

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. 5, pp. 379–388.

INTEGRAL ASSESSMENT OF CORPORATE STRATEGIES IMPLEMENTATION EFFICIENCY OF FERROUS METALLURGY ENTERPRISES

O.V. Glushakova, O.P. Chernikova, S.A. Strekalova

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. Study of Russian researchers' works, as well as official methods devoted to various issues of evaluating performance of enterprises, allowed us to conclude that these methods are generally not focused on environmental factors specific to the industry. Availability of strategic management tools to clearly identify enterprise's position in the same industry segment is in high demand in the context of changes rate increase and ability to adjust the strategy. The study is based on methodological premise that in enterprises with corporate strategies have remained stable in conditions of crisis processes in economy. Using a toolkit based on benchmarking, gap analysis and process approach, and sets of key indicators of efficiency of the basic functional strategies implementation (financial, marketing, technological strategies and human resource management strategy), we have made an integral assessment of the results of corporate strategies implementation in Russian ferrous metallurgy enterprises in conditions of 2014 crisis. We have defined the "best in class" enterprises and "potential bankrupts" in 2014 which has allowed us to calculate average values and median value for ferrous metallurgy enterprises, to identify position of each enterprise and to assess the gap of integral efficiency indicators of basic functional strategies and corporate strategy implementation.

Keywords: corporate strategy, implementation efficiency, basic functional strategies, key indicators, crisis processes, gap analysis, ferrous metallurgy enterprises.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-379-388

REFERENCES

1. Malina M.A., Selto F.H. *Communicating and controlling strategy: An empirical study of the effectiveness of the Balanced Scorecard* (April 2001). Available at URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.278939>. (Accessed 20.01.2020).
2. Campbell D., Datar S., Kulp S., Narayanan V.G. *Using the Balanced Scorecard as a control system for monitoring and revising corporate strategy* (September 5, 2002). Harvard NOM Working Paper, no. 02-35. Available at URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.328880>. (Accessed 20.01.2020).
3. Lokanandha R.I. *Performance measurement using Balanced Score Card* (April 10, 2007). Available at URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.980691>. (Accessed 20.01.2020).
4. Silvi R., Macri D.M., Tagliaventi M.R. *Performance measurement systems: putting organizational effectiveness ahead*. Available at URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1012622>. (Accessed 20.01.2020).
5. Dekimpe M.G., Hanssens D.M. *Persistence modeling for assessing marketing strategy performance*. ERIM Report Series Reference, no. ERS-2003-088-MKT. Available at URL: <https://ssrn.com/abstract=474428>. (Accessed 20.01.2020).
6. Farris P., Parry M.E., Borden N., Venkatesan R., Sharpe K. *The seven questions of marketing strategy*. Darden Case, no. UVA-M-0779. Available at URL: <https://ssrn.com/abstract=1584114>. (Accessed 20.01.2020).
7. El-Shishini H.M. *Integrating financial and non-financial performance measures: The state of the art and research opportunities*. Presented at the Management Accounting Research Group Conference, Aston Business School. Available at URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.283651>. (Accessed 20.01.2020).
8. Huselid M.A. The impact of human resource management practices on turnover, productivity, and corporate financial performance. *Academy of Management Journal*. 1995, vol. 38, no. 3, pp. 635–672.
9. Filatotchev I., Guest D., Piesse J., Jackson G., Gospel H. *Corporate governance, human resource management and firm performance*. DTI Economics Working Paper, no. 13. Available at URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.906023>. (Accessed 20.01.2020).
10. Augier M., Teece D.J. Dynamic capabilities and the role of managers in business strategy and economic performance. *Organization Science*. 2009, vol. 20, no. 2, pp. 410–421.
11. Teece D.J. *Dynamic capabilities and strategic management: Organizing for innovation and growth: organizing for innovation and growth*. Oxford: University Press, 2009, 320 p.
12. Cappa F., Cetrini G., Oriani R. *The impact of corporate strategy on capital structure: evidence from Italian listed firms*. The Quarterly Review of Economics and Finance, 2019. Available at URL: <https://doi.org/10.1016/j.qref.2019.09.005>. (Accessed 20.01.2020).
13. Khémiri W., Noubbigh H. Determinants of capital structure: Evidence from Sub-Saharan African firms. *The Quarterly Review of Economics and Finance*. 2018, vol. 70, pp. 150–159.
14. Lowe J., Naughton T., Taylor P. The impact of corporate strategy on the capital structure of Australian companies. *Managerial and Decision Economics*. 1994, vol. 15, no. 3, pp. 245–257.
15. Menéndez-Alonso E.J. Does diversification strategy matter in explaining capital structure? Some evidence from Spain. *Applied Financial Economics*. 2003, vol. 13, no. 6, p. 427–430.
16. Avrashkov L.Ya., Grafova G.F., Shakhvatova S.A. On the normative values of coefficients in rating assessment of financial and economic condition of the enterprise. *Auditor*. 2015, no. 5, pp. 40–51. (In Russ.).
17. Bazhenov O.V. Comprehensive analysis of financial condition of copper industry enterprises based on financial statements in accordance with Russian Accounting Standards and IFRS. Comparability of the results. *Mezhdunarodnyi bukhgalterskii uchët*. 2013, no. 36, pp. 2–9. (In Russ.).
18. Kramin T.V., Mirgaleeva I.V. Development of corporate strategy for managing value of an industrial enterprise. *Aktual'nye problemy ekonomiki i prava*. 2015, no. 1, pp. 187–191. (In Russ.).
19. Legotin F.Ya., Berdyugina L.A., Pryakhin L.A., Gorulev D.P. *Otsenka effektivnosti antikrizisnogo upravleniya* [Evaluation of crisis management effectiveness]. Ekaterinburg: izd. Ural'skogo gos. ekon. un-ta, 2005, 52 p. (In Russ.).
20. Martynova T.A., Naniz K.R. Analytical procedures in assessing continuity of organization activity. *Auditorskie ведомosti*. 2016, no. 3, pp. 27–37. (In Russ.).

21. Petrov A.N., Ivanova E.A. Application of logit-models in audit practice for assessment of continuity of the organization activity. *Auditorskie vedomosti*. 2015, no. 6, pp. 12–26. (In Russ.).
22. Pashtova L.G., Emel'yanova M.O., Shashkova P.G. Bankruptcy risk assessment of large oil corporations. *Finansovyi vestnik: finansy, nalogi, strakhovanie, bukhgalterskii uchët*. 2014, no. 11, pp. 19–29. (In Russ.).
23. Sizenko D.A. Analysis of liquidity and solvency indicators allows prediction of the company's financial strategy. *Rossiiskii nalogoviy kur'er*. 2013, no. 19, pp. 6–9. (In Russ.).
24. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 14 avgusta 2012 g. № 825 "O poryadke predostavleniya gosudarstvennykh garantii Rossiiskoi Federatsii po kreditam libo obligatsionnym zaimam, privilekaemym yuridicheskimi litsami na tseli, ustanovlennye Pravitel'stvom Rossiiskoi Federatsii v ramkakh mer, napravlennykh na povysheenie ustoychivosti ekonomicheskogo razvitiya pri ukhudenii situatsii na finansovykh rynkakh" (s izmeneniyami i dopolnениями)* [Decree of the Government of the Russian Federation dated August 14, 2012 No. 825 "On the procedure for provision of the Russian Federation state guarantees for loans or bond loans obtained by legal entities for the purposes established by the Government of the Russian Federation as part of measures aimed at increasing sustainability of economic development under worsening situation in the financial markets "(with amendments and additions)]. Available at URL: <https://base.garant.ru/70216210/> (Accessed 20.01.2020). (In Russ.).
25. *Prikaz Minekonomrazvitiya Rossii ot 26.06.2019 № 382 "Ob utverzhdenii Metodiki provedeniya analiza finansovogo sostoyaniya zainteresovannogo litsa v tselyakh ustanovleniya ugrozy vozniknoveniya priznakov ego nesostoyatel'nosti (bankrotstva) v sluchae edinovremennoi uplaty etim litsom naloga i o priznanii utrativshim silu prikaza Minekonomrazvitiya Rossii ot 18 aprelya 2011 g. № 175" (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 22.07.2019 N 55338)* [Order of the Ministry of Economic Development dated 26.06.2019 No. 382 "On approval of the methodology of analysis of the financial condition of the person concerned to establish the threat of insolvency (bankruptcy) signs occurrence in case of lump-sum payment by that person of the tax and appreciation to the Institute become invalid for the order of Ministry of Economic Development of Russia dated April 18, 2011 No. 175" (Registered in Ministry of Justice of Russia 22.07.2019 No. 55338)]. Available at URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_329594/ (Accessed 25.03.2020). (In Russ.).
26. *Prikaz Minekonomrazvitiya RF ot 21 aprelya 2006 g. № 104 "Ob utverzhdenii Metodiki provedeniya Federal'noi nalogovoi sluzhboi ucheta i analiza finansovogo sostoyaniya i platezhеспособности strategicheskikh predpriyatiy i organizatsii" (s izmeneniyami i dopolnениями)* [Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation dated April 21, 2006, No. 104 "On approval of the methodology of accounting and analysis by the Federal tax service of the financial condition and solvency of strategic enterprises and organizations" (with amendments and additions)]. Available at URL: <https://base.garant.ru/12147934/> (Accessed 25.03.2020). (In Russ.).
27. *Prikaz Minfina RF ot 06.11.2001 № 274 (red. ot 15.02.2002) "Ob utverzhdenii Poryadka proverki tekushchego finansovogo sostoyaniya organizatsii – poluchatelya byudzhernogo kredita" (vmeste s "Poryadkom proverki tekushchego finansovogo sostoyaniya organizatsii – poluchatelya byudzhernogo kredita na osushchestvlenie investitsionnykh projektov v ugol'noi otrasli, razmeshchaemykh na konkursnoi osnove")* [Order of the Ministry of Finance of the Russian Federation dated November 6, 2001 No. 274 (as amended on February 15, 2002) "On approval of the Procedure of checking current financial condition of an organization - budget loan recipient" (along with "Procedure of checking current financial condition of an organization - recipient of budget loan for investment – investment projects in the coal industry, provided on competitive basis)]. Available at URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34136/ (Accessed 25.03.2020). (In Russ.).
28. *Natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii "Menedzhment organizatsii. Rukovodyashchie ukazaniya po dostizheniyu ekonomicheskogo efekta v sisteme menedzhmenta kachestva" (utv. Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 18.12.2008 g. № 472-st)* [National standard of the Russian Federation "Organization management. Guidelines for achieving economic effect in quality management system" (approved by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 18, 2008 No. 472-st)]. Available at URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200068728/> (Accessed 25.03.2020). (In Russ.).
29. Glushakova O.V., Sycheva-Peredero O.V. *Korporativnaya strategiya antikrizisnogo upravleniya imushchestvennym kompleksom organizatsii* [Corporate strategy for crisis management of the organization assets]. Novosibirsk: SAFBD, 2017, 283 p. (In Russ.).

Information about the authors:

- O.V. Glushakova**, Dr. Sci. (Economics), Professor of the Chair of Economics, Accounting and Financial Markets (trinity@ktk.company)
- O.P. Chernikova**, Cand. Sci. (Economics), Assist. Professor, Head of the Chair of Economics, Accounting and Financial Markets (chernikovaop@yandex.ru)
- S.A. Strekalova**, Senior Lecturer of the Chair of Economics, Accounting and Financial Markets (strekalova.S.A@yandex.ru)

Received December 5, 2019

Revised January 20, 2020

Accepted January 24, 2020

УДК 51.7

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ, ИССЛЕДОВАНИЯХ И МАЛОЭНЕРГОЕМКИХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Цымбал В.П., д.т.н., профессор кафедры прикладных информационных технологий
и программирования (tsymbal33@mail.ru)

Буинцев В.Н., к.т.н., доцент кафедры прикладных информационных технологий
и программирования

Кожмяченко В.И., к.т.н., доцент кафедры прикладных информационных технологий
и программирования (vadim@itm.sibsiu.ru)

Калашиников С.Н., д.т.н., профессор кафедры прикладных информационных технологий
и программирования

Сеченов П.А., к.т.н., доцент кафедры прикладных информационных технологий
и программирования (sechenov.p.a.1989@gmail.com)

Сибирский государственный индустриальный университет
(6540007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Представлена ретроспектива научной и учебной деятельности творческого коллектива кафедры прикладных информационных технологий и программирования. В момент организации (в 1980 г.) коллективом кафедры была поставлена задача: создать специалистов нового плана (проблемных программистов), одновременно владеющих методами исследования и математического описания конкретных объектов (в том числе металлургических) и программирования для ЭВМ. По специальному приказу Министерства высшего образования РСФСР была создана в опытном порядке новая специализация: «Математическое обеспечение и ЭВМ в металлургии», которая после 20-летнего педагогического эксперимента переросла в специальность «Информационные системы и технологии (по отраслям)». Кафедра начала первой выпускать таких специалистов не только в регионе, но и в стране, этот опыт затем был воспринят другими вузами. Коллектив вновь созданной кафедры одним из первых в стране начал создавать математические модели металлургических процессов, а затем тренажеры и обучающие системы на их основе. В качестве педагогической концепции был принят деятельностный подход к обучению на основе математической модели конкретной предметной области, многолетний опыт применения такого подхода показал его высокую эффективность. Впервые в мировой металлургии создана концепция и комплекс моделей принципиально нового металлургического процесса и агрегата с элементами самоорганизации, отличающегося на порядок меньшим удельным объемом и в полтора раза меньшими энергозатратами. Совместно с проектировщиками и специалистами Запсибметкомбината создана крупномасштабная опытная установка процесса и агрегата СЭР, на которой подтверждена правильность выдвинутой концепции, отработаны основные конструктивные моменты, показана практическая реализуемость ряда новых разработанных технологий. В процессе создания нового процесса разработаны программно-инструментальные системы: алгоритм расчета взаимосвязанных параметров процесса и агрегата, система «Инжиниринг – Металлургия», система моделирования сложных процессов теплообмена, система имитационного моделирования от уровня частиц с использованием метода Монте-Карло.

Ключевые слова: научная деятельность, учебная деятельность, математические модели, тренажеры, обучающие системы, теория самоорганизации, новый металлургический процесс.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-389-399

ВВЕДЕНИЕ

Начало 90-х гг. совпало с ускорением процесса смены поколений электронно-вычислительных машин (ЭВМ), каждые два года быстродействие которых удваивалось. Стали появляться достаточно надежные управляющие ЭВМ, но для их эффективного применения необходимо было создавать прикладное математическое и программное обеспечения, а также готовить специалистов, владеющих этими вопросами. Особенно большой разрыв между возросшими возможностями

ЭВМ и недостаточной эффективностью их использования наблюдали в металлургии.

Научный коллектив (образовавшийся в 1980 г.) кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ в металлургии» (с 1997 г. кафедра «Информационные технологии в металлургии (ИТМ)») поставил задачу создать специалистов нового плана (проблемных программистов), одновременно владеющих методами исследования и математического описания конкретных объектов (в том числе металлургических) и программирования, и с самого начала своей деятельности ис-

поведовал принцип тесного единства науки и учебного процесса.

В результате по согласованию с Министерством черной металлургии СССР по специальному приказу Министерства высшего образования РСФСР была создана в опытным порядке в рамках специальности «Металлургия черных металлов» новая специализация – «Математическое обеспечение и ЭВМ в металлургии», которая после 20-летнего педагогического эксперимента переросла в специальность «Информационные системы и технологии (по отраслям)».

Кафедра первой начала выпускать таких специалистов не только в регионе, но и в стране, опыт затем был воспринят другими вузами (УрФУ, МИСиС, ЛПУ). Кафедра ИТМ первой в университете еще в 1999 г. лицензировала и 10 лет выпускала магистров по направлению «Металлургия», а с 2012 г. также первой начала выпускать магистров по направлению «Информационные системы и технологии». Вследствие этого в период с 1986 по 2005 гг. выпускники кафедры ИТМ заняли преимущественные позиции в подразделениях многих предприятий, так или иначе связанных с информационными технологиями. В настоящее время в г. Новокузнецк и регионе многие наши выпускники стали руководителями предприятий и подразделений по информационным технологиям и частных фирм, а также бизнесменами.

В последние годы география распространения наших выпускников расширилась, многие из них работают в различных городах России (Новосибирск, Москва, Санкт-Петербург, Воронеж и др.), а также других странах (США, Канада, Австралия, Германия), продолжают обучение в магистратуре в США, Канаде, Германии.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

И ТРЕНАЖЕРНО-ОБУЧАЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Ядро научного коллектива В.П. Цымбал, В.Н. Буинцев, А.Ф. Сакун, А.Г. Падалко, Н.А. Калиногорский, несколько позже С.П. Мочалов, одними из первых в стране начали создавать математические модели металлургических процессов, а затем тренажеры и обучающие системы на их основе.

В качестве педагогической концепции был принят деятельностный подход к обучению на основе математической модели конкретной предметной области (рис. 1).

На первом уровне обучающийся, используя модель как заместитель объекта, самостоятельно выполняет какой-то вид деятельности (выплавку металла). При этом он ориентируется на выполнение конкретных технико-экономических показателей, например, минимизацию затрат на выполнение этой операции при условии выполнения заданных ограничений по химическому составу и температуре металла. Естественно, что прежде чем выйти на уровень самообучения, необходимо получить определенный объем концептуальных

(теоретических) знаний об этой предметной области. Второй уровень предназначен для управления самообучением по конкретным дидактическим критериям, которые позволяют путем последовательного усложнения заданий и объективного контроля их выполнения добиваться определенной степени обученности на каждом из уровней классической психолого-педагогической триады знания – умения – навыки.

Многолетний опыт применения такого подхода показал его высокую эффективность. Возможность и наглядность оценки знаний по конкретным числовым, в том числе стоимостным критериям, создает дополнительную мотивацию для обучающихся.

В 1981 – 1986 гг. только для Минчермета Украины было создано 15 тренажеров для операторов различных металлургических агрегатов, даже была создана специальная лаборатория, которая осуществляла комплектацию и монтаж тренажеров для металлургических техникумов на основе разработок творческого коллектива (В.Н. Буинцев, А.Ф. Сакун, А.Г. Падалко, С.П. Мочалов, С.Н. Калашников). Были также разработаны тренажеры для Западно-Сибирского, Магнитогорского и Карагандинского металлургических комбинатов. Тренажер «Сталевар» в отделе технического производства Кузнецкого металлургического комбината проработал 15 лет. На рис. 2 представлен фрагмент пульта управления первого тренажера «Сталевар» и его разработчики (А.Ф. Сакун, А.Г. Падалко, В.П. Цымбал, В.Н. Буинцев), они же организаторы новой кафедры и лаборатории тренажеров.

В период с 1986 по 1992 гг. был создан ряд тренажерно-обучающих систем, теперь уже на основе появившихся в то время персональных компьютеров, в том числе, для системы профессионального образования в Санкт-Петербурге. По этим направлениям творческий коллектив занял ведущие позиции в стране.

В последние годы коллективом создан ряд электронных учебников с тренажерными практикумами для интерактивного обучения, основным дидактическим под-

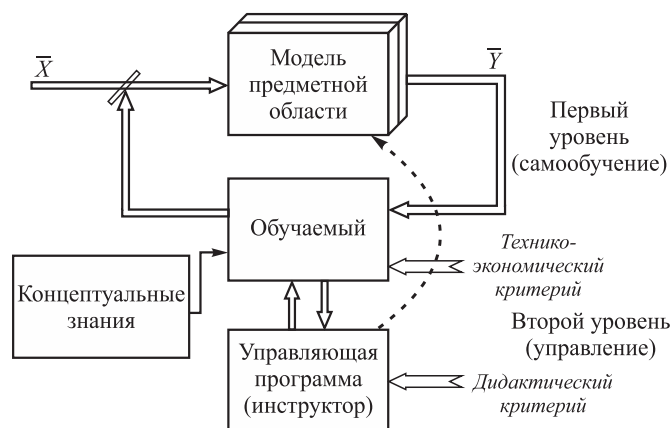


Рис. 1. Структура тренажерно-обучающей системы

Fig. 1. Structure of the training system



Рис. 2. Тренажер «Сталевар» и его создатели

Fig. 2. “Steelmaker” simulator and its designers

ходом в которых является последовательная реализация упомянутой выше триады знания – умения – навыки при условии объективного контроля степени обученности.

МЕХАНИЗМЫ И МОДЕЛИ САМООРГАНИЗАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИИ

Существование процессов самоорганизации в жидкой сталеплавильной ванне мартеновской печи было убедительно показано профессором М.Я. Меджибожским в его экспериментах по продувке ванны сжатым воздухом. В этих экспериментах довелось участвовать В.П. Цымбалу во время обучения в аспирантуре в 1961 г. Зрелище «самораскипающейся» мартеновской ванны, наблюдаемое при снижении расхода топлива (то есть увеличении избытка кислорода в газовой фазе над ванной), было впечатляющим и оставило глубокий след в сознании, в том числе при разработке математической модели процесса обезуглероживания.

Несколько позже (в 1970 – 1975 гг.) эффект этого явления был воплощен в жизнь благодаря тому, что коллективом (В.Н. Буинцев, А.Г. Падалко, А.Ф. Сакун, Е.Ф. Хорошавин и др.) были созданы простые аналоговые вычислительные устройства на ферродинамических датчиках для определения избытка воздуха в газовой фазе мартеновской печи над теоретически необходимым для сжигания топливом. Разработка оптимизированных тепловых инструкций к этим вычислительным устройствам [1] и обучение персонала на созданном несколько позже тренажере «Сталевар» позволили получить большой экономический эффект: от 10 до 20 тыс. т топливного мазута в год. Этот эффект был достигнут практически «из ничего» (если не считать небольших затрат на простые вычислительные устройства). При этом на 10 % был снижен расход условного топлива и на 12 % расход руды. Это было достигнуто за счет использования эффекта «раскипания» ванны, т. е. за счет поглощения ванной горячего избыточного кислорода из газовой фазы печи. Это был первый впечатляющий эффект самоорганизации.

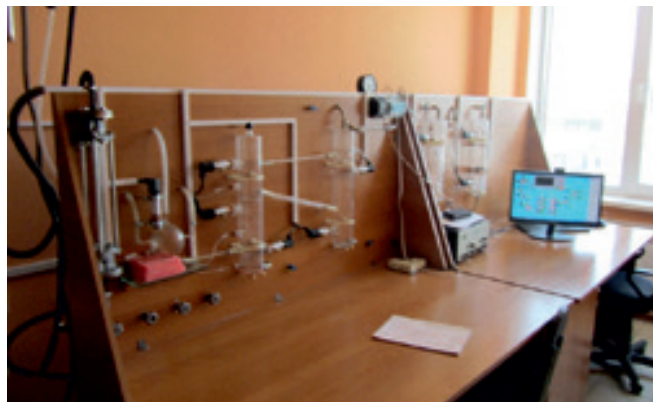


Рис. 3. Низкотемпературная физическая модель процесса СЭР

Fig. 3. Low-temperature physical model of JER process

В 1981 г. в серии «Математика, кибернетика» вышла обзорная брошюра С.П. Курдюмова и Г.Г. Малинецкого «Синергетика – наука о самоорганизации» [2] со ссылкой на появившиеся в русском переводе основополагающие труды по теории самоорганизации (синергетике) И. Пригожина [3] и Г. Хакена [4]. Появление этой теории явилось приятным сюрпризом, потому что в результате предыдущих исследований мы были подготовлены к восприятию этих идей.

В результате более глубокого изучения этих и вскоре появившихся других работ [5 – 7] этого направления возникла мысль создать принципиально новый металлургический процесс и агрегат, в котором можно было бы реализовать некоторые принципы этой теории. Была создана низкотемпературная физическая модель (рис. 3), на которой показана возможность реализации таких принципов, как большое отклонение от термодинамического равновесия, минимальное принуждение, круговая подчиненность, а также создание стационарного колебательного режима [8]. Конструктивно это достигали путем создания вынужденного движения двухфазной рабочей среды в замкнутой системе под давлением.

По результатам демонстрации этой модели руководителям Западно-Сибирского металлургического комбината Б.А. Кустову и Р.С. Айзатулову¹ было принято решение о создании опытной установки, предназначенной для переработки пылевидных отходов: омазочной окалины прокатного производства, шлама газоочисток, отработанных масел и др.

САМООРГАНИЗУЮЩИЙСЯ СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННЫЙ РЕАКТОР

При проектировании нового процесса были реализованы следующие принципы [8, 9]:

¹ В работе принимали участие И.А. Рыбенко, С.П. Мочалов, А.Б. Юрьев, В.В. Соколов, В.П. Тютюльников, С.В. Щипанов, А.А. Рыбушкин, Е.В. Суздальцев, К.М. Шакиров, А.Г. Падалко, Е.И. Ливерц, С.Ю. Красноперов.

– создание большой реакционной поверхности и двухфазной рабочей смеси (газовзвеси или эмульсии), то есть перевод процесса в область газодинамики, что позволило получить большие скорости физико-химических процессов;

– организация вынужденного движения рабочей (реакционной) смеси в замкнутой системе под давлением, что позволило создать значительное отклонение от термодинамического равновесия и одновременно решить задачу внутреннего транспорта продуктов реакции через все последовательно соединенные аппараты;

– использование нелинейной зависимости скорости течения двухфазной среды от газосодержания [10] для создания потенциала давления за счет эффекта газодинамического запирания соединительного канала;

– создание диссипативных структур, существенно отклоненных от термодинамического равновесия, что позволило получить большие возможности по управлению химическим составом металла и шлака [9].

Использование описанных выше подходов и принципов позволило создать агрегат с очень малыми удельным объемом и энергоемкостью [8, 9]. Технологическая схема агрегата СЭР (самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор) представлена на рис. 4.

Основу технологической схемы мини-модуля составляют [8] система подачи шихты 1 – 5, реактор-ос-

циллятор 6, соединительный канал с газодинамическим samozапираем 7, рафинирующий отстойник 8, одновременно играющий роль первой ступени мокрой газоочистки, копильник 9, система гарнисажного охлаждения 10, канал 11 для выдачи газошлаковой эмульсии и канал 12 для перетока части газа, шлакоприемник 13 с гранулятором 14, конвейер 15, приемный ковш 16, система утилизации тепла в кипящем слое или реформации дымовых газов в синтез-газ 17, система газоочистки 18.

Созданный в реакторе-осцилляторе 6 высокий потенциал давления, а также полная изоляция процесса от атмосферы позволяют проталкивать продукты реакций через все находящиеся за основным технологическим агрегатом устройства утилизации энергии без использования высокотемпературных побудителей расхода.

Пылевидная шихта, состоящая из смеси оксидов металлов и твердых восстановителей, эффективно диспергируется в реакторе-осцилляторе 6, в котором создается газовзвесь с объемной долей газа порядка 0,99. Вследствие зависимости скорости истечения двухфазной среды от газосодержания в соединительном канале 7 образуется аэродинамически запираемый затвор (торможение струи), а в сочетании с обратной связью по газосодержанию (за счет изменения условий протекания химических реакций, а также условий подачи в реактор шихты и кислорода) имеется возможность

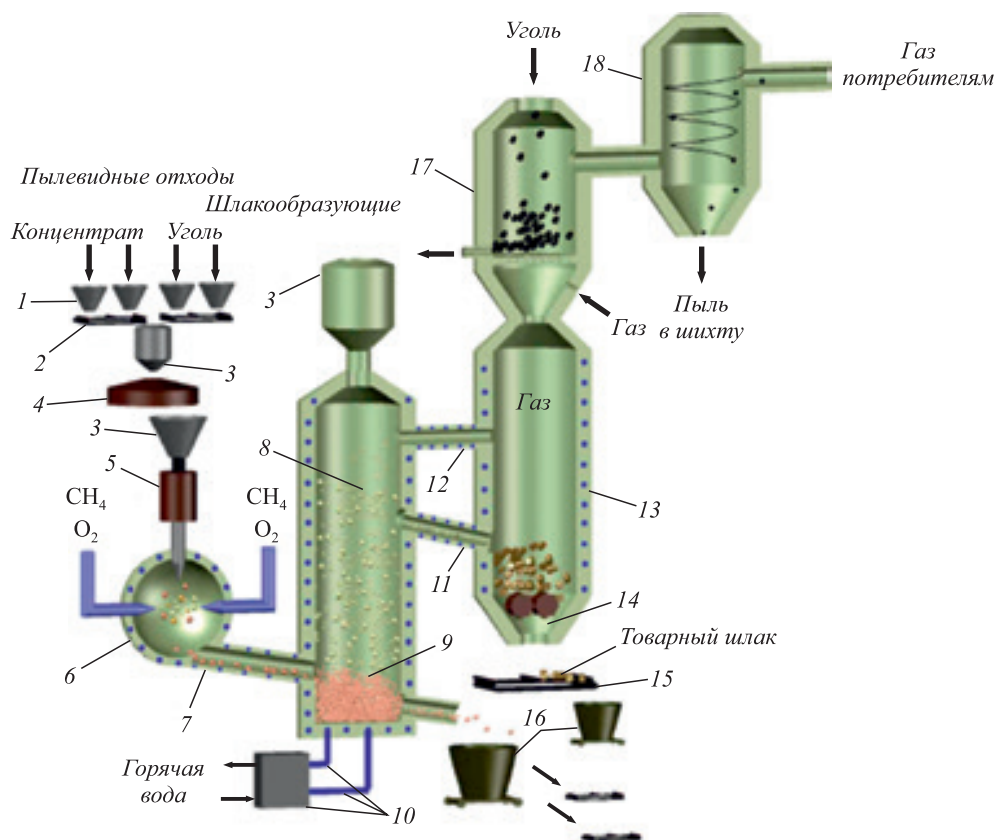


Рис.4. Технологическая схема агрегата СЭР

Fig. 4. Technological scheme of the JER unit

создавать стационарный колебательный режим (самоорганизующийся реактор-осциллятор) [8].

В связи с высокой интенсивностью протекающих в агрегате газодинамических процессов течения агрессивной двухфазной среды защита всех элементов агрегата осуществляется на основе циркуляционного гарнисажного охлаждения. Для решения этой задачи разработана специализированная автоматизированная система проектирования и расчета, которая может также выполнять функции диагностики при реализации такой системы охлаждения и поддержания гарнисажа [8].

СОСТОЯНИЕ, РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ

Описанный выше процесс и агрегат был реализован в виде крупномасштабной опытной установки во втором конвертерном цехе № 2 ЗСМК на освободившейся площадке перелива чугуна (рис. 5). Всего в создании установки и проведении экспериментов участвовало более 50 человек. Организация и проведение экспериментов подробно описаны в монографии [8]. Из числа опытных металлургов-практиков была создана бригада сталеваров под руководством В.П. Тютюльникова, которая сыграла важную роль в совершенствовании конструкции установки и проведении уникальных экспериментов (рис. 6). В этом эксперименте высокотемпературная двухфазная струя «выстреливалась» из шарообразного реактора на футерованную площадку, что позволило получить ценные данные о физических и химических свойствах частиц, вылетающих из первого реактора, скоростях химических реакций и др., а также идентифицировать математические модели. С 1992 по 2001 гг. на этой установке было проведено 40 серий экспериментов, которые позволили подтвердить правильность заложенных теоретических и конструктивных решений и усовершенствовать конструкцию установки.

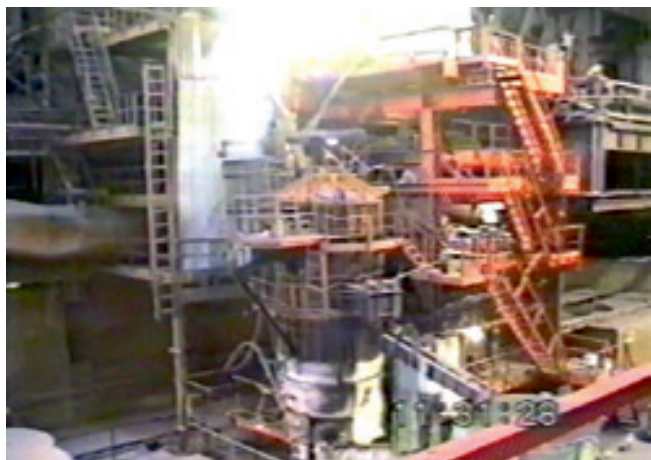


Рис. 5. Общий вид опытной установки

Fig. 5. General view of the pilot unit

Было разработано и проверено экспериментально несколько новых малоэнергоёмких технологий, в том числе прямое восстановление пылевидных руд и отходов (шламов, омазученной окалины) без агломерации, получение марганцевых сплавов из бедных пылевидных руд, разделение титано-магнетитовых концентратов на железо и кондиционный титанистый шлак. Процесс был запатентован в основных металлопроизводящих странах (США, Япония, Южная Корея, ряд Европейских стран, Россия).

ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ – ПЕРЕРАБОТКА ПЫЛЕВИДНЫХ ОТХОДОВ

Разработанный процесс и агрегат обладает определенной степенью универсальности. Имеется возможность путем изменения режима продувки и степени дожигания топлива-восстановителя перерабатывать пылевидные материалы с широким диапазоном изменения химического состава, в том числе бедные пылеватые руды и хвосты обогащения. Кроме того, агрегат СЭР можно использовать в качестве газификатора пылевидных фракций угля, но наиболее экономичным является вариант с использованием смеси угля и пылевидных железосодержащих отходов. При этом облегчается процесс поддержания стабильного слоя шлако-металлической эмульсии, внутри которой сжигается топливо, а также снижается расход газообразного кислорода за счет использования кислорода из оксидов железа.

Необходимо подчеркнуть целесообразность ориентации на первом этапе реализации производственной программы на получение первородной шихтовой заготовки для электросталеплавильных печей. Дело в том, что, несмотря на возросшие трудности реализации готового проката, рынок оборотного лома остается ненасыщенным, а стоимость лома находится на уровне себестоимости чугуна. В России в последние годы построено и планируется строительство нескольких



Рис. 6. Высокотемпературная струя из первого реактора

Fig. 6. High-temperature jet from the first reactor

мини-заводов, в связи с чем дефицит лома возрастет. Исключение составляет только Уральский регион, где имеется много старых закрытых или реконструируемых заводов [11].

Все острее становится проблема загрязнения обогатительного лома неокисляемыми примесями (медь, никель и др.), что не позволяет выплавлять некоторые марки стали или ухудшает качество металла. В связи с этим в шихту электросталеплавильных печей приходится добавлять железо прямого восстановления (окашки или брикеты), которое значительно дороже лома [12], а при дальних его перевозках существует опасность самовозгорания. Кроме того при использовании брикетов значительно возрастают затраты энергии и количество шлака [13, 14].

Этих недостатков лишена первородная шихтовая заготовка, которую планируется получать из шлама и окислы по предлагаемой технологии [8], которая отличается низкими энергетическими затратами и капиталоемкостью по сравнению с известными процессами прямого восстановления [15 – 18]. Так, например, по результатам европейских исследований и сравнительного анализа технологий, направленных на снижение выбросов углекислого газа, утверждается, что «замена технологического маршрута «доменная печь – кислородный конвертер» на процессы прямого восстановления на основе использования природного газа и выплавки стали в электродуговых печах с целью сокращения выбросов оксида углерода CO_2 , вероятно, является экономически неэффективной» [19]. Примерно такая же оценка этой ситуации дается и в работе [20].

Ниже приведено сравнение технико-экономических показателей процесса СЭР с наиболее близким и продвинутом в мире аналогом – агрегатом КОРЕКС [21]:

Показатели	КОРЕКС	СЭР	Преимущество
Энергоемкость, ГДж/т	29	15 – 17	в 1,7 раза
Удельный объем, т/м ³ ·сут.	1,1	11,0	в 10,0 раз
Капитальные затраты, \$/т год	350	120 – 150	в 2,5 раза

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате многолетних работ по созданию нового металлургического процесса разработан ряд программно-инструментальных систем моделирования, которые позволяют значительно ускорить и облегчить процесс исследований.

1. *Алгоритм расчета взаимосвязанных параметров процесса и агрегата.* Создан [8] профессором С.П. Мочаловым и доцентом В.И. Кожемяченко. В связи с тем, что важнейшей предпосылкой для реализации основных принципов самоорганизации и, в первую очередь, большого отклонения от термодинамического равновесия является создание вынужденного движения

двухфазной среды (газовзвеси) в замкнутой системе, режимные параметры процесса и основные конструктивные параметры агрегата оказываются жестко, детерминированно связанными.

При этом для стационарного состояния связь между этими параметрами в общем виде описывается фундаментальным уравнением Менделеева-Клапейрона, а скорость течения двухфазной среды в соединительном канале определяется по уравнению, полученному на основе математической модели течения такой среды в высокотемпературных условиях [8]. Фрагмент алгоритма расчета представлен на рис. 7.

На основе этого алгоритма имеется возможность расчета режимных и конструктивных параметров системы последовательно соединенных аппаратов для любых заданных условий и производительности, что значительно облегчает проектирование, особенно на стадии научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы.

2. *Система «Инжиниринг – Металлургия»*, зарегистрированная в Федеральной службе по интеллектуальной собственности [22]. Создание этой системы оказалось возможным в результате многолетнего опыта термодинамических исследований д.т.н. И.А. Рыбенко. Эта система, объединяющая математические модели, базы данных [23] и алгоритмы оптимизации, позволяет решать широкий круг задач, особенно на этапе поисковых исследований. Содержание и взаимосвязь задач достаточно понятны из рис. 8.

3. *Система моделирования сложных процессов теплообмена.* Разработана С.Н. Калашниковым, С.П. Мочаловым, С.Ю. Красноперовым.

Задача исследования температурных полей в элементах конструкций со сложной геометрической областью в двумерном приближении реализуется на основе применения алгоритмов решения задач теплообмена в табличном процессоре Excel в составе MS Office 2000 и разработки VBA-приложений для организации работы алгоритма. Отличительной особенностью разработанного проекта является организация взаимосвязи ячеек табличного процессора в соответствии с геометрическими особенностями исследуемого объекта и алгоритма решения дифференциальных уравнений математической модели таким образом, что построение объекта исследования в табличной среде реализуется в автоматизированном режиме с помощью VBA-приложений. Кроме этого путем формирования критерия оптимизации в соответствии с требуемой естественно-физической постановкой задачи и реализации поставленной оптимизационной задачи с помощью оптимизатора (Solver) табличного процессора Excel возможно автоматизированное решение задачи выбора оптимальных конструктивных параметров проектируемых агрегатов.

Описанный выше подход использован при подборе оптимальных размеров соединительных фланцев ре-

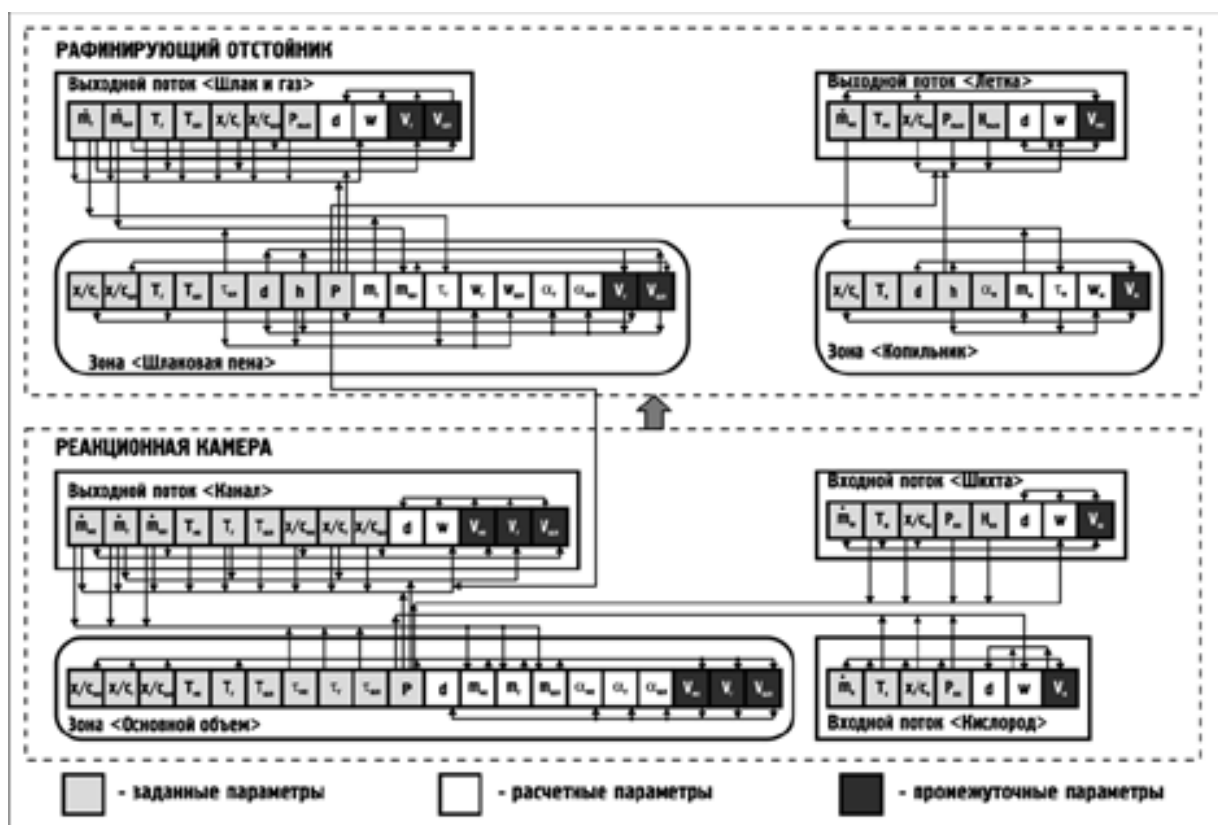


Рис. 7. Фрагмент алгоритма расчета взаимосвязанных параметров процесса и агрегата СЭР

Fig. 7. A fragment of the algorithm for calculating interrelated parameters of JER process and the unit

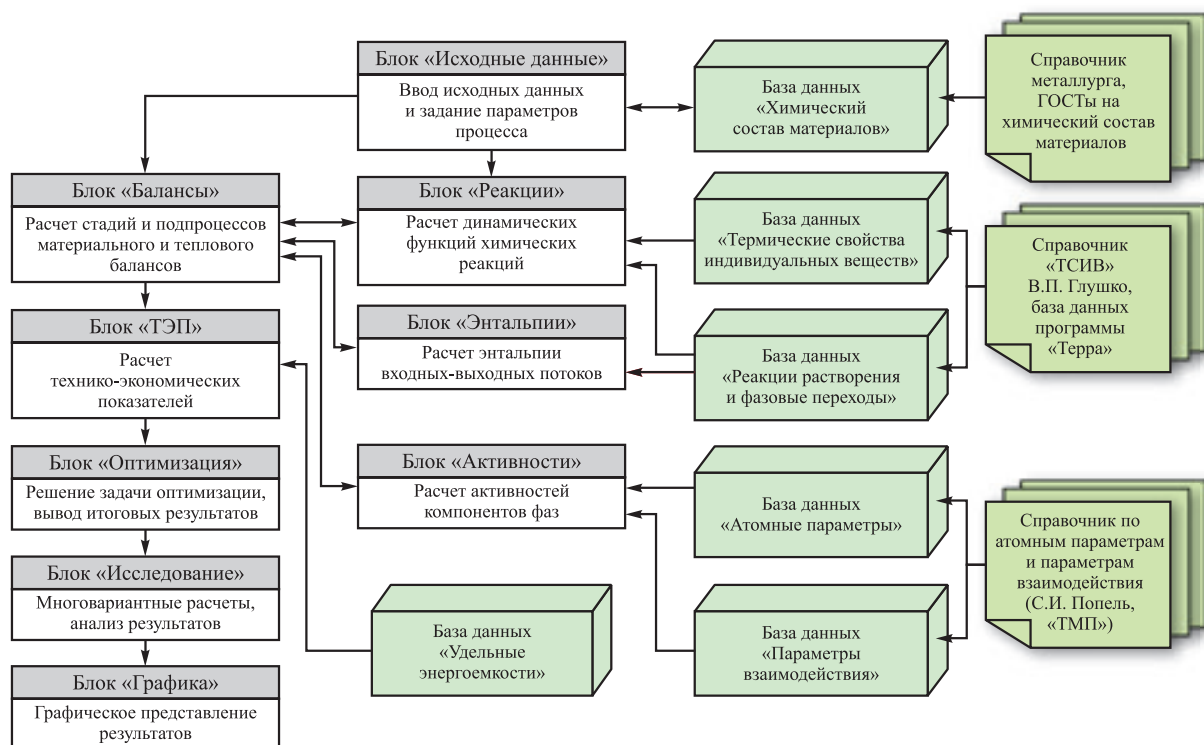


Рис. 8. Структурная схема инструментальной системы «Инжиниринг – Металлургия»

Fig. 8. Structural diagram of “Engineering – Metallurgy” instrumental system

актора и размеров каналов для движения воды в корпусе струйно-эмульсионного металлургического реактора [8]. На рис. 9 представлено температурное поле, установившееся во фланце и прилегающих к нему участках стенки реактора в одном из расчетов вычислительного эксперимента.

4. Система имитационного моделирования от уровня частиц с использованием метода Монте-Карло [24] разработана к.т.н. П.А.Сеченовым [25].

Интерфейс программы имитационного моделирования представлен на рис. 10. Ядром рассматриваемой ниже модели является процесс обтекания дисперсной частицы (шихты, продуктов реакций) вертикальным потоком газа с учетом действующих на нее сил. Учитываются также упругие и неупругие (слипание) взаимодействия и изменение состояния частиц во времени и в процессе слипания.

Алгоритм, разработанный для реализации этой модели [25], имеет развитую систему графического представления информации и интерактивный интерфейс, что позволяет проводить большой объем статистических исследований, добиваясь приближения к генеральной совокупности. Наряду с отображением результатов движения и взаимодействия частиц выводится информация об общем количестве частиц в реакторе, количестве частиц железной руды, углерода, шлака, железа, оксидов углерода CO и CO₂; средние массы

железной руды, шлака и железа за минуту; графики массового содержания соответствующих частиц. Также предусмотрена возможность изучения влияния количества подаваемых частиц железной руды, углерода и других параметров на состав металла, шлака и газа.

Тестирование показало работоспособность алгоритма и удовлетворительное совпадение конечных результатов имитационного моделирования с законом сохранения вещества. Созданная имитационная модель, являющаяся своеобразной «виртуальной реальностью», позволяет наглядно изучать механизм процессов в гравитационном сепараторе при разном гранулометрическом составе, оценивать среднее время пребывания частиц, определять средний расход частиц железа и шлака при различном заданном количестве частиц руды, углерода и др.

Развитие этого направления позволит решать широкий круг задач, связанных с моделированием существенно гетерогенных потоков, когда допущение о псевдогомогенности несостоятельно из-за широкого диапазона гранулометрического состава.

Выводы

Представлены основные результаты научных исследований авторского коллектива кафедры прикладных информационных технологий и программирова-

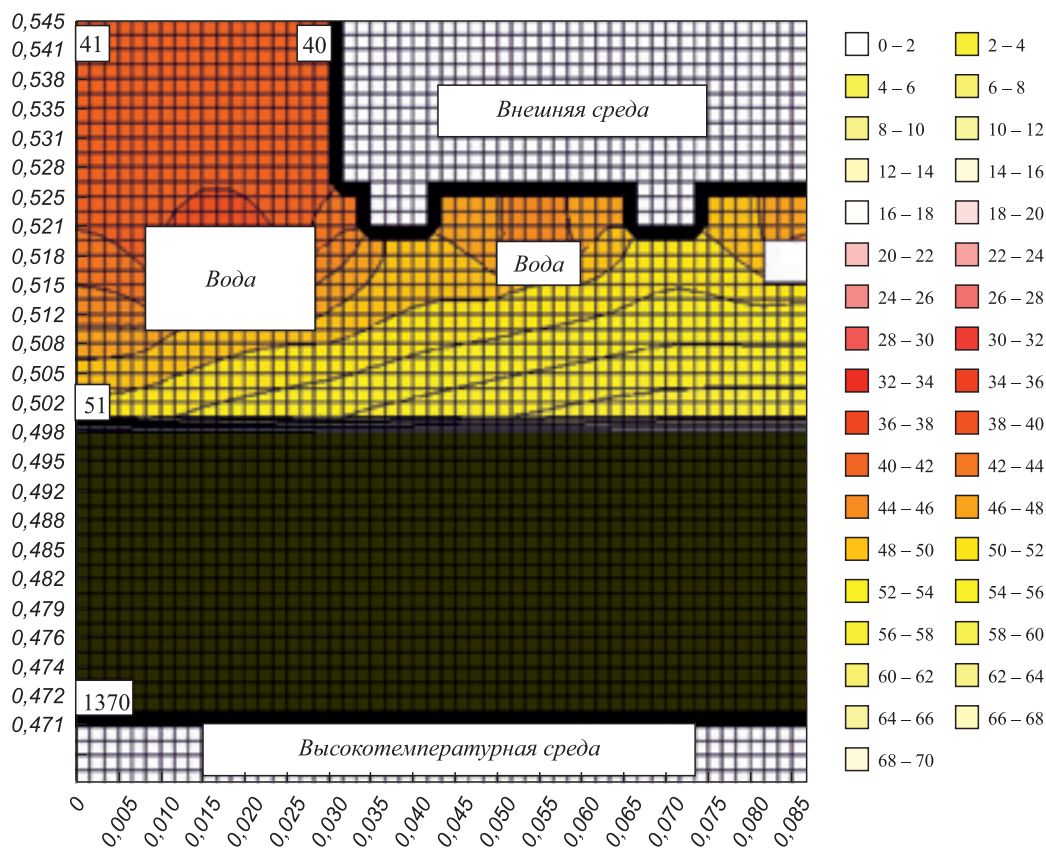


Рис. 9. Фрагмент моделирования температурных полей

Fig. 9. Fragment of temperature fields modeling

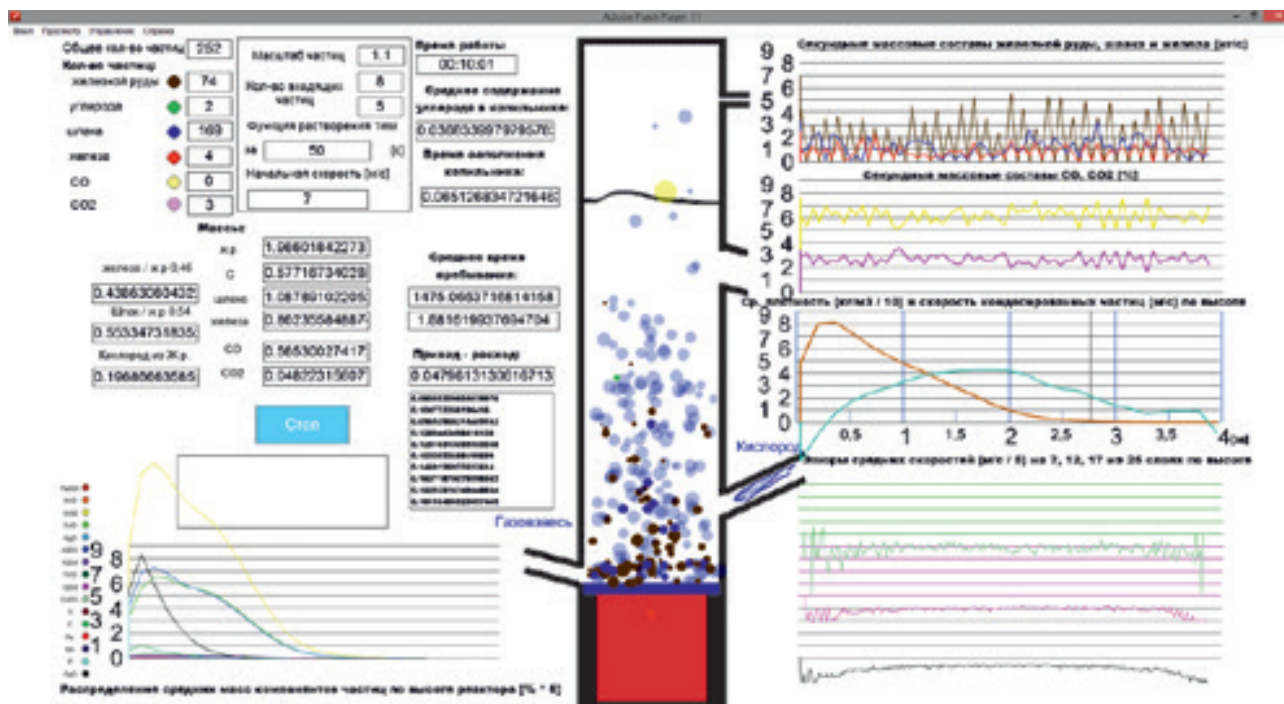


Рис. 10. Интерфейс программы имитационного моделирования

Fig. 10. Simulation program interface

ния, образованной сорок лет назад в опытном порядке по специальному разрешению Министерства образования и Министерства черной металлургии: многолетний педагогический эксперимент по созданию новой специальности, разработка тренажерно-обучающих систем и электронных учебников, создание нового струйно-эмульсионного металлургического процесса с использованием принципов самоорганизации, разработка программно-инструментальных систем моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цымбал В.П. Управление окислительной способностью мартеновской печи на основе статической модели с использованием саморегулирования кипящей ванны // Изв. вуз. Черная металлургия. 1975. № 4. С. 162 – 165.
2. Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика – теория самоорганизации. – М.: Знание, 1983. – 64 с.
3. Nicolis G., Prigogine I. Self-Organization in Non-Equilibrium Systems. – New York: Wiley, 1977. – 504 p.
4. Haken H. Synergetics. – Berlin: Springer, 1978. – 351 p.
5. Prigogine I., Stengers I. Order out of Chaos. Man's New Dialogue with Nature. – New York: Bantam Books, 1984. – 349 p.
6. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса. Новый подход к статистической теории открытых систем. – М.: Наука, 1990. – 320 с.
7. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Основания синергетики: Режимы с обострением, самоорганизация, темпомиры. – СПб.: Алетейя, 2002. – 414 с.
8. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор / В.П. Цымбал, С. П. Мочалов, И.А. Рыбенко и др. – М.: Металлургиздат, 2014. – 488 с.
9. Цымбал В.П., Мочалов С.П., Шакиров К.М. Управление составом получаемого металла при прямом восстановлении пылевидных материалов и отходов в агрегате СЭР // Металлург. 2015. № 2. С. 24 – 28.
10. Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Shreiber I.R. Wave Propagation in Gas-Liquid Media. – Boca Raton: CRC Press, 1993. – 222 p.
11. Гордон Я.М., Спирин Н.А., Швыдкий В.С. и др. Металлический лом – важный вторичный ресурс улучшения энергоэффективности и сбережения ресурсов в черной металлургии. – В кн.: Металлургия: технологии, инновации, качество. Ч. 1. – Новокузнецк, 2017. С. 390 – 400.
12. Korostelev A.A., S'emshchikov N.S., Semin A.E., etc. Increase in EAF lining life with use of hot-briquetted iron in a charge // Refractories and Industrial Ceramics. 2018. Vol. 59. No. 2. P. 107 – 114.
13. Люкхоф Я., Апфель Й., Буттлер Й. Использование различных видов металлошихты в электросталеплавиальном производстве // Черные металлы. 2017. № 10. С. 28 – 33.
14. Abd Elkader M., Fathy A., Eissa M., Sayed Sh. Effect of direct reduced iron proportion in metallic charge on technological parameters of EAF steelmaking process // ISIJ International. 2016. Vol. 5. No. 2. P. 2016 – 2024.
15. Sulimova M.A., Litvinova T.E. Metallurgical production waste treatment efficiency increase // Ecology, Economics, Education and Legislation Conference Proceedings, SGEM 2016. Vol. II. P. 569 – 575.
16. Дуарте П., Бесерра Х. Производство высокоуглеродистого железа прямого восстановления (DRI) по технологии Energiron DR // Черные металлы. 2016. № 6. С. 24 – 30.
17. Дорофеев Г.А., Янтовский П.Р., Смирнов К.Г., Степанов Я.М. Процесс ORIEN для выплавки высококачественных сталей из рудного и энергетического сырья на принципе самоэнергообеспечения // Черные металлы. 2017. № 5. С. 17 – 23.
18. Kinaci M.E., Lichtenegger T., Schneiderbauer S. Direct reduction of iron-ore in fluidized beds // 28th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Graz, AUSTRIA, 2018. Vol. 43. P. 217 – 222.
19. Шенк Й., Люнген Х.Б. Потенциал эффективного применения процессов прямого восстановления и восстановительной плавки в Европе // Черные металлы. 2017. № 2. С. 25 – 31.

20. Meijer K, van der Stel J., Zeilstra C. etc. The HIsarna ironmaking process // Proc. METEC and 2nd ESTAD, 15–19 June 2015, Düsseldorf, Germany. P. 15 – 19.
21. Basdag A., Arol A.I. Coating of iron oxide pellets for direct reduction // Scandinavian Journal of Metallurgy. 2002. Vol. 31. No. 3. P. 229 – 233.
22. Рыбенко И.А., Оленников А.А. Инжиниринг-Металлургия // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017617445; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 04.07.2017.
23. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. – М.: Металлургия, 1994. – 353 с.
24. Kroese D.P., Brereton T., Taimre T., Botev Z.I. Why the Monte Carlo method is so important today // Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. 2014. Vol. 6. No. 6. P. 386 – 392.
25. Tsymbal V., Olennikov A., Rybenko I. etc. 2017. Mathematical Modeling of SER Jet-Emulsion Process. In: F. Kongoli, A. Conejo, M.C. Gomez-Marroquin, editors. Sustainable Industrial Processing Summit & Exhibition SIPS 2017. Vol. 9: Iron and Steel, Metals and Alloys. Vol. 9. Montreal (Canada): FLOGEN Star Outreach. P. 104 – 115.

Поступила в редакцию 31 января 2020 г.

После доработки 6 февраля 2020 г.

Принята к публикации 10 февраля 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 5, pp. 389–399.

MATHEMATICAL MODELING IN EDUCATION PROCESS, RESEARCH AND LOW-ENERGY METALLURGICAL TECHNOLOGIES

V.P. Tsymbal, V.N. Buintsev, V.I. Kozhemyachenko, S.N. Kalashnikov, P.A. Sechenov

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. The article presents a retrospective of scientific and educational activities of the Chair “Applied Information Technologies and Programming”. At the time of organization (in 1980), the Chair’s staff has set a task: to create specialists of a new plan (problem programmers) who simultaneously possess methods of research and mathematical description of specific objects (including metallurgical ones) and computer programming. By special order of the RSFSR Ministry of Higher Education, a new specialization was created in experimental order: “Computer support and computers in metallurgy”, which after 20 years of pedagogical experiment developed into the specialty “Information systems and technologies (by industry)”. The Chair was the first to produce such specialists not only in the region, but also in the country, and this experience was then adopted by other universities. The staff of the newly created Chair was one of the first in the country to create mathematical models of metallurgical processes, and then simulators and training systems based on them. An activity-based approach to learning based on a mathematical model of specific subject area was adopted as a pedagogical concept. Many years of experience in applying this approach has shown its high effectiveness. For the first time in metallurgy, a concept and a set of models of fundamentally new metallurgical process and unit with elements of self-organization was developed, characterized by an order of magnitude lower specific volume and one and a half times less energy consumption. Together with the designers and specialists of ZapSibMetKombinat (West Siberian Metallurgical Plant), a large-scale pilot installation of JER unit process was created, which confirmed the correctness of the proposed concept, worked out the main design points, and showed the practical feasibility of a number of new technologies developed. In a new process creating, software and tool systems were worked out: an algorithm for calculating the interrelated parameters of the process and the unit, the “Engineering-metallurgy” system, a system for modeling complex heat transfer processes, and a system for simulating the particle level using the Monte Carlo method.

Keywords: scientific research, educational activity, mathematical model, simulator, training system, theory of self-organization, new metallurgical process.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-389-399

REFERENCES

1. Tsymbal V.P. Control of oxidizing ability of open hearth furnace based on the static model using boiling bath self-regulating. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1975, no. 4, pp. 162–165. (In Russ.).
2. Kurdyumov S.P., Malinetskii G.G. *Sinergetika – teoriya samoorganizatsii* [Synergetics – Theory of self-organization]. Moscow: Znanie, 1983, 64 p. (In Russ.).
3. Nicolis G., Prigogine I. *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*. New York: Wiley, 1977, 504 p.
4. Haken H. *Synergetics*. Berlin: Springer, 1978, 351 p.
5. Prigogine I., Stengers I. *Order out of Chaos. Man’s New Dialogue with Nature*. New York: Bantam Books, 1984, 349 p.
6. Klimontovich Yu.L. *Turbulentnoe dvizhenie i struktura khaosa. Novyi podkhod k statisticheskoi teorii otkrytykh sistem* [Turbulent motion and chaos structure. A new approach to statistical theory of open systems]. Moscow: Nauka, 1990, 320 p. (In Russ.).
7. Knyazeva E.N., Kurdyumov S.P. *Osnovaniya sinergetiki: Rezhimy s obostreniem, samoorganizatsiya, tempomiry* [Base of synergetics: Exacerbated modes, self-organization, temp worlds]. St. Petersburg: Aleteiya, 2002, 414 p. (In Russ.).
8. Tsymbal V.P., Mochalov S.P., Rybenko I.A. etc. *Protsess SER – metallurgicheskii struino-emul’sionnyi reaktor* [JER process – metallurgical jet-emulsion reactor]. Moscow: Metallurgizdat, 2014, 488 p. (In Russ.).
9. Tsymbal V.P., Mochalov S.P., Shakhov K.M. Controlling the composition of the metal in the direct reduction of dust-sized materials and waste products in a jet-emulsion reactor. *Metallurgist*. 2015, vol. 59, no. 1-2, pp. 119–125.
10. Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Shreiber I.R. *Wave propagation in Gas-Liquid Media*. Boca Raton: CRC Press, 1993, 222 p.
11. Gordon Ya.M., Spirin N.A., Shvydkii V.S. etc. Scrap metal as an important secondary resource for improving energy efficiency and resource saving in steel industry. In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo. Ch. 1*. [Metallurgy: technology, innovation, quality. Part 1]. Novokuznetsk, 2017, pp. 390–400. (In Russ.).
12. Korostelev A.A., S’emshchikov N.S., Semin A.E. etc. Increase in EAF lining life with use of hot-briquetted iron in a charge. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018, vol. 59, no. 2, pp. 107–114.
13. Lückhoff J., Apfel J., Buttler J. Application of different kinds of metal charge materials in EAF operation. *Chernye metally*. 2017, no. 10, pp. 28–33. (In Russ.).
14. Abd Elkader M., Fathy A., Eissa M., Sayed Sh. Effect of direct reduced iron proportion in metallic charge on technological parameters of EAF steelmaking process. *ISIJ International*. 2016, vol. 5, no. 2, pp. 2016–2024.

15. Sulimova M.A., Litvinova T.E. Metallurgical production waste treatment efficiency increase. *Ecology, Economics, Education and Legislation Conference Proceedings, SGEM*. 2016, vol. II, pp. 569–575.
16. Duarte P., Beserra Kh. Production of high-carbon iron by direct carbon reduction (DRI) using Energiron DR technology. *Chernye metally*. 2016, no. 6, pp. 24–30. (In Russ.).
17. Dorofeev G.A., Yantovskii P.R., Smirnov K.G., Stepanov Ya.M. The process “orien” for smelting of high-quality steels from ore and energy raw materials based on the principle of the energy self-supplying. *Chernye metally*. 2017, no. 5, pp. 17–23. (In Russ.).
18. Kinaci M.E., Lichtenegger T., Schneiderbauer S. Direct reduction of iron-ore in fluidized beds. In: *28th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, Graz, AUSTRIA*, 2018, vol. 43, pp. 217–222.
19. Schenck J., Lungen H. Review of application of DRI processes in EC countries. *Chernye metally*. 2017, no. 2, pp. 25–31. (In Russ.).
20. Meijer K., van der Stel J., Zeilstra C. etc. The HIsarna ironmaking process. In: *Proc. METEC and 2nd ESTAD, 15–19 June 2015, Düsseldorf, Germany*, pp. 15–19.
21. Basdag A., Arol, A.I. Coating of iron oxide pellets for direct reduction. *Scandinavian Journal of Metallurgy*. 2002, vol. 31, no. 3, pp. 229–233.
22. Rybenko I.A., Olennikov A.A. *Inzhiniring – Metallurgiya* [Engineering – Metallurgy]. Certificate of state registration of computer program no. 2017617445. 2017. (In Russ.).
23. 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, 353 p. (In Russ.).
24. Kroese D.P., Brereton T., Taimre T., Botev Z.I. Why the Monte Carlo method is so important today. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. 2014, vol. 6, no. 6, pp. 386–392.
25. Tsymbal V., Olennikov A., Rybenko I. etc. Mathematical Modeling of SER Jet-Emulsion Process. In: *Sustainable Industrial Processing Summit & Exhibition SIPS 2017. Vol. 9: Iron and Steel, Metals and Alloys*. Kongoli F., Conejo A., Gomez-Marroquin M.C. eds. Montreal (Canada): FLOGEN Star Outreach, pp. 104–115.

Information about the authors:

V.P. Tsymbal, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Applied Information Technologies and Programming” (tsymbal33@mail.ru)

V.N. Buintsev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Applied Information Technologies and Programming”

V.I. Kozhemyachenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Applied Information Technologies and Programming” (vadim@itm.sibsiu.ru)

S.N. Kalashnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Applied Information Technologies and Programming”

P.A. Sechenov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Applied Information Technologies and Programming” (sechenov.p.a.1989@gmail.com)

Received January 31, 2020

Revised February 6, 2020

Accepted February 10, 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

