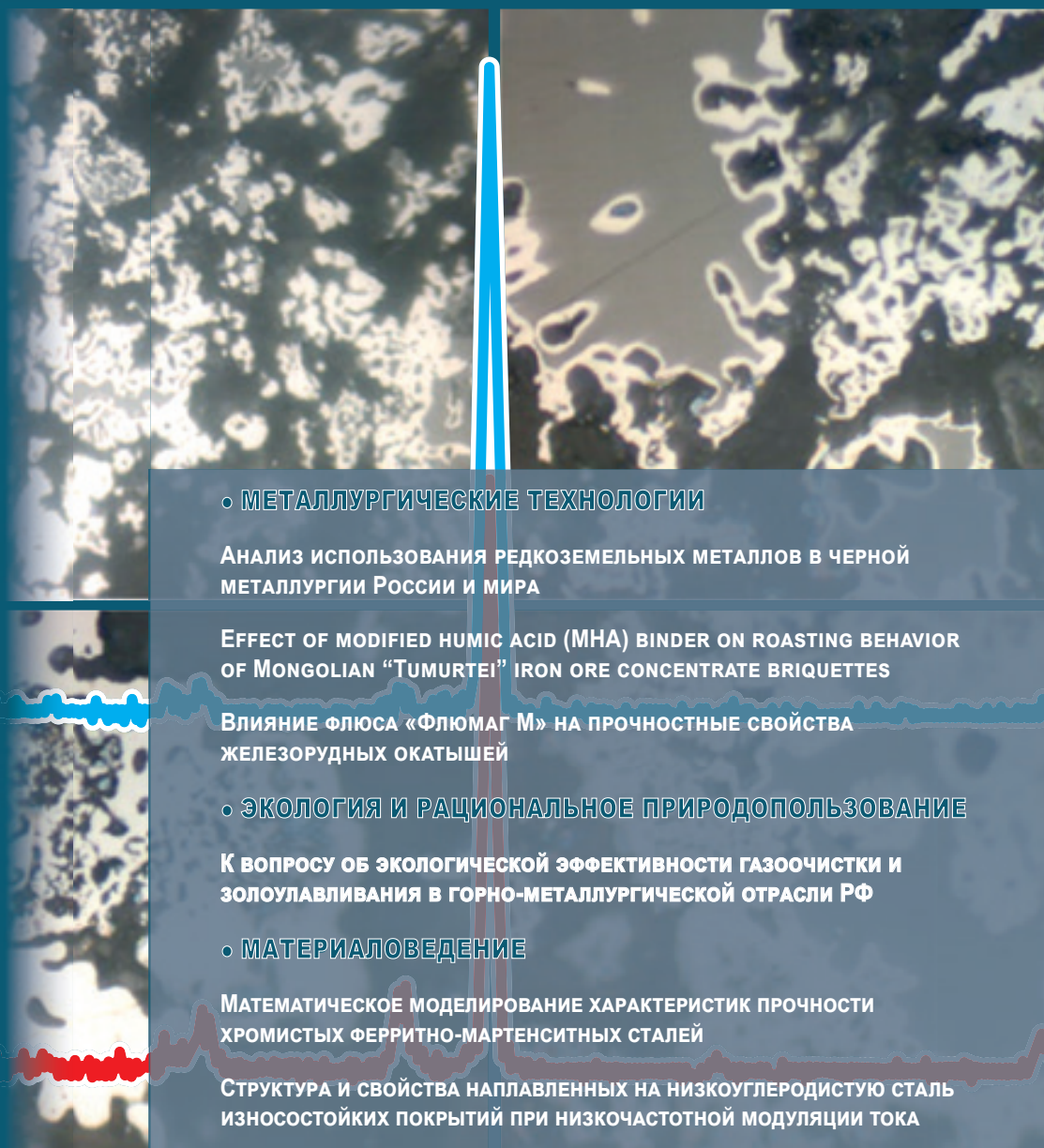


ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 63 Номер 6 2020



• МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Анализ использования редкоземельных металлов в черной металлургии России и мира

EFFECT OF MODIFIED HUMIC ACID (MHA) BINDER ON ROASTING BEHAVIOR OF MONGOLIAN "TUMURTEI" IRON ORE CONCENTRATE BRIQUETTES

Влияние флюса «Флюмаг М» на прочностные свойства железорудных окатышей

• ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

К ВОПРОСУ ОБ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗООЧИСТКИ И ЗОЛОУЛАВЛИВАНИЯ В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ РФ

• МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ ХРОМИСТЫХ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННЫХ НА НИЗКОУГЛЕРОДИСТУЮ СТАЛЬ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ НИЗКОЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ТОКА



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 6, 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)

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)

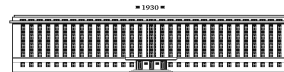
КОЛОКОЛЬЦЕВ В.М. (Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)
КОСТИНА М.В. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
КОСЫРЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)
КУРГАНОВА Ю.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)
КУРНОСОВ В.В. (Национальный 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
Национальным исследовательским технологическим университетом «МИСиС»

Адреса редакции:

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

654007, Новокузнецк, 7,
Кемеровской обл., ул. Кирова, д. 42
Сибирский государственный индустриальный университет,
Тел.: (3843) 74-86-28
E-mail: redjizv@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: LEONT'EV L.I.
(Russian Academy of Sciences, Moscow)

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

Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

M. SPEIDEL (Swiss Academy of Materials, Switzerland)

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

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

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

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

A.B. YUR'EV (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)

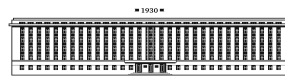
M. ZINIGRAD (Ariel University, Israel)

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
National Research Technological University "MISIS"

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

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Волков А.И., Стулов П.Е., Леонтьев Л.И., Углов В.А. Анализ использования редкоземельных металлов в черной металлургии России и мира	405
Баяра Сараатанбазар, Гуан-хуэй Ли. Влияние модифицированной гуминовой кислоты (МНА) как связующей добавки на обжиг брикетированного монгольского железорудного концентрата «Tumurtei»	419
Гущин В.Н., Коровин В.А., Беляев С.В., Демченко А.И. Физическое моделирование процессов фильтрации никелевых сплавов в процессе разлива в вакуум-индукционной установке	428
Кожухов А.А., Тимофеева А.С., Никитченко Т.В. Влияние флюса «Флюмаг М» на прочностные свойства железорудных окатышей	436
Жаткин С.С., Никитин К.В., Деев В.Б., Панкратов С.С., Дунаев Д.А. Применение электродуговой наплавки для создания трехмерных объектов из стали	443

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Горбатюк С.М., Макаров П.С., Сухорукова М.А. К вопросу об экологической эффективности газоочистки и золоулавливания в горно-металлургической отрасли РФ	451
---	-----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Беломытцев М.Ю. Математическое моделирование характеристик прочности хромистых ферритно-мартенситных сталей	458
Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Перовская М.В., Семенчук В.М. Структура и свойства наплавленных на низкоуглеродистую сталь износостойких покрытий при низкочастотной модуляции тока	469

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Соколов А.К. Определение температуропроводности материала по численно-аналитической модели полуголобого тела ...	474
--	-----

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Орлов Г.А., Орлов А.Г. Оценка обрабатываемости металлов давлением	481
С 75-летием Михаила Иосифовича Зиниграда	484

CONTENTS

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

A.I. Volkov, P.E. Stulov, L.I. Leont'ev, V.A. Uglov Analysis of the use of rare earth metals in ferrous metallurgy of Russia and world	405
Bayaraa Saraatanbazar, Guang-hui Li. Effect of modified humic acid (MHA) binder on roasting behavior of Mongolian "Tumurtei" iron ore concentrate briquettes	419
V.N. Gushchin, V.A. Korovin, S.V. Belyaev, A.I. Demchenko Physical modeling of filtration processes of heat-resistant nickel alloys during casting in a vacuum induction installation	428
A.A. Kozhukhov, A.S. Timofeeva, T.V. Nikitchenko Effect of FLUMAG M flux on strength properties of iron ore pellets	436
S.S. Zhatkin, K.V. Nikitin, V.B. Deev, S.S. Pankratov, D.A. Dunaev Application of electric arc surfacing in manufacture of three-dimensional steel objects	443

ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

S.M. Gorbatyuk, P.S. Makarov, M.A. Sukhorukova Environmental efficiency of gas purification and ash collection in Russian mining and metallurgical industry	451
---	-----

MATERIAL SCIENCE

M.Yu. Belomyttsev Mathematical modeling of strength characteristics of chromium ferritic-martensitic steels	458
Yu.N. Saraev, V.P. Bezborodov, M.V. Perovskaya, V.M. Semenchuk Structure and hardness of wear-resistant coatings with low-frequency current modulation deposited on low carbon steel	469

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

A.K. Sokolov Determination of thermal diffusivity of the material by numerical-analytical model of a semi-bounded body	474
--	-----

SHORT REPORTS

G.A. Orlov, A.G. Orlov Assessment of metals fabricability by pressure ..	481
To the 75 th Anniversary of Mikhail Iosifovich Zinigrad	484

УДК 546.65: 339.13: 669.15-198

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ РОССИИ И МИРА

Волков А.И.¹, к.х.н., зам. директора научного центра НЦМТ (rhenium@list.ru)

Стулов П.Е.¹, младший научный сотрудник (pavel1411@rambler.ru)

Леонтьев Л.И.^{1,2,3,4}, академик РАН, советник, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник

Углов В.А.¹, к.т.н., заместитель генерального директора

¹Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина

(Россия, 105005, Москва, ул. Радио, 23/9, стр. 2)

²Институт металлургии УрО РАН

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

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский проспект, 4)

⁴Президиум РАН

(119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, 32а)

Аннотация. Проведен анализ современного состояния производства редкоземельных металлов (РЗМ) в России и в мире. Приведены сведения о выпуске РЗМ в разных странах мира и о новых зарубежных проектах по добыче и переработке РЗМ. Представлен баланс производства, экспорта и импорта сырья и продукции с РЗМ, в том числе по скандию и иттрию, в России. Рассчитан максимальный объем потребления РЗМ в России с учетом импортируемой продукции с РЗМ. Эти данные сравниваются с другими странами, в том числе с бывшим СССР. Большое внимание уделено применению РЗМ в металлургии. Приведены данные о влиянии РЗМ на свойства чугуна и стали. Даны сведения о применяемых формах РЗМ для их использования в черной металлургии России. Изучена структура потребления РЗМ по отраслям черной и цветной металлургии. На примере двух предприятий (одно из них специализируется на массовом производстве, а второе – на специальных сталях) изучена структура потребления РЗМ для легирования стали по типам и сферам ее применения. Исследованы особенности развития потребления РЗМ в черной металлургии России, рассчитан объем потребления, приведены данные об импорте сырьевых материалов с РЗМ для металлургии, даны сведения о производителях ферросплавов с РЗМ в России. Проанализирован спектр продукции черной металлургии с РЗМ. Проведено сравнение потребления РЗМ в металлургии России и зарубежных стран. Рассмотрены причины недостаточного потребления РЗМ в металлургии России, дана оценка по изменению объемов производства отдельных типов стали и чугуна, выработаны рекомендации по росту потребления РЗМ в металлургии.

Ключевые слова: редкоземельные металлы, РЗМ, ферросплавы, лигатуры, модификаторы, чугун, сталь, анализ рынка, баланс производства и потребления, черная металлургия.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-405-418

ВВЕДЕНИЕ

К редкоземельным металлам (РЗМ) относят элементы III(Б) группы Периодической системы Д.И. Менделеева: Sc, Y, La и лантаноиды (Ce – Lu). Редкоземельные металлы относят к так называемым «редким металлам» – исторически сложившейся в начале XX в. группе элементов, когда они только начинали использоваться (редко потреблялись), включающей, кроме РЗМ, еще четыре группы – рассеянные, тугоплавкие, легкие и радиоактивные элементы [1]. В настоящее время наблюдается путаница с терминами «редкие» и «редкоземельные» металлы, часто можно даже встретить такое выражение, как «редкие и редкоземельные металлы».

Редкоземельные металлы применяют в различных отраслях промышленности (радиоэлектронике, приборо- и машиностроении, металлургии, химической, стекольной и керамической промышленности и др.).

Их используют в производстве постоянных магнитов, катализаторов для крекинга нефти, синтеза каучука, люминофоров, порошков для полировки линз и микрочипов. Уровень потребления РЗМ в мире растет благодаря развитию «зеленой» энергетики. Сферы применения РЗМ и существующие технологии их переработки рассмотрены в работах [2, 3]. В 2018 г. объем мирового производства РЗМ составил 201 тыс. т [4], из них 174 тыс. т приходится на Китай, являющийся не только главным поставщиком, но и основным потребителем РЗМ. В 2019 г. мировая добыча РЗМ составила уже 210 тыс. т в пересчете на оксиды [5], с учетом таких стран, как Китай, США, Бирма, Австралия, Индия, Россия, Мадагаскар, Тайланд, Бразилия, Вьетнам, Бурунди (указаны в порядке убывания объема добычи).

Всплеск интереса к РЗМ вызвали попытки Китая управлять ценами на мировом рынке РЗМ, в 2011 – 2012 гг. был ограничен экспорт и резко повышены цены на РЗМ. Это привело к рождению про-

ектов и даже государственных программ других стран по добыче и переработке РЗМ [6, 7], в том числе в России [8]. Резко возросло число научных публикаций на тему РЗМ. Обсуждались вопросы использования вторичных ресурсов с РЗМ [6, 9 – 11]. Реализация таких проектов оказалась сложной задачей. Через несколько лет цены вернулись на прежний уровень [12]. В 2012 г. на Mountain Pass (Molycorp) была возобновлена добыча РЗМ (5 – 6 тыс. т в год), концентрат поставлялся на эстонский завод Silmet. Выйти на прибыль этому проекту не удалось, в 2015 г. добыча сырья была прекращена. В 2016 г. Molycorp избегает банкротства сменой собственника и переименовывается в Neo Performance Materials. С 2018 г. добыча редкоземельной руды в Mountain Pass снова возобновлена, и в 2019 г. добыто уже 26 тыс. т бастнезита, что сделало США крупнейшим производителем концентратов РЗМ за пределами Китая [5]. С 2013 г. индийская компания Indian Rare Earth Ltd (IREL) начала эксплуатацию завода по переработке монацита в Ориссе. Объем производства составляет около 2000 т РЗМ в год. Австралийская компания Lynas в 2013 г. отложила планы по разработке нового месторождения Duncun из-за низких цен на продукцию. Новый перерабатывающий завод в Малайзии (с 2014 г. – 22 тыс. т в год) так и не смог достичь выхода на проектную мощность. В 2018 – 2019 гг. компания Lynas стала получать прибыль. Сегодня это единственная компания с полным циклом производства РЗМ за пределами Китая. Бразильская компания CBMM с 2015 г. начала выпускать РЗМ по 1 тыс. т ежегодно. Подробнее о проектах РЗМ в других странах изложено в работе [13]. В результате реализации этих проектов доля Китая в добыче РЗМ снизилась с 97 % в 2010 г. [10] до 63 % в 2019 г. [5]. Однако в этих данных не учитывается нелегальная продукция и высокая доля участия Китая в зарубежных проектах, в том числе в собственности и сбыте продукции.

В России в рамках подпрограммы «Развитие промышленности редких и редкоземельных металлов» государственной программы «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» в 2013 – 2018 гг. проведено 40 НИОКР на условиях государственно-частного партнерства. В рамках этих работ получены новые материалы и технологии с РЗМ. В настоящее время Минпромторг России разработал проект «Стратегии развития промышленности редких и редкоземельных металлов Российской Федерации на период до 2035 года». В то же время план реализации стратегии предусмотрен в рамках продуктового направления «Редкие и редкоземельные металлы» Дорожной карты развития в Российской Федерации высокотехнологичной области «Технологии новых материалов и веществ», разработанной в целях реализации Соглашения о намерениях от 10.07.2019 г. между Правительством РФ и Государственной Корпорацией по атомной энергии «Росатом».

Черная металлургия является одним из основных потребителей редких металлов [14]. ГНЦ ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина» совместно с промышленными предприятиями разработана «Межотраслевая программа работ по освоению новых видов продукции металлургии с использованием редких и редкоземельных металлов на период 2020 – 2035 гг.». Основной ее целью является развитие производства и импортозамещение высококачественных металлических сплавов и сталей с использованием редких металлов (РМ) с существенным увеличением доли качественных сталей, в том числе конструкционных, коррозионностойких, инструментальных, нержавеющей, жаропрочных сталей и сплавов для авиа- и ракетно-космической отрасли, приборо- и станкостроения, химического и тяжелого машиностроения, медицинской промышленности и т. д.

Для реализации описанных программ важно оценить количество потребляемых РЗМ в черной металлургии, виды производимых сплавов с РЗМ, формы потребляемых РЗМ, оценить перспективы и пути развития производства чугуна и стали с РЗМ.

Производство и потребление РЗМ в России

В России добычу руд с РЗМ осуществляют в Мурманской области. Едва ли не единственным значимым источником РЗМ до сих пор является Ловозерское месторождение (1,12 % РЗМ в руде). На одноименном ГОКе производят лопаритовый концентрат, перерабатываемый по хлорной технологии на Соликамском магниевом заводе (СМЗ) с получением коллективного концентрата карбонатов РЗМ. При производственной мощности 3600 т в год РЗМ в пересчете на оксиды в 2018 г. объем производства составил 2595,7 т РЗМ, из них 2549,8 т отправлено на экспорт [4]. Остальное количество коллективного концентрата СМЗ было переработано подмосковной компанией ООО «Лаборатория инновационных технологий» (ГК «Скайград») на автоматизированном каскаде центробежных экстракторов собственной конструкции [15, 16]. Опытное промышленное производство мощностью 140 т в год было запущено в 2018 г. в Королеве. Компания производит оксид и карбонат церия, оксиды лантана, неодима, раствор лантана, карбонат среднетяжелых РЗМ, металлические неодим и самарий. Компания планирует реализовать проект по выделению РЗМ из фосфогипса (до 50 тыс. т на начальном этапе и далее до 300 тыс. т в год по сырью), а также создать разделительное производство в г. Пересвет с объемом переработки до 2000 т по сырью в год с получением, наряду с легкими РЗМ, оксида иттрия и оксидов среднетяжелых РЗМ – самария, гадолиния, европия и диспрозия. Небольшое количество (до 70 т) коллективного концентрата СМЗ периодически перерабатывается на Чепецком механическом заводе с получением концентрата оксидов РЗМ

и полирующих порошков. Там же на опытно-промышленной установке отрабатывается азотнокислая технология переработки лопаритового концентрата.

Месторождения апатит-нефелиновых руд (0,24 – 0,42 % РЗМ) разрабатывают с получением апатитовых концентратов и далее – фосфорных удобрений. Редкоземельные металлы при этом почти не извлекают. Они в значительной степени остаются в фосфогипсе – крупнотоннажном отходе производства, а также частично концентрируются в получаемой фосфорной кислоте и удобрениях. Таким образом, ежегодно с перерабатываемым сырьем в России теряется количество РЗМ, сопоставимое с половиной мировой добычи (122 тыс. т). Лишь в 2016 г. ПАО «Акрон» запустило производство мощностью до 200 т в год по разделению РЗМ из апатитового концентрата месторождения «Олений ручей» [17]. Среди выпускаемой продукции – оксиды лантана, церия, дицима (так называют смесь неодима и празеодима) и неодима, карбонаты лантана, церия и дицима, концентраты карбонатов РЗМ, легких РЗМ, среднетяжелых РЗМ, азотнокислый раствор РЗМ. Созданная в ОАО «Фосагро-Череповец» установка по извлечению из экстракционной фосфорной кислоты и групповому разделению РЗМ мощностью 12 т в год в настоящее время законсервирована [2]. В 2016 г. ОАО «Уралхим» запускало пилотную установку по извлечению РЗМ из фосфогипса.

До недавних пор основным производителем соединений и лигатур со скандием был Гидрометаллургический завод (ООО «Интермикс Мет», г. Лермонтов). Он в 2013 г. организовал опытную установку для получения скандиевого концентрата на предприятии АО «Далур» (Урановый холдинг «Атомредметзолото»). Для этого был реализован проект попутного извлечения скандия из продуктивных растворов уранодобывающего предприятия [18]. Тот же Гидрометаллургический завод на ПАО «ВСМПО-АВИСМА» в 2015 г. создал производственную установку извлечения скандия из отходов производства тетрахлорида титана. На самом ООО «Интермикс Мет» из полученных концентратов производили Sc_2O_3 , ScF_3 , ScCl_3 , Al – Sc-лигатуру и металлический скандий. В конце 2017 г. завод был остановлен, через год снова запущен. В настоящее время завод сменил собственников, проходит реорганизацию, перспективы производства скандия на нем не определенные. Проект на АО «Далур» развивается отдельно. С 2017 г. на опытно-промышленной установке начато производство оксида скандия. В 2016 г. на Уральском алюминиевом заводе запущен опытный участок и получена опытная партия 99 % Sc_2O_3 из красных шламов. Из-за проблем с реализацией продукции в 2018 г. проект был заморожен. Планы реализации проекта китайской компании Shewu Technology Group Corp. переработки красных шламов с извлечением Sc_2O_3 на Богословском алюминиевом заводе, а также проекта переработки отходов производства диоксида титана «Крымского тита-

на» с получением скандия [19] не были реализованы. Объем импортных поставок Sc_2O_3 и Y_2O_3 составляет около 15 т.

При запасах РЗМ около 20 % мировых Россия добывает и перерабатывает всего около 1 % [20]. Зарубежные источники оценивают долю запасов России ниже: 10 % [5] и 13,6 % [21]. На рис. 1 представлен баланс производства и потребления РЗМ в России в 2018 г., при его составлении обобщены вышеперечисленные данные. Основная часть производимых в России РЗМ представлена коллективным концентратом карбонатов РЗМ. Всего 5,6 % производимых РЗМ разделяют с получением соединений индивидуальных «легких» РЗМ, при этом соединения «тяжелых» РЗМ не производят, т. е. недавно созданные мощности по разделению РЗМ (около 350 т в год) загружены лишь наполовину. До 95 % производимых в России РЗМ отправляют за рубеж, где проводят разделение. В результате импорта Россия ежегодно получает около 1000 т оксидов РЗМ (разделенных и частично разделенных) и около 100 т РЗМ в год в виде металлов и сплавов. Можно констатировать, что в России слабо развито производство продукции с РЗМ глубокой степени переработки, экспортируется полуфабрикат, а импортируется переработанная продукция, в том числе разделенные РЗМ. По расчетам авторов, ежегодно для получения компонентов электроники, катализаторов нефтепереработки, постоянных магнитов, стекла, оптических компонентов, полировальных порошков, огнеупорной керамики, лигатур и модификаторов Россия потребляет 1230 т РЗМ в год. В составе аналогичной импортной продукции ежегодно поставляется еще около 2000 т РЗМ.

Сравним эти цифры с мировыми лидерами отрасли РЗМ. В 1990 г. СССР производил 8500 т РЗМ в продукции при экспорте 14 % [22], из них 20 – 25 % индивидуальных РЗМ, а потребление внутри страны не превышало 6000 т [23]. В 1990 г. США добывали 22 713 т, импортировали 4990 т смеси РЗМ, 151 т оксидов РЗМ, 1363 т металлических РЗМ, 199 т Sc и Y, 93 т ферроцерия, экспортировали 1730 т соединений церия, 241 т Sc и Y, 18 т ферроцерия, видимое потребление – 30 000 т [24], а всего в мире тогда производили 53 000 т РЗМ [25]. В 2008 г. США потребляли 20 663 т РЗМ, Япония 34 330 т, страны ЕС 23 013 т [26]. В 2009 г. потребление РЗМ в Китае составило 70 тыс. т [27]. В США в 2019 г. потребили 13 000 т РЗМ [5], 600 т оксида иттрия [13]. Япония потребила 20 175 т РЗМ в 2016 г., а Китай – около 60 % всего мирового производства [28]. Как видно, снижение потребления РЗМ характерно не только для России. Это свидетельствует о том, что Китай развивает не только добычу и производство РЗМ, но и производство товаров потребления с РЗМ. Например, доля китайских заводов, в том числе зарубежных, в производстве неодимовых магнитов достигает 80 % [7].

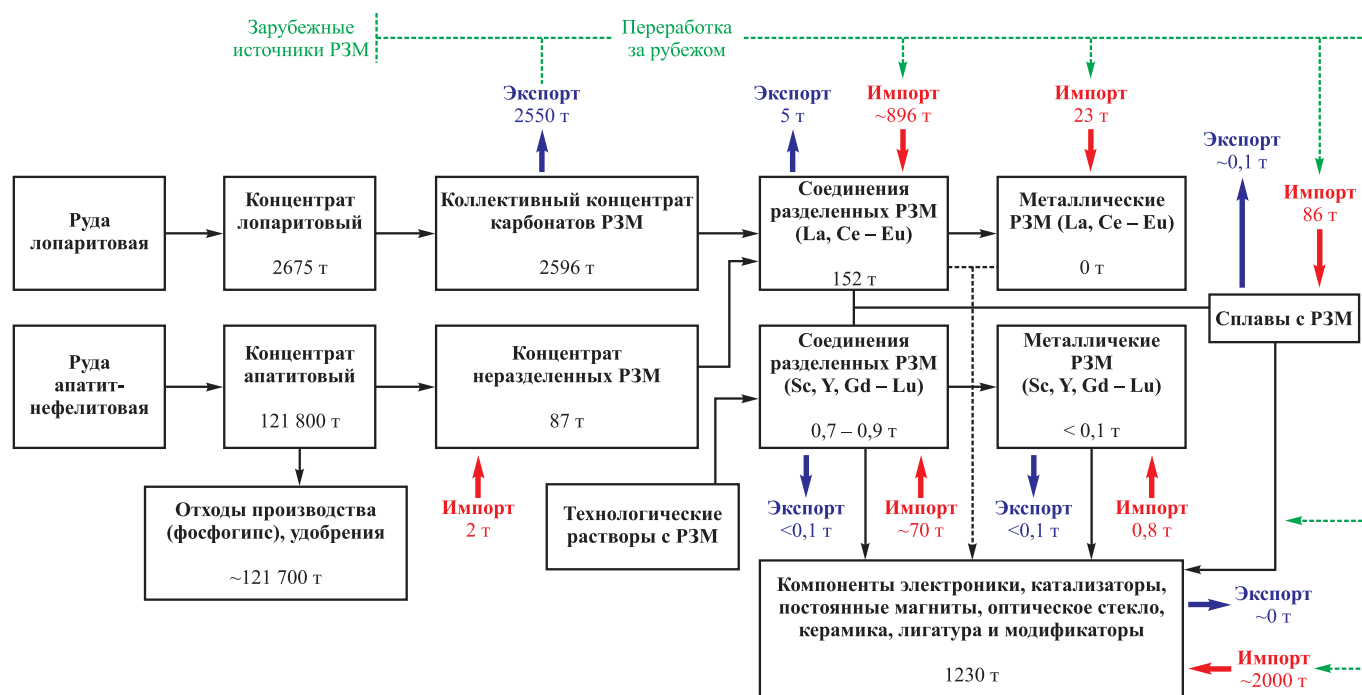


Рис. 1. Баланс производства и потребления РЗМ в 2018 г. (в прямоугольниках указан объем производства, все цифры приведены в пересчете на оксиды РЗМ)

Fig. 1. Balance of REM production and consumption in 2018 (rectangles indicate the volume of production, all figures are given in terms of REM oxides)

Таким образом, проблема РЗМ заключается не в отсутствии сырья или технологий его переработки, а в организации сбыта отечественной продукции с РЗМ на отечественном рынке (импортозамещение), в недостаточном объеме мощностей по разделению РЗМ, низком уровне потребления РЗМ, отсутствии или слабом развитии производств, выпускающих потребительскую продукцию с РЗМ.

Без решения этих вопросов, учитывая монополизацию мирового рынка китайской продукцией, не имеет смысла наращивание мощностей по добыче РЗМ из руд (Томторское [29], Зашихинское, Катугинское, Ловозерское месторождения и др.). Все эти проекты в настоящее время актуальны только с точки зрения обеспечения ниобием отечественной черной металлургии [14]. В нынешнем состоянии производства в России максимальное потребление РЗМ внутри страны может достигать 3200 т в год при условии импортозамещения соответствующих товаров с РЗМ. В то же время, это все равно в несколько раз меньше потребления РЗМ, которое было в нашей стране 30 лет назад.

ПРИМЕНЕНИЕ РЗМ В МЕТАЛЛУРГИИ

Одной из значимых сфер применения РЗМ является металлургия. По данным [30] металлургия в общемировом потреблении РЗМ в 2016 г. занимала 19 % и находилась на втором месте после постоянных магнитов (22,5 %). Другие источники в разные годы оценивают

долю металлургии в мировом потреблении РЗМ от 7 – 10 [6, 9, 21, 31] до 16 – 20 % [25, 32 – 34]. Возможно, что такое различие связано с учетом производства аккумуляторов и накопителей водорода в разделе со сплавами РЗМ. В США доля металлургии в конечном потреблении РЗМ меняется: в 2016 г. – 15 % [13], в 2019 г. – 5 % [5]. В Европейском Союзе в 2010 г. металлургия потребила 12 % РЗМ [6, 35]. По расчетам авторов, в России металлургией потребляется всего 120 т РЗМ, т. е. 10 % общего объема. Распределение РЗМ по направлениям металлургии России в 2018 – 2019 гг. показано на рис. 2. Подавляющее количество РЗМ (86 %) находит применение в черной металлургии. Добавки РЗМ используют в производстве чугуна для повышения его качества (модификации структуры, очистки от вредных примесей). Добавки 0,02 % церия позволяют получать высокопрочный чугун, близкий по своим свойствам к мягкой низкоуглеродистой стали. Такой вид чугуна на 20 – 25 % дешевле стальных отливок и в 3 – 4 раза дешевле стальных поковок [2]. Иттриевый чугун (0,1 % Y) имеет повышенную в четыре раза износостойкость по сравнению с серым чугуном. Доля чугуна в потреблении РЗМ в металлургии составляет около 50 %. Еще 36 % идет на производство стали в качестве добавки для ее раскисления, дегазации и десульфурации.

Остальное количество РЗМ потребляется в производстве цветных металлов. Для получения магниевых сплавов используют неодим и иттрий. Такие сплавы

обладают высокой жаропрочностью, имеют усиленное сопротивление ползучести, более высокую коррозионную стойкость, хорошие технологические и литейные свойства по сравнению с обычными. Их применяют в авиации и космонавтике. Сплавы алюминия с 0,2 % скандия обладают хорошей свариваемостью, высокими механическими характеристиками. Поэтому их применяют в узлах конструкций космического и авиационного назначения. Небольшое количество РЗМ применяют в производстве жаропрочных сплавов на никелевой основе, выдерживающих воздействие агрессивных сред и высокой температуры. Кроме этого, РЗМ применяют для легирования титановых сплавов, алюминиевых сплавов электротехнической отрасли, сплавов на основе меди, прецизионных и других сплавов.

Похожая иерархия потребления в металлургии Европы и мира описана в работе [9]: чугуны, высокопрочная низколегированная сталь (для автомобильной промышленности), нержавеющая высоколегированная сталь, специальные микролегированные стали и суперсплавы, магниевые сплавы, сплавы алюминия. Структура потребления по элементам в металлургии в мире выглядит следующим образом: 52 % Ce; 26 % La; 17 % Nd; 4 % Pr [25], в России – церий и лантан составляют около 90 %.

ПРИМЕНЕНИЕ РЗМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА И СТАЛИ

Редкоземельные металлы при высокой плотности ($6,76 \text{ г/см}^3$ для церия) и температуре кипения (3200°C

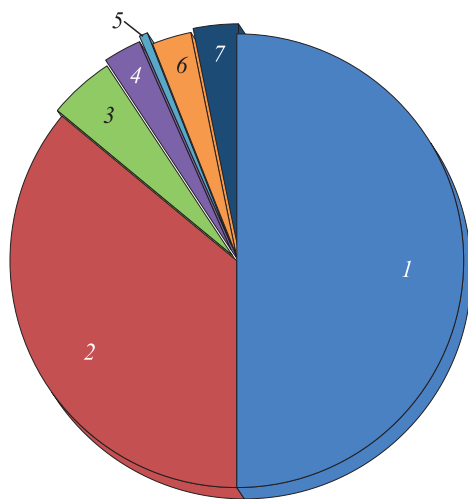


Рис. 2. Структура потребления РЗМ в металлургии России, % (по массе):

1 – чугуны (50,0); 2 – сталь (36,0); 3 – сплавы магния (4,7); 4 – сплавы Al-Sc (2,7); 5 – сплавы никеля (0,6); 6 – сплавы для магнитов (2,8); 7 – прочие сплавы (3,3)

Fig. 2. Structure of REM consumption in Russian metallurgy, % mass.: 1 – cast iron (50.0); 2 – steel (36.0); 3 – Mg alloys (4.7); 4 – Al-Sc alloys (2.7); 5 – Ni alloys (0.6); 6 – alloys for magnets (2.8); 7 – other alloys (3.3)

для церия) имеют относительно низкую температуру плавления (804°C для церия), а также неограниченную растворимость в расплаве железа и сравнительно низкое давление паров. Это позволяет им длительное время сохраняться в расплаве. При введении в чугун и сталь РЗМ взаимодействуют с растворенными в них газообразующими элементами (H, N, C, O, S), As, P и цветными металлами (Pb, Sb, Bi, Sn). Редкоземельные металлы оказывают влияние на поверхностное натяжение жидкого металла, способствуя уменьшению адсорбции вредных примесей при кристаллизации стали, повышая чистоту границ зерен и пластичность металла. Однако низкая растворимость РЗМ в твердом железе при большой концентрации может привести к их выделению по границам зерен в виде эвтектики с температурой плавления ниже температуры прокатки. Редкоземельные металлы обладают модифицирующим действием, способствуя измельчению кристаллов металла, влияют на структуру, морфологию и распределение включений и примесей в стали. В работе [36] подробно рассмотрено влияние РЗМ на свойства различных типов стали.

Чаще всего РЗМ применяют в литейном производстве машиностроительных, механоремонтных, трубопрокатных, металлургических и цехах автомобильного и железнодорожного транспорта для обработки чугуна и стали. Модифицирование чугуна РЗМ (3 – 5 кг/т) позволяет получать в его структуре шаровидную форму графита, улучшая его служебные свойства. Модифицирование церием способствует повышению прочности, твердости и износостойкости за счет измельчения карбидов. Добавление лигатур, содержащих Y, La, Ce в количестве 0,3 – 0,5 %, приводит к перерождению структуры чугуна с преобладанием изолированных мелких карбидных включений. Повышается износостойкость, улучшается обрабатываемость режущим инструментом.

Для стали оптимальное содержание РЗМ составляет 0,02 – 0,05 %, а количество присаживаемых РЗМ – от 0,5 до 3,0 кг/т. В результате микролегирования достигается улучшение технологических и служебных свойств стали (горячая пластичность, свариваемость, жаропрочность, адгезия к шлаку, форма неметаллических включений, структурная неоднородность, механические свойства). Для анализа структуры потребления по видам стали использовали данные, полученные ЦНИИчермет им. И.П. Бардина от двух российских предприятий черной металлургии за 2017 – 2019 гг. Первое предприятие (рис. 3) специализируется на массовом производстве стали. Объем производства стали на нем превышает 10 млн т в год, из них только 31 тыс. т с добавкой РЗМ. Наиболее массовой сталью с РЗМ является сталь для трубной заготовки, на втором месте – рельсовая сталь.

Второе предприятие (рис. 4) специализируется на производстве штампованной продукции. Объем производства стали на нем составляет 0,2 млн т

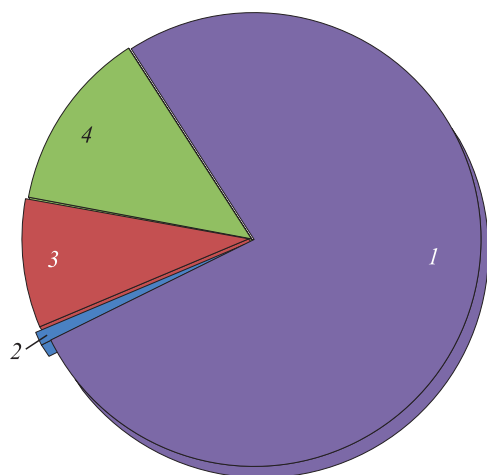


Рис. 3. Структура потребления РЗМ для массового производства стали, % (по массе):

1 – сталь для трубной заготовки (76,8); 2 – коррозионностойкие нержавеющие стали (1,0); 3 – конструкционные, сварные, износостойкие стали (9,4); 4 – рельсовые стали (12,8)

Fig. 3. Structure of REM consumption for mass production of steel, % mass.:

1 – steel for pipe billet (76.8); 2 – corrosion resistant stainless steels (1.0); 3 – structural, welded, wear-resistant steels (9.4); 4 – rail steel (12.8)

в год, из них только в 2 тыс. т стали добавляют РЗМ. Таким образом, доля стали, производимая с добавкой РЗМ, не превышает 1 % общего производства. Среди специальных сталей по потреблению для них РЗМ выделяются высокопрочные конструкционные (0,005 – 0,050 % Ce, 0,015 – 0,030 % Y, 0,05 % La), коррозионностойкие, нержавеющие (0,01 – 0,08 % Ce, 0,05 % Y), стали для изготовления коррозионностойкой трубной заготовки (0,03 % Ce), а также жаропрочные стали (0,01 – 0,20 % Ce).

Отдельно следует остановиться на скандии. Введение микродобавок скандия снижает содержание N, C, O, P, S в сталях 01X18T и 05X18N10T, положительно влияет на структуру и свойства. Скандий, являясь поверхностно-активным элементом по отношению к Fe–Cr–Ni расплавам, оказывает на них комплексное воздействие – рафинирующее, модифицирующее и легирующее [37]. Добавки скандия способствуют замедлению роста зерна в сталях при нагреве, повышают их высокотемпературную пластичность и коррозионную стойкость, а также стойкость сталей ферритного класса против «475-градусной» хрупкости. В настоящее время в России промышленные сплавы на основе железа с добавками скандия не производятся. Применение в качестве легирующей добавки скандия металлического или запрессованной смеси чистых металлов затруднено из-за его высокой стоимости. В связи с этим в ЦНИИчермет им. И.П. Бардина прорабатывается вопрос получения скандийсодержащих лигатур на основе железа и никеля с достаточно низкой температурой плавления и растворения в жидкой стали.

ИСПОЛЗУЕМЫЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

ФОРМЫ РЗМ

До сих пор распространенной формой добавок РЗМ в чугун и сталь остаются сплавы, полученные путем электролиза (мишметалл, ферроцерий, ферроцерий с магнием ФЦМ-5). Мишметалл представляет собой сплав легких РЗМ в их природном соотношении, иногда для его производства применяют смесь оксидов лантана и церия после отделения от них неодима и более тяжелых РЗМ. Такие сплавы, как правило, дороже ферросплавов, характеризуются низким и нестабильным усвоением РЗМ, пиррофорные, требуют герметичной тары при хранении, специальных приемов при измельчении, а также специальных методов и устройств для ввода в жидкий металл. Их применение оправдано в силу исторически сложившихся обстоятельств (это первые и наиболее доступные сплавы с РЗМ), а также для ряда специальных сталей и сплавов, где строго регламентировано количество примесей, в том числе железа, например, для жаропрочных сплавов на никелевой основе.

Чистые РЗМ в виде металлов (иттрий, лантан, церий, неодим) применяют в производстве специальных сталей и цветных металлов. В них регламентировано

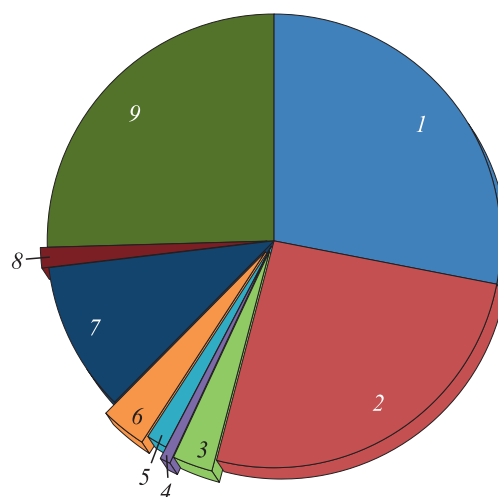


Рис. 4. Структура потребления РЗМ на предприятии специальных сталей, % (по массе):

1 – конструкционные, высокопрочные (27,9); 2 – коррозионностойкие, нержавеющие (26,1); 3 – мартенситно-старееющие стали (2,9); 4 – прецизионные (0,8); 5 – стали для сварки и наплавки (1,5); 6 – сталь жаропрочная высоколегированная (3,3); 7 – жаропрочные на никелевой основе (10,7); 8 – стали для отливок (1,5); 9 – для изготовления коррозионностойкой трубной заготовки (25,4)

Fig. 4. Structure of REM consumption at the enterprise of special steels, % mass.:

1 – structural, high-strength steels (27.9); 2 – corrosion-resistant, stainless steels (26.1); 3 – maraging steel (2.9); 4 – precision steel (0.8); 5 – steels for welding and surfacing (1.5); 6 – heat-resistant high alloyed steel (3.3); 7 – heat-resistant steel on a nickel basis (10.7); 8 – steel for castings (1.5); 9 – steel for production of corrosion-resistant pipe billets (25.4)

содержание отдельных РЗМ. Различия в действии индивидуальных РЗМ на свойства чугуна и стали – до конца не изученный вопрос. Редкоземельные металлы отличаются по физическим свойствам – плотности, температуре плавления и кипения (скандий, иттрий, РЗМ цериевой и иттриевой группы), атомным радиусом. Металлический иттрий и иттриевые лигатуры применяют в производстве чугуна и стали для изготовления деталей, работающих в условиях больших нагрузок, низких температур и абразивного износа. Показано более эффективное действие иттрия по сравнению с церием для получения чугуна с шаровидным графитом. Иттрий и скандий могут применяться в сплавах на основе железа для ядерных реакторов. В них иттрий связывает бор и сосредоточен в объеме зерен, вследствие чего образующийся из бора гелий не ослабляет границ зерен, предотвращая охрупчивание. Иттрий используется в сплавах нагревательных элементов, в суперсплавах, высокотемпературных сверхпроводниках, для производства износостойких и коррозионностойких режущих инструментов. В металлургии замечено, что индивидуальные РЗМ дают более выраженный эффект по сравнению с коллективными РЗМ. Так, в отливках из высокопрочного чугуна при использовании металлического лантана получены более мелкие включения графита, снижена усадка при затвердевании отливок по сравнению с коллективными РЗМ. При модифицировании стали иногда также предпочитают применять церий вместо мишметалла. Сплавы никеля с РЗМ (Ni–Ce) применяют для легирования нержавеющей, мартенситно-старееющей, стали для отливок и др. В работе [38] для изменения структуры низкоуглеродистой стали описано применение празеодима. По данным ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина, присадка лигатур на кремниевой основе с самарием или гадолинием в Cr–Ni–Mo стали способствует измельчению литой структуры и уменьшению зоны столбчатых кристаллов, повышает прочностные и пластические свойства стали, значения ударной вязкости, хладостойкость. В работе [39] приведены данные о свойствах индивидуальных РЗМ при их добавлении в различные сплавы.

Ферросплавы на кремниевой основе типа ФС30РЗМ30 получают в электропечах из концентрата РЗМ с использованием углерода, кремния и алюминия в качестве восстановителя. С точки зрения затрат – это наиболее экономичные сплавы, пригодные для крупнотоннажного производства. Сотрудниками ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина разработаны технологии производства ряда марок и лигатур с РЗМ, содержащих как индивидуальные РЗМ, так и их смесь. Данные технологии характеризуются существенной экономией сырья и энергоресурсов [40, 41]. Такие сплавы лучше усваиваются сталью и стоят дешевле по сравнению с мишметаллом. Они применяются в производстве чугуна и стали, причем как в виде сплавов с РЗМ цериевой группы (СЦЕМИШ), так и с РЗМ иттриевой группы

(СИИТМИШ). Не окисляются при хранении, повышают стабильность свойств конечной продукции. Содержание РЗМ составляет 15 – 30 %. Однако такие ферросплавы часто неприемлемы для обработки специальных сплавов и стали из-за высокого содержания в них кремния. В работе [42] отмечено, что 90 % всей литейной стали выплавляется в электродуговых и индукционных печах с кислой футеровкой. При условии многократного переплава отходов (литников, прибылей) происходит постепенно увеличение концентрации кремния в сплавах. Неметаллические включения, богатые кремнием, загрязняют металл и распределяются строчками на границе зерен, снижая служебные характеристики стали. Ферросплавы на кремниевой основе типа ФС30РЗМ30 раньше выпускал Ключевский завод ферросплавов (около 130 т в год в пересчете на РЗМ в 1970-е годы). Сегодня их производство и потребление в России значительно сократилось (не более 10 % всех форм РЗМ в металлургии). Кроме Ключевского завода ферросплавов, такие сплавы в России выплавляют ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина», ООО «Спецферросплав», ОАО «НИИМ». Раньше применение сплавов с РЗМ ограничивалось несовершенством и сложностью метода их введения в расплав, что приводило к нестабильности свойств металлопродукции [43]. Сегодня метод модифицирования сплава при разливке в ковш получил широкое распространение в практике металлургических предприятий благодаря развитию устройств для ввода модификаторов мелких фракций, при этом значительно снизился их расход.

При внепечной обработке стали раскисление, рафинирование, модифицирование совмещаются с микролегированием и осуществляются в разливочном ковше [44]. Для введения РЗМ в сталь при этом пользуются одним из следующих методов: присадка на струю при сливе металла из печи в ковш, модифицирование в форме, введение модификатора в виде порошковой проволоки непосредственно в ковш [45]. Наиболее универсальные и эффективные модификаторы в – плавленной форме. Модификаторы в виде механической смеси разных компонентов используют в наполнителях порошковой проволоки [46]. Комплексные модификаторы, наряду с РЗМ, содержат В, Mg, Al, Si, Ca, Cu, Zr, V и др. Лигатуры и плавленные модификаторы не обладают пироэффектом, усваиваются в 2 – 3 раза лучше по сравнению с мишметаллом и чистыми металлами.

Бескремнистые комплексные лигатуры (БКЛ) на никелевой основе, содержащие 5 – 30 % Al, 5 – 15 % Ca, 10 – 30 % РЗМ, V, Mo, B, Nb, N, кроме литейного производства (до 3 кг/т) применяют в спецэлектрометаллургии – в электрошлаковом переплаве, литье и обогреве [42]. Они благоприятно влияют на литейные свойства, структуру и эксплуатационные свойства стали, обладают исключительной раскисляющей и рафинирующей способностью. Такие сплавы внепечным кальцийтермическим методом выпускают компании

АО «Росредмет», ООО «Комплексные модификаторы». Базовая марка БКЛ (АКЦе) имеет в составе 20 % РЗМ, 57 % никеля, 20 % алюминия и 3 % кальция. Помимо базовой марки БКЛ, выпускаются лигатуры, модифицированные ванадием (АКЦеФ), титаном (АКЦеТ), ниобием (АКЦеБ), титаном и ниобием (АКЦеТБ). Предлагаемые БКЛ на железной основе – АКЦеЖ и КЦеЖ. Бескремнистые комплексные лигатуры, одновременно с глубоким раскислением, рафинированием и модифицированием структуры, обеспечивают микролегирование, что приводит к повышению в 2 – 3 раза механических и эксплуатационных характеристик, особенно пластичности, ударной вязкости, хладостойкости, усталостной прочности [44]. В некоторых случаях ограничения по содержанию алюминия настолько жесткие, что применение таких БКЛ неприемлемо. По этой же причине иногда ограничивают применение ферросплавов типа ФС30РЗМ30, кальция металлического, полученных с использованием алюминия в качестве восстановителя.

Как правило, производители БКЛ указывают на ограниченность применения и худшие характеристики ферросплавов типа ФС30РЗМ30 и комплексных модификаторов с кремнием из-за высокого содержания в них кремния [42, 44]. Однако сегодня наиболее распространены комплексные модификаторы с РЗМ на основе ферросилиция с щелочноземельными металлами, а также на основе силикокальция или кремния с РЗМ (силициды РЗМ). Комплексные модификаторы типа Fe–Si–Mg–РЗМ можно получать либо в индукционных печах путем сплавления магния с ферросилицием и другими компонентами, либо непосредственно в ферросплавных цехах путем растворения вращающихся чушек магния в жидком первичном ферросилиции. В России их получают в индукционных печах. Недостатком технологии получения модификаторов сплавлением магния с ферросплавами является повторное плавление кремния и ферросилиция. Для получения высокопрочных чугунов с шаровидным и, особенно, вермикулярным графитом важную роль в составе модификатора играют РЗМ. Для обработки чугуна в разливочном ковше применяют модификаторы серии Сферомат и Сфероматс следующего химического состава: 4,7 – 7,5 % Mg; 0,3 – 5,0 % Ca; 0,5 – 3,2 % РЗМ; 1,8 – 3,0 % Ba; 45 – 55 % Si; <1,5 % Al; остальное – Fe. Применение аналогичных модификаторов на основе сплавов с барием и стронцием ограничено в России, в то время как в США такие сплавы производят в больших масштабах углетермическим методом в рудовосстановительных печах [47]. Для обработки стали применяют модификаторы серии Insteel, содержащие 7 – 12 % РЗМ, представляющие собой сплавы, например, SiCaBaРЗМ, SiCaBaРЗМА1 [45]. Они позволяют повысить коррозионную стойкость стали для трубной заготовки, эффективно очищать расплав от неметаллических включений, снизить количество растворенных газов, улучшить

технологические свойства изделий, снизить температуру разлива за счет повышения ее жидкотекучести, что позволяет ослабить развитие горячих термических трещин [45, 48, 49]. Лигатуры и модификаторы в России производят ООО «НПП Технология», ОАО «НИИМ», ООО «Комплексные модификаторы». С производством лигатур с РЗМ для черной металлургии также связаны (были связаны) ООО «НКМ Норд», ООО «НПО БКЛ», АО «Сибирский химический комбинат».

По данным [9] в мире в металлургии в основном применяют РЗМ в виде мишметалла и силицидов РЗМ типа ФС30РЗМ30. Однако в литейном производстве Европы и Северной Америки все больше потребляется ферросилиций с магнием (FeSiMg), содержащий меньшее количество РЗМ. Редкоземельные металлы стараются заменять щелочноземельными металлами. Указаны следующие формы РЗМ, используемые в металлургии: чугун и сталь (мишметалл, силициды РЗМ, церий), высокопрочная низколегированная сталь (мишметалл и церий), нержавеющая высоколегированная сталь (Ce, Y), специальные микролегированные стали и суперсплавы (La, Gd, Y, Ce, Nd, Pr), магниевые сплавы (Y, Nd, Gd, Pr), сплавы алюминия (Y, Ce, La).

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ РЗМ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Структура потребления РЗМ по формам, по оценке авторов, выглядит следующим образом: 80 – 90 % в виде комплексных модификаторов; 10 – 20 % в виде мишметалла, чистых РЗМ, ферросплавов типа ФС30РЗМ30. Практически все исходные материалы с РЗМ для металлургии ввозят из-за рубежа (табл. 1). Основную часть мишметалла, ферросплава с РЗМ, лантана и церия (около 90 т) потребляют для получения комплексных модификаторов, остальное используют напрямую для легирования чугуна, стали и сплавов цветных металлов.

Поскольку в основном находят применение комплексные модификаторы на кремниевой основе, то вопрос замены мишметалла для их изготовления на сплавы типа ФС30РЗМ30 не принципиален с точки зрения металлургии. Проблема заключается в стоимости материалов с РЗМ, часто ферросплавы с РЗМ отечественного производства стоят также, а то и дороже импортного мишметалла. Аналогично и стоимость отечественных концентратов и оксидов РЗМ оказывается не ниже стоимости импортных сплавов и металлов с РЗМ. Из-за дешевизны и более широкой доступности, отечественная металлургия ориентирована на импортный мишметалл, чистые РЗМ и приготовленные из них модификаторы. Отечественный рынок РЗМ небольшой, характеризуется множеством пользователей с небольшими объемами потребления разнообразной продукции, производителей мало, они не мотивированы к конкуренции и снижению стоимости своей продукции. Поэтому вопрос расширения отечественного рынка сырьевых

Импортируемые материалы и области их применения в металлургии России

Table 1. Imported materials and their applications in Russian metallurgy

Материал	Масса, т	Область применения
Мишметалл, ферроцерий, Се – металл	80 – 85	Сталь, чугун, производство модификаторов
Ферросплавы типа ФС30РЗМ30	До 10	Сталь, чугун, производство модификаторов
Y – металл	0,2	Сталь, магниевые сплавы
La – металл	15,0	Сталь, производство модификаторов
Nd – металл	5	Магниевые сплавы
Ni – Се – лигатура		Сталь, никелевые сплавы
Оксиды РЗМ		Производство лигатур и модификаторов

материалов с РЗМ для металлургии остается нерешенной актуальной задачей. Очевидно, что и организация многотоннажного производства лигатур с РЗМ электропечным способом должна привести к снижению их стоимости по сравнению с получением модификаторов из мишметалла и чистых РЗМ.

Потребление РЗМ в металлургии России существенно возросло за последние годы. В 1991 г. оно составляло 790 т, в 1998 г. – 13 т [23]. В 2011 г. было импортировано всего 15 т РЗМ (10 т ферроцерия и 5 т лантана), вместе с тем часть металлов вырабатывалась на территории России из импортных фторидов РЗМ (20 т) [50]. По данным Минпромторга России, за 2018 г. потребление РЗМ в металлургии составляло 110 т [51]. По расчетам авторов, в 2019 г. объем потребления РЗМ в металлургии составлял уже около 120 т, из них чуть более 100 т – в черной металлургии. Несмотря на значительный рост потребления РЗМ в металлургии России, объем внутреннего рынка остается небольшим, он не достиг показателей 1991 г. В России существенно возрос и общий объем потребления РЗМ, т в год: 1991 г. – 3000; 1998 г. – 480 [23]; 2000 г. – 300 [50]; 2005 г. – 400 [27]; 2010 г. – 600 [50]; 2018 г. – 1200 [51]; 2019 г. – 1230. Однако это существенно меньше заявленных 2 – 3 тыс. т даже по «инерционному сценарию» развития промышленности РЗМ в соответствии с государственной программой «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности на период до 2020 года» [8]. Авторы той же работы [8] прогнозировали потребление РЗМ в госкорпорации «Ростехнологии» на уровне 4 тыс. т в 2020 г., а на втором месте по потреблению должны были стать предприятия оборонно-промышленного комплекса. Наступил 2020 г.: госкорпорация «Ростехнологии» больше не участвует в Томторском проекте [52], а потребление РЗМ предприятиями ОПК, связанное в первую очередь с металлургией, незначительное.

Потребление РЗМ в мировой металлургии также растет. В 2008 г. для металлургии использовали 11 503 т РЗМ в пересчете на оксиды в виде ферросплавов, лига-

тур, мишметалла и чистых металлов в составе 2990 т La_2O_3 , 5980 т CeO_2 , 1900 т Nd_2O_3 , 633 т Pr_6O_{11} [53]. По данным [30] в 2016 г. потребление РЗМ в металлургии составило 30 тыс. т в пересчете на оксиды, из них: Китай – 23 тыс. т, Япония и страны Юго-Восточной Азии – 3 тыс. т, США – 2 тыс. т, остальные страны – 2 тыс. т. В странах Европейского Союза в 2010 г. в металлургии использовано 1000 т РЗМ [6]. В США в металлургии в 2019 г. потреблялось около 650 т, а судя по экспорту, производится еще больше чистых РЗМ и их сплавов (импорт сплавов РЗМ в 2019 г. составил 310 т, а чистых металлов РЗМ – 590 т, объем экспорта составил 1400 и 100 т соответственно) [5]. Для сравнения потребления РЗМ в металлургии разных стран авторы учитывали объем производства стали и объем потребления РЗМ во всей металлургии (табл. 2).

Такое сравнение довольно условное и не учитывает распределение РЗМ для производства разных сплавов, в том числе для аккумуляторов. Однако, на взгляд авторов, оно характеризует уровень производства таких

Таблица 2

Условное потребление РЗМ на тонну стали в странах мира

Table 2. Conditional consumption of REM per ton of steel in the world

Страна	Расход РЗМ на 1 т стали, г	Год
Мир в целом	18,43	2016
	9,43	2008
Китай	28,45	2016
США	25,45	2016
Япония и страны Юго-Восточной Азии	24,49	2016
Европейский Союз	5,79	2010
Россия	1,71	2019
Россия (РСФСР)	8,78	1991

марок чугуна и стали, к изготовлению которых предъявляют более жесткие требования по сравнению с массовой продукцией. Это продукция с высокой добавленной стоимостью в металлургии. По потреблению РЗМ в металлургии в России наблюдается резкое отставание не только от мировых лидеров (в 14 – 17 раз), но и от общемирового уровня (в 11 раз). Отставание России от мировых лидеров будет еще более фатальным, если учесть, что суровые климатические условия, высокая интенсивность эксплуатации металлических изделий, сравнительно низкий металлофонд, сложность условий добычи и географического положения месторождений полезных ископаемых, длительный срок службы введенного в хозяйственный оборот металла должны приводить к еще более высокой потребности в качественной стали.

Удельное потребление РЗМ в металлургии в России снизилось в 5 раз по сравнению с 1991 г. Это объясняется снижением объемов производства и большой долей импорта металлургической продукции с РЗМ. По данным авторов, доля импорта в потреблении коррозионностойких, нержавеющих сталей составляет 77,3 %, инструментальных быстрорежущих сталей – почти 100 %, машиностроительных сталей (мартенситно-стареющие, подшипниковые, пружинные, высокопрочные, рельсовые) – до 70 % по отдельным видам. Среди товаров потребления с РЗМ – режущий инструмент, посуда и изделия из нержавеющей стали также во многом импортные. Поэтому при решении вопроса импортозамещения и роста производства специальных сталей и сплавов, а также товаров потребления на их основе следует ожидать роста потребления РЗМ.

В потреблении РЗМ для производства высокопрочного чугуна также имеется резерв роста. Например, Россия по потреблению труб из высокопрочного чугуна отстает от Китая и стран Европы [54]. Единственный завод в России по производству таких труб – Липецкий металлургический завод «Свободный сокол» потребляет всего 27 тыс. т чугуна. В технологически развитых странах уменьшается доля отливок из стали и серого чугуна, а производство отливок из чугуна с шаровидной формой графита ежегодно растет на 2 – 3 %. Они используются не только для производства труб, но и для деталей металлургического оборудования, станкостроения, в тяжелом, транспортном, сельскохозяйственном машиностроении [55]. По данным работы [56], в России в период с 2006 по 2012 гг. выпуск отливок из высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита вырос на 12 % (до 900 тыс. т), а производство литья в целом сократилось в 4,5 раза с советских времен, сократилось число литейных производств с 3500 до 1250 предприятий, ликвидировано 10 НИИ литейного производства.

Выводы

Для решения проблем отрасли РЗМ в России необходим организационно-экономический механизм, по-

зволяющий реализовывать продукцию отечественной редкоземельной отрасли на внутреннем рынке взамен импортной. После этого необходимо будет нарастить мощности по разделению РЗМ. Ввод новых мощностей по добыче РЗМ не имеет смысла без создания новых отраслей промышленности, ориентированных на их потребление, в том числе в металлургии.

Мировая добыча РЗМ составляет 210 тыс. т в пересчете на оксиды. Развиваются не китайские проекты добычи и переработки РЗМ. Благодаря организации масштабного производства товаров потребления с РЗМ Китай остается мировым лидером в отрасли: в добыче и переработке РЗМ, в производстве товаров потребления с РЗМ. Разные источники оценивают долю металлургии в мировом потреблении РЗМ от 10 до 20 %.

Объем потребления РЗМ в России составляет 1230 т, из них 120 т потребляется металлургией. По направлениям металлургии – 86 % потребления РЗМ приходится на черную металлургию, из них 50 % идет на чугун и 36 % на сталь. Чаще всего РЗМ применяют в производстве высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита. Наиболее массовой сталью с РЗМ является сталь для трубной заготовки, на втором месте – рельсовая сталь. Доля стали с РЗМ не превышает 1 % суммарного объема ее производства.

В черной металлургии РЗМ используют в виде их сплавов (мишметалл, ферроцерий), чистых металлов (лантан, церий, иттрий), силицидов в составе ферросплавов на основе ферросилиция, комплексных модификаторов на основе кремния и без него.

Практически все исходные материалы с РЗМ для металлургии России импортируются (мишметалл, ферросплавы и чистые металлы). Вопрос импортозамещения на отечественном рынке сырьевых материалов с РЗМ для металлургии остается нерешенной актуальной задачей. Организация многотоннажного производства лигатур с РЗМ электропечным способом должна привести к снижению их стоимости по сравнению с получением модификаторов из мишметалла и чистых РЗМ. Проблема заключается в высокой стоимости продукции с РЗМ отечественных предприятий.

Несмотря на существенный рост потребления РЗМ в металлургии, объем внутреннего рынка остается небольшим. По потреблению РЗМ в металлургии в России наблюдается резкое отставание не только от мировых лидеров, но и от общемирового уровня. При решении вопроса импортозамещения и роста потребления высокопрочного чугуна, специальных сталей и сплавов, а также товаров потребления на их основе следует ожидать роста потребления РЗМ. По масштабам применения РЗМ отечественная металлургия не соответствует современным требованиям. При выводе отечественной металлургии на мировой уровень развития потребность в РЗМ может возрасти в 5 – 10 раз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ИТС 24-2017. Производство редких и редкоземельных металлов. – М.: Бюро НДТ, 2017. – 202 с.
2. Поляков Е.Г., Нечаев А.В., Смирнов А.В. Металлургия редкоземельных металлов. – М.: Металлургия, 2018. – 732 с.
3. Юшина Т.И., Петров И.М., Гришаев С.И., Черный С.А. Обзор рынка РЗМ и технологий переработки редкоземельного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S1. С. 577 – 607.
4. Годовой отчет открытого акционерного общества «Соликамский магниевый завод» за 2018 год. – Соликамск, 2019. – 91 с.
5. Mineral commodity summaries 2020. Ser.: Mineral Commodity Summaries. – Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2020. – 200 p.
6. ERECON (2015). Strengthening the European Rare Earths Supply Chain: Challenges and Policy Options. Kooroshy J., Tiess G., Tukker A. et al. URL: https://www.mawi.tu-darmstadt.de/media/fm/homepage/news_seite/ERECON_Report_v05.pdf.
7. Gholz E. Rare Earth Elements and National Security. – New York: Council on Foreign Relations® Inc, 2014. – 20 p.
8. Архипова Н.А., Левченко Е.Н., Волкова Н.М., Усова Т.Ю. Модель развития промышленности и рынка РЗМ в России // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 13 – 18.
9. Development of a Sustainable Exploitation Scheme for Europe's Rare Earth Ore Deposits. European REE market survey – Task 1.1.2 // Eds: E. Machacek, P. Kalvig. GEUS and D'Appolonia. 2017. – 163 p.
10. Golev A., Scott M., Erskine P.D. etc. Rare earths supply chains: Current status, constraints and opportunities // Resources Policy. 2014. Vol. 41. P. 52 – 59.
11. Binnemans K., Jones P.T. Rare earths and the balance problem // Journal of Sustainable Metallurgy. 2015. Vol. 1. No. 1. P. 29 – 38.
12. Некитайские редкоземельные // Металлургический бюллетень. 2018. № 10 – 11. С. 56 – 61.
13. Gambogi J. Rare earths // 2016 Minerals Yearbook. U.S. Geological Survey. 2019. P. 60.1 – 60.16.
14. Волков А.И. Состояние и перспективы использования редких металлов в черной металлургии // Разведка и охрана недр. 2020. № 3. С. 11 – 18.
15. Абрамов А.М., Соболев Ю.Б., Галиева Ж.Н. и др. Освоение технологии разделения РЗМ ОАО «СМЗ» на автоматизированном каскаде центробежных экстракторов собственной конструкции (модель ЭЦ-1000ПБ) // Цветная металлургия. 2015. № 4. С. 53 – 58.
16. Галиева Ж.Н., Волобуев О.И., Яценев А.А. и др. Универсальная технология разделения редкоземельных концентратов (РЗК) в каскадах центробежных экстракторов: разработка технологии и оборудования, освоение производства // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33. № 1 (211). С. 33 – 35.
17. Акрон: секрет успеха // Редкие земли. 2017. Т. 8. № 1. С. 76 – 81.
18. Смышляев В.Ю. О попутной добыче скандия из продуктивных рудов подземного выщелачивания на Далматовском месторождении урана // Горный журнал. 2017. № 8. С. 28 – 32.
19. Пробуждение российского скандия // Металлургический бюллетень. 2018. № 4 – 5 (192). С. 76 – 81.
20. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов России в 2018 году. – М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2019. – 426 с.
21. Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact // Geoscience Frontiers. 2019. Vol. 10. No. 4. P. 1285 – 1303.
22. Косынкин В.Д., Трубаков Ю.М., Сарычев Г.А. Прошлое и будущее редкоземельного производства в России // Металлы Евразии. 2011. № 5. С. 40 – 53.
23. Верещагин Ю.А., Емелина Т.Н. Редкоземельная сырьевая база России: прошлое, настоящее, будущее // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № S1. С. 24 – 34.
24. Statistical Compendium. Special publication. – U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1993. – 417 p.
25. Commodities at a glance. Special issue on rare earths. – New York, Geneva: United Nations conference on trade and development UNCTAD, 2014. No. 5. – 58 p.
26. Schüler D. Rare Earths – Facts & Figures. – Darmstadt: Öko-Institut, 2011. – 7 p.
27. Романова О.А., Позднякова Е.А. Развитие редкоземельного производства: мировые, национальные и региональные тенденции. – Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2011. – 46 с.
28. Ganguli R., Cook D.R. Rare earths: A review of the landscape // MRS Energy & Sustainability. 2018. Vol. 5. Article e9.
29. Seregina I.F., Volkov A.I., Ossipov K., Bolshov M.A. Characterization of REE-Nb ores by a combination of spectrochemical techniques // Spectrochimica Acta Part B – Atomic Spectroscopy. 2018. Vol. 148. P. 172 – 182.
30. Suli L.M., Ibrahim W.H.W., Aziz B.A. etc. A review of rare earth mineral processing technology // Chemical Engineering Research Bulletin. 2017. Vol. 19. P. 20 – 35.
31. Усова Т.Ю. Зарубежные технологии раздельного извлечения редкоземельных элементов // Редкие земли. 2018. Т. 9. № 1. С. 136 – 147.
32. Стрекопытов В. Ростех: редкоземельное направление // Редкие земли. 2017. Т. 8. № 1. С. 82 – 91.
33. Мелентьев Г.Б. Редкие земли России: перспективы и приоритеты // Редкие земли. 2015. Т. 4. № 1. С. 56 – 60.
34. Naumov A.V. Review of the world market of rare-earth metals // Russian Journal of Non-ferrous Metals. 2008. Vol. 49. No. 1. P. 14 – 22.
35. Guyonnet D., Planchon M., Rollat A. etc. Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 107. P. 215 – 228.
36. Fei Pan, Jian Zhang, Hao-Long Chen etc. Effects of rare earth metals on steel microstructures // Materials (Basel). 2016. Vol. 9. No. 6. P. 417.
37. Свистунова Т.В., Бобкова О.С., Белясов Б.Д. Влияние скандия на структуру и свойства коррозионноустойчивых сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2008. № 5 (635). С. 9 – 14.
38. Drapala J., Brozova S., Szurman I. etc. Influence of selected rare earth metals on structural characteristics of 42CrMo4 steel // Metalurgija. 2016. Vol. 55. No. 4. P. 757 – 760.
39. Collins J.F., Calkins V.P., McGurty J.A. Applications of rare earths to ferrous and non-ferrous alloys. – Cincinnati: General Electric, 1959. – 29 p.
40. Серегин А.Н. Применение сплавов РЗМ для повышения качества массовой металлургической продукции // Актуальные вопросы получения и применения РЗМ-2015: Сб. матер. Междунар. науч.-практич. конф. Москва, 25 июня 2015 г. – М.: ОАО «Ин-т "ТИНЦВЕТМЕТ"», 2015. С. 27 – 33.
41. Стулов П.Е., Серегин А.Н., Корзун В.К. Разработка технологии переработки редкоземельного сырья с получением лигатур // Актуальные вопросы получения и применения РЗМ-2015: Сб. матер. Междунар. науч.-практич. конф. Москва, 25 июня 2015 г. – М.: ОАО «Ин-т "ТИНЦВЕТМЕТ"», 2015. С. 161 – 163.
42. Примеров С.Н., Вихляев В.Б., Лихошва В.П. Комплексные бескремнистые лигатуры редкоземельных металлов для внепечной обработки железуглеродистых расплавов // Литейное производство. 1984. № 11. С. 9 – 10.
43. Ферросплавы с редко- и щелочноземельными металлами / И.В. Рябчиков, В.Г. Мизин, Н.П. Лякишев, А.С. Дубровин. – М.: Металлургия, 1983. – 272 с.
44. Емелина Т., Верещагин Ю. Редкоземельные элементы: металлургические перспективы // Уральский рынок металлов. 2007. № 5. С. 69 – 73.
45. Голубцов В.А., Дынин А.Я., Рогожина Т.В. и др. Применение продукции компании НПП при модифицировании стали // Литье и металлургия. 2009. № 3(52). С. 245 – 253.
46. Пат. 2530190 РФ. Модификатор для стали / В.В. Назаратин, А.В. Дегтярев, М.А. Егорова и др.; опубл. 10.10.2014. Бюл. № 28.

47. Зенкин Р.Н., Вальтер А.И. Модификаторы и технологии внепечной обработки высокопрочного чугуна // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 11. Часть 1. С. 30 – 41.
48. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В., Маринцев С.Н. и др. Использование редкоземельных металлов в технологии производства трубных марок стали // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2006. № 4. С. 51 – 53.
49. Голубцов В.А., Дынин А.Я., Шуб Л.Г. Микрокристаллические модификаторы серии Insteel® - путь к повышению срока службы труб // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2008. № 1. С. 55 – 58.
50. Литвинова Т.Е. Получение соединений индивидуальных РЗМ и попутной продукции при переработке низкокачественного редкометалльного сырья: Дис. ... докт. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2014. – 318 с.
51. Потребление РЗМ в России составило 1200 т за 2018 год // Металлургический бюллетень. 2019. № 4 – 5. С. 35 – 36.
52. Зайнуллин Е. Охота к перемене месторождений. «Ростех» вышел из редкоземельного проекта // Газета «Коммерсантъ» № 144 от 14.08.2019. С. 1.
53. Charalampides G., Vatalis K.I., Apostoplos B., Ploutarch-Nikolas B. Rare earth elements: Industrial applications and economic dependency of Europe // Procedia Economics and Finance. 2015. Vol. 24. P. 126 – 135.
54. Храменков С.В., Алиферинов А.Д., Примин О.Г. Трубы из высокопрочного чугуна для систем водоснабжения и водоотведения. – М.: МГСУ, 2015. – 192 с.
55. Гнатуш В.А., Дорошенко В.С. Тенденции мирового рынка литья из чугуна с шаровидным графитом // Процессы литья. 2017. № 2 (122). С. 70 – 78.
56. Дибров И.А. Состояние и перспективы литейного производства России // Выступление на XI Съезде литейщиков в Екатеринбурге 16 – 19 сентября 2013 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.unido-russia.ru/archive/special_02/special_02_art6/ (Дата обращения: 05.05.2020).

Поступила в редакцию 19 января 2020 г.

После доработки 20 мая 2020 г.

Принята к публикации 2 июня 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 6, pp. 405–418.

ANALYSIS OF THE USE OF RARE EARTH METALS IN FERROUS METALLURGY OF RUSSIA AND WORLD

A.I. Volkov¹, P.E. Stulov¹, L.I. Leont'ev^{1, 2, 3, 4}, V.A. Uglov¹

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-405-418

¹I.P. Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow, Russia

²Institute of Metallurgy of the UB RAS, Ekaterinburg, Russia

³National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

⁴Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences), Moscow, Russia

Abstract. The analysis of the current state of production of rare earth metals (REM) in Russia and in the world was made. Information about REM production in different countries of the world and about new foreign projects for REM production and processing is provided. The article presents the balance of production, export and import of raw materials and products with REM, including scandium and yttrium, in Russia. The maximum volume of REM consumption in Russia was calculated taking into account imported products with REM. This data was compared with other countries, including the former USSR. Much attention is paid to the use of REM in metallurgy. Data on the influence of REM on the properties of cast iron and steel are presented. Information is given about the forms of REM used for their use in the Russian ferrous metallurgy. We have studied the structure of REM consumption in ferrous and non-ferrous metallurgy. On the example of two enterprises (one of them specializes in mass production, and the second – on production of special steels), the structure of REM consumption for steel alloying was studied by type and scope of its application. The development peculiarities of REM consumption in Russian ferrous metallurgy were investigated. The volume of consumption was calculated; data on imports of raw materials with REM for metallurgy and the producers of ferroalloys with REM in Russia is given. We have analyzed the spectrum of steel products with REM. A comparison of the consumption of REM in the metallurgy of Russia and foreign countries is presented. The reasons for insufficient consumption of REM in the Russian metallurgy are considered, an assessment is given on the change in production volumes of certain types of steel and cast iron, and recommendations are made on the growth of REM consumption in metallurgy.

Keywords: rare earth metals (REM), ferroalloys, ligatures, modifiers, cast iron, steel, market analysis, balance of production and consumption, ferrous metallurgy.

REFERENCES

1. ITS 24-2017. *Proizvodstvo redkikh i redkozemel'nykh metallov* [Production of rare and rare earth metals]. Moscow: Byuro NDT, 2017, 202 p. (In Russ.).
2. Polyakov E.G., Nechaev A.V., Smirnov A.V. *Metallurgiya redkozemel'nykh metallov* [Metallurgy of rare earth metals]. Moscow: Metallurgizdat, 2018, 732 p. (In Russ.).
3. Yushina T.I., Petrov I.M., Grishaev S.I., Chernyi S.A. An overview of REM market and technologies for processing rare earth raw materials. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2015, no. S1, pp. 577–607. (In Russ.).
4. *Godovoi otchet otkrytogo aktsionernogo obshchestva “Solikamskii magniyevoi zavod” za 2018 god* [Annual report of OJSC “Solikamsk Magnesium Plant” for 2018]. Solikamsk: 2019, 91 p. (In Russ.).
5. *Mineral commodity summaries 2020. Ser.: Mineral Commodity Summaries*. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2020, 200 p.
6. *ERECON (2015) Strengthening the European Rare Earths Supply Chain: Challenges and Policy Options*. Kooroshy J., Tiess G., Tukker A., Walton A. eds. Available at URL: https://www.mawi.tu-darmstadt.de/media/fm/homepage/news_seite/ERECON_Report_v05.pdf
7. Gholz E. *Rare Earth Elements and National Security*. New York: Council on Foreign Relations® Inc. 2014, 20 p.
8. Arkhipova N.A., Levchenko E.N., Volkova N.M., Usova T.Yu. Model of development of the REM industry and market in Russia. *Razvedka i okhrana nedr.* 2014, no. 9, pp. 13–18. (In Russ.).
9. *Development of a Sustainable Exploitation Scheme for Europe's Rare Earth Ore Deposits. European REE market survey – Task 1.1.2*. Machacek E., Kalvig P. eds. GEUS and D'Appolonia, 2017, 163 p.
10. Golev A., Scott M., Erskine P.D., Ali S.H., Ballantyne G.R. Rare earths supply chains: Current status, constraints and opportunities. *Resources Policy*. 2014, vol. 41, pp. 52–59.
11. Binnemans K., Jones P.T. Rare earths and the balance problem. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2015, vol. 1, no. 1, pp. 29–38.
12. Non-Chinese rare earths. *Metallurgicheskii byulleten'*. 2018, no. 10-11, pp. 56–61. (In Russ.).
13. Gambogi J. Rare earths. In: *2016 Minerals Yearbook. U.S. Geological Survey*. 2019, pp. 60.1–60.16.

14. Volkov A.I. State and prospects of the use of rare metals in ferrous metallurgy. *Razvedka i okhrana nedr.* 2020, no. 3, pp. 11–18. (In Russ.).
15. Abramov A.M., Sobol' Yu.B., Galieva Zh.N., Gerya V.O., Semenov A.A. Mastering the REC separation technology of JSC "SMZ" on an automated cascade centrifugal extractors (model ETs-1000PB). *Tsvetnaya metallurgiya.* 2015, no. 4, pp. 53–58. (In Russ.).
16. Galieva Zh.N., Volobuev O.I., Yachmenev A.A., Igumnov M.S., Gerya V.O., Bydanov B.A., Dronov D.V., Semenov A.A. Universal technology for separation of rare earth concentrates (REC) in cascade centrifugal extractors: Development of technology, equipment and production. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii.* 2019, vol. 33, no. 1 (211), pp. 33–35. (In Russ.).
17. Akron: The secret of success. *Redkie zemli.* 2017, vol. 8, no. 1, pp. 76–81. (In Russ.).
18. Smyshlyaev V.Yu. On the pre-production mining of scandium from productive solutions of underground leaching at the Dalmatovskoe uranium deposit. *Gornyi zhurnal.* 2017, no. 8, pp. 28–32. (In Russ.).
19. Awakening of Russian scandium. *Metallurgicheskii byulleten'.* 2018, no. 4-5 (192), pp. 76–81. (In Russ.).
20. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov Rossii v 2018 godu* [State report on the state and use of mineral resources in Russia in 2018]. Moscow: Ministerstvo prirodnnykh resursov i ekologii RF, 2019, 426 p. (In Russ.).
21. Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers.* 2019, vol. 10, no. 4, pp. 1285–1303.
22. Kosynkin V.D., Trubakov Yu.M., Sarychev G.A. Past and future of rare earth production in Russia. *Metally Evrazii.* 2011, no. 5, pp. 40–53. (In Russ.).
23. Vereshchagin Yu.A., Emelina T.N. Russia's rare earth resource base: Past, present, and future. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'.* 2007, no. S1, pp. 24–34. (In Russ.).
24. *Statistical Compendium.* Special publication. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1993, 417 p.
25. *Commodities at a glance. Special issue on rare earths.* New York, Geneva: United Nations conference on trade and development UNCTAD, 2014, no. 5, 58 p.
26. Schüller D. *Rare Earths – Facts & Figures.* Darmstadt: Öko-Institut, 2011, 7 p.
27. Romanova O.A., Pozdnyakova E.A. *Razvitie redkozemel'nogo proizvodstva: mirovye, natsional'nye i regional'nye tendentsii* [Development of rare earth production: Global, national and regional trends]. Ekaterinburg: Institut ekonomiki UrO RAN, 2011, 46 p. (In Russ.).
28. Ganguli R., Cook D.R. Rare earths: A review of the landscape. *MRS Energy & Sustainability.* 2018, vol. 5, article e9.
29. Seregina I.F., Volkov A.I., Ossipov K., Bolshov M.A. Characterization of REE-Nb ores by a combination of spectrochemical techniques. *Spectrochimica Acta Part B – Atomic Spectroscopy.* 2018, vol. 148, pp. 172–182.
30. Suli L.M., Ibrahim W.H.W., Aziz B.A., Deraman M.R., Ismail N.A. A review of rare earth mineral processing technology. *Chemical Engineering Research Bulletin.* 2017, vol. 19, pp. 20–35.
31. Usova T.Yu. Foreign technologies for separate extraction of rare earth elements. *Redkie zemli.* 2018, vol. 9, no. 1, pp. 136–147. (In Russ.).
32. Strekopytov V. Rostec: rare-earth direction. *Redkie zemli.* 2017, vol. 8, no. 1, pp. 82–91. (In Russ.).
33. Melent'ev G.B. Russian rare earths: Prospects and priorities. *Redkie zemli.* 2015, vol. 4, no. 1, pp. 56–60. (In Russ.).
34. Naumov A.V. Review of the world market of rare-earth metals. *Russian Journal of Non-ferrous Metals.* 2008, vol. 49, no. 1, pp. 14–22.
35. Guyonnet D., Planchon M., Rollat A., Escalon V., Tuduri J., Charles N., Vaxelaire S., Dubois D., Fargier H. Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe. *Journal of Cleaner Production.* 2015, vol. 107, pp. 215–228.
36. Fei Pan, Jian Zhang, Hao-Long Chen, Yen-Hsun Su, Chia-Liang Kuo, Yen-Hao Su, Shin-Hau Chen, Kuan-Ju Lin, Ping-Hung Hsieh, Weng-Sing Hwang Effects of rare earth metals on steel microstructures. *Materials (Basel).* 2016, vol. 9, no. 6, pp. 417.
37. Svistunova T.V., Bobkova O.S., Belyasov B.D. Effect of scandium on structure and properties of corrosion-resistant steels. *Metal Science and Heat Treatment volume.* 2008, vol. 50, no. 5-6, pp. 214–219.
38. Drapala J., Brozova S., Szurman I., Konecna K., Kostjukova G., Vontorova J., Jonsta P., Sobotkova K. Influence of selected rare earth metals on structural characteristics of 42CrMo4 steel. *Metallurgija.* 2016, vol. 55, no. 4, pp. 757–760.
39. Collins J.F., Calkins V.P., McGurty J.A. *Applications of rare earths to ferrous and non-ferrous alloys.* Cincinnati: General Electric, 1959, 29 p.
40. Seregin A.N. Application of REM alloys to improve the quality of mass metallurgical products. In: *Aktual'nye voprosy polucheniya i primeneniya RZM-2015: sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Moskva, 25 iyunya 2015 g.* [Actual Issues of Obtaining and Applying of REM-2015: Proc. of Int. Sci. – Pract. Conf., Moscow, June 25, 2015]. Moscow: OAO "In-t "GINTsVETMET". 2015, pp. 27–33. (In Russ.).
41. Stulov P.E., Seregin A.N., Korzun V.K. Development of processing technology for rare earth raw materials with obtaining ligatures. In: *Aktual'nye voprosy polucheniya i primeneniya RZM-2015: sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Moskva, 25 iyunya 2015 g.* [Actual Issues of Obtaining and Applying of REM-2015: Proc. of Int. Sci. – Pract. Conf., Moscow, June 25, 2015]. Moscow: OAO "In-t "GINTsVETMET". 2015, pp. 161–163. (In Russ.).
42. Primerov S.N., Vikhlyayev V.B., Likhoshva V.P. Complex silicon-free REM ligatures for ladle treatment of iron-carbon melts. *Liteinoye proizvodstvo.* 1984, no. 11, pp. 9–10. (In Russ.).
43. Ryabchikov I.V., Mizin V.G., Lyakishev N.P., Dubrovin A.S. *Ferrosplyvy s redko- i shchelochnozemel'nymi metallami* [Ferroalloys with rare and alkaline earth metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 272 p. (In Russ.).
44. Emelina T., Vereshchagin Yu. Rare earth elements: Metallurgical prospects. *Ural'skii rynek metallov.* 2007, no. 5, pp. 69–73. (In Russ.).
45. Golubtsov V.A., Dynin A.Ya., Rogozhina T.V., Ryabchikov I.V., Usmanov R.G. Application of the company NPP output at modification of steel. *Lit'e i metallurgiya.* 2009, no. 3(52), pp. 245–253. (In Russ.).
46. Nazaratina V.V., Degtyarev A.V., Egorova M.A., Novikov V.A., Sverchkov S.N. *Modifikator dlya stali* [Modifier for steel]. Patent RF no. 2530190. *Byulleten' izobretenii.* 2014, no. 28. (In Russ.).
47. Zenkin R.N., Val'ter A.I. Modifiers and technologies for ladle treatment of high-strength cast iron. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki.* 2014, Issue 11, Part 1, pp. 30–41. (In Russ.).
48. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V., Marintsev S.N. etc. The use of rare earth metals in pipe steel production. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya".* 2006, no 4, pp. 51–53. (In Russ.).
49. Golubtsov V.A., Dynin A.Ya., Shub L.G. Microcrystalline modifiers of the Insteel® series – the way to increase the service life of pipes. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya".* 2008, no. 1, pp. 55–58. (In Russ.).
50. Litvinova T.E. *Poluchenie soedinenii individual'nykh RZM i poputnoi produktsii pri pererabotke nizkokachestvennogo redko-metal'nogo syr'ya: dis. ... doktora tekhn. nauk* [Obtaining compounds of individual REM and pre-products at processing of low-quality rare-metal raw materials: Dr. Tech. Sci. Diss.]. St. Petersburg: 2014, 318 p. (In Russ.).
51. Consumption of REM in Russia amounted to 1200 tons in 2018. *Metallurgicheskii byulleten'.* 2019, no. 4-5, pp. 35–36. (In Russ.).
52. Zainullin E. Hankering for a change of fields. Rostec withdraws from rare earth project. *Gazeta "Kommersant".* no. 144, 14.08.2019, p. 1. (In Russ.).
53. Charalampides G., Vatalis K.I., Apostoplos B., Ploutarch-Nikolas B. Rare earth elements: Industrial applications and economic dependency of Europe. *Procedia Economics and Finance.* 2015, vol. 24, pp. 126–135.

54. Khramenkov S.V., Aliferenkov A.D., Primin O.G. *Truby iz vysokoprochnogo chuguna dlya sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya* [High-strength cast iron pipes for water supply and drainage systems]. Moscow: MGSU, 2015, 192 p. (In Russ.).
55. Gnatush V.A., Doroshenko V.S. Trends in the global market of cast iron with spherical graphite. *Protsessy lit'ya*. 2017, no. 2 (122), pp. 70–78. (In Russ.).
56. Dibrov I.A. *Sostoyanie i perspektivy liteinogo proizvodstva Rossii: Vystuplenie na XI S''ezde liteishchikov v Ekaterinburge 16-19 sentyabrya 2013 g.* [State and prospects of foundry production in Russia]. Electronic resource. Available at URL: http://www.unido-russia.ru/archive/special_02/special_02_art6/ (Accessed 05.05.2020). (In Russ.).

Information about the authors:

A.I. Volkov, Cand. Sci. (Chem.), Deputy Director of the Centre of New Metallurgical Technologies (rhenium@list.ru)

P.E. Stulov, Junior Researcher (pavel1411@rambler.ru)

L.I. Leont'ev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician, Adviser of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher

V.A. Uglov, Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director

Received January 19, 2020

Revised May 20, 2020

Accepted June 2, 2020

УДК 669.1:622.341.1

EFFECT OF MODIFIED HUMIC ACID (MHA) BINDER ON ROASTING BEHAVIOR OF MONGOLIAN “TUMURTEI” IRON ORE CONCENTRATE BRIQUETTES

Bayaraa Saraatanbazar, Ph.D. Student (s.bayar9@gmail.com)

Guang-hui Li, Professor (2667361847@qq.com)

School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University
(410083, China, Changsha, Hunan)

Abstract. There are two major groups of binder: organic and inorganic binder for agglomeration process for reduction, and sintering for steel production. In this work, effect of composite binder on roasting of Mongolian “Tumurtei” iron ore concentrate briquettes in ambient atmosphere was studied, aiming to clarify optimal parameters of roasting behavior with three different MHA binders for direct reduction. Lignite contains organic and inorganic substances, and according to many previous investigations, it can be raw material for extraction of composite binder. Pressed iron concentrate with MHA binder was subjected to oxidation and reduction process in the electrical furnace. The optimum conditions of experiments were as follows. Parameters of briquetting process were carried out according to the no-binder briquetting test 0.75 t·cm⁻² pressure, 5 seconds pressing time, 8 % of moisture content, oxidation at 950 °C under air flow for 10 min, and reduction at 1100 °C under CO atmosphere. As a result, MHA binder extracted from “Baganuur” lignite affected the reduction degree higher than another two binders in this study. Total iron content in reduced iron is attained to 98.33 % with 1 % of MHA extracted from “Baganuur” lignite. Reduction degree can be expressed by loss of oxygen.

Keywords: magnetite, MHA binder, reduction, briquette.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-419-427

INTRODUCTION

Steel is one of the most important much applied, and low cost metal materials in modern industry. At present the scale of the steel industry is constantly expanding, iron and steel production technology is developing and improving. Direct reduction (DR) technological process is also developing toward compact, efficient, continuous, clean and environmentally friendly directions [1]. According to statistics of the International Iron and Steel Association, the production of crude steel in the world increased in 64 countries reporting 151.7 million tones (Mt) in August 2018, a 2.6 % increase compared to August 2017 [2].

Direct reduced iron is main source of crude steel making, and its production also constantly increases due to the increase of steel production as shown in Fig. 1 [3]. Mongolia has rich resources of iron ore and coal which evenly distribute throughout the Mongolian territory. Measured geological reserves contain 1 billion tons of iron ore, 162.3 billion tons of coal, and these would obviously increase in the future. There is a lack of steel production from iron ore, especially for direct reduction plants for steel making in Mongolia. According to statistics of the Mineral Resource Agency of Mongolia, mining products account for 16 % of gross domestic product (GDP), and 70 % of total industrial product at last three years [4].

According to the statistic of Mongolian Customs Agency for last 10 years, 4 million tons of iron concentrate are exported and 140 thousand tons of steel armature for con-

struction are annually imported from foreign various countries (Fig. 2) [5].

Binders are widely used in agglomeration operations, such as briquetting and making pellets, to assure the desired agglomeration properties with regard to subsequent handling, transportation and processing [6].

There are two major binder groups of organics and inorganics. Previously many studies have proved that effect of MHA binder on mechanical strength of pellets is greater than of bentonite. And consumption of MHA binder is low-

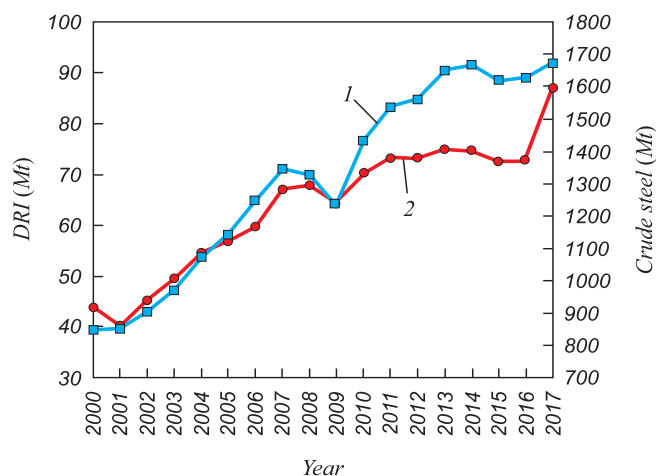


Fig. 1. World crude steel (1) and DRI (2) production by years

Рис. 1. Мировое производство неафинированной стали (1) и железа прямого восстановления (2) по годам

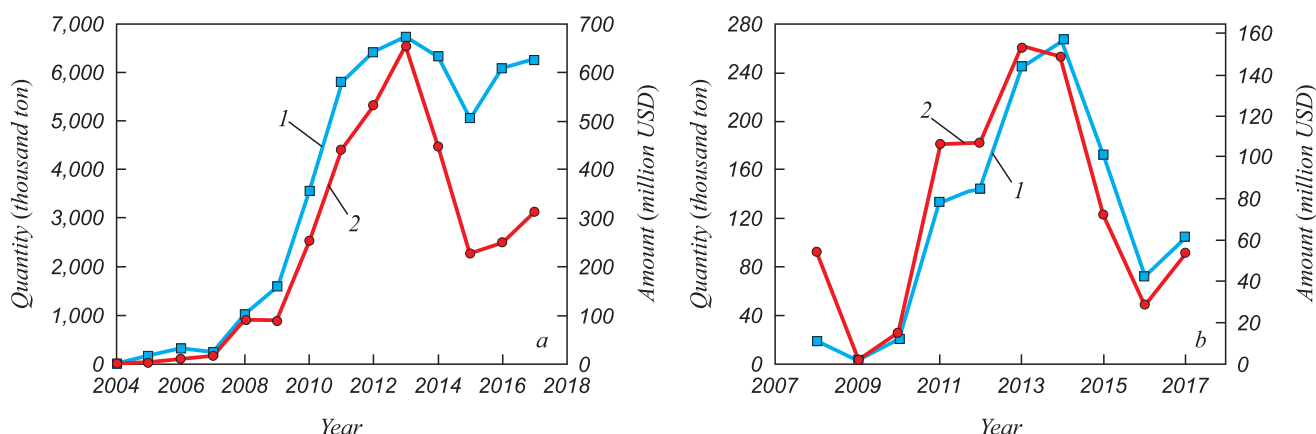


Fig. 2. Dynamic statistics of Mongolian customs:
a – exported iron ore; b – imported steel product (armature); 1 – quantity; 2 – amount

Рис. 2. Статистика монгольской таможни:
a – экспортируемая железная руда; b – импортируемый стальной продукт (арматура); 1 – количество; 2 – общая стоимость

er compared with bentonite [7 – 8]. Lignite and brown coal with great resources in Mongolia [9] could be used as the main source of humic substances for the preparation of organic binder. A type of novel organic binders namely modified humic acid (MHA) binder, with high binding property and economic benefits have been developed by Central South University (CSU) in China [10]. The MHA binder is comprised of organic (i.e. fulvic acid, humic acid) and inorganic active fractions [11].

Benefits to using organic binder: Organic binders might be used for a variety of reasons, but perhaps, the most reported benefit is a reduction in pellet silica content. The traditional binder, bentonite clay, generally increases silica content in iron ore pellet by 0.5 % depending on bentonite dosage and composition. Organic binders are combusted during the roasting process, and may leave virtually no ash residue among the pellet microstructure of roasted pellet [12]. Ac-

cording to many previous investigations, effect of the most organic binders leads to the required characteristics of roasted pellets [13].

MATERIALS AND METHODS

Materials

The magnetite concentrate is taken from “Tumurtei” mine in Mongolia. The iron concentrate sample went to size distribution test presented in Table 1. The iron concentrate particle size is too coarse, under below 200 mesh part is 28.13 %, thus it needs to be ground. Then chemical composition of the ground sample was tested by XRF (Table 2). The concentrate sample contained, (% mass.): 65.85 T_{Fe} , 1.70 Al_2O_3 , 3.44 SiO_2 and 1.55 MgO . Particle size distribution and specific surface area of the sample were sepa-

Table 1

Size distribution of the sample

Таблица 1. Гранулометрический состав образца

Size, mm	+0.100	–0.1 ... +0.074	–0.074 ... +0.045	–0.045 ... +0.032	–0.032
Content, %	62.56	9.31	15.67	4.52	7.95

Table 2

Chemical composition of the iron ore concentrate

Таблица 2. Химический состав железорудного концентрата

Components	T_{Fe}	FeO	Fe_2O_3	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	Mn
Content, %	65.85	24.08	94.15	0.48	1.56	1.70	3.44	0.49	0.069
Components	P	S	Cu	K_2O	Na_2O	–	–	–	–
Content, ppm	18.69	330.04	7.57	1,529.97	137.68	–	–	–	–

rately tested by water sieving method and air permeability method (DBT-127 model), the content of the sample below 0.074 mm after grinding was higher than 80 %. The specific surface area of the sample was 649.53 cm²/g. Texture of the iron ore concentrates which was measured by Leica optical microscope and XRD pattern, is shown on Fig. 3, indicating the main minerals: magnetite, hematite and quartz associated with each other closely.

The main mineral composition of “Tumurtei” iron ore concentrate was identified as principally magnetite (Fe₃O₄) and hematite (Fe₂O₃) as shown on Fig. 4.

In this study, 3 different lignites namely *A*, *B* and *C* – “Baganuu”, “Khuut” and “Liling” were used. Mongolian coal *A* and *B*, and coal *C* from Liling in Hunan Province, China were selected. As well-known, lignite contains organic and inorganic constituents simultaneously [14].

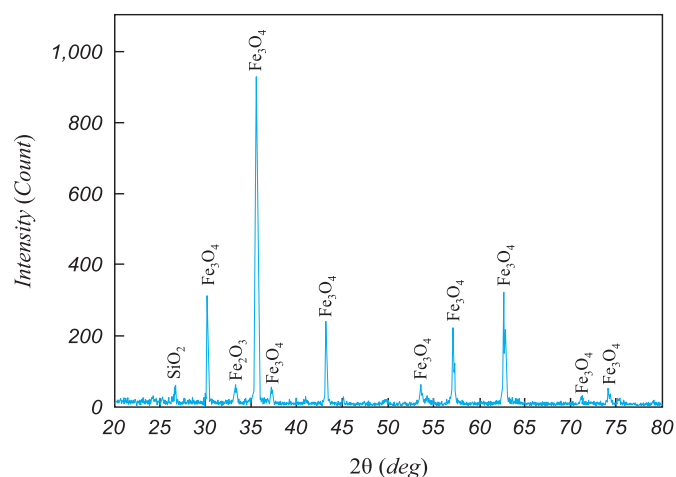


Fig. 3. XRD pattern of magnetite concentrate

Рис. 3. Рентгенограмма магнетитового концентрата

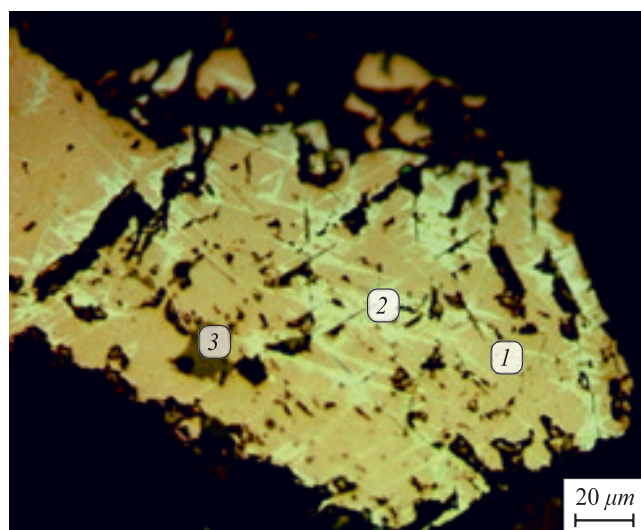


Fig. 4. Single particle microstructure of iron ore concentrate:
I – magnetite; 2 – hematite; 3 – quartz

Рис. 4. Микроструктура частицы железорудного концентрата:
I – магнетит; 2 – гематит; 2 – кварц

Table 3

Proximate analysis of lignite coal (% mass.)

Таблица 3. Примерный анализ бурого угля, % (по массе)

Coal	Proximate analysis					
	<i>W</i> , %	<i>V</i> , %	Ash, %	FC	<i>Q</i> , kCal/kg	TC
<i>A</i>	9.00	39.44	10.50	41.06	6,004	70.5
<i>B</i>	5.39	48.04	3.50	43.03	5,775	73.1
<i>C</i>	3.20	34.79	22.58	39.43	5,236	–

At the beginning, the samples were homogenized and dried, then crushed to powders with the granularity below 0.074 mm [15]. The proximate analysis of lignite indicates that these samples consists of 39.44 %. The proximate analysis of lignite indicates that these samples consists of 39.44, 48.04 and 34.79 % of volatile matter, the ash contents were 10.50, 3.50, 22.58 %, the grade of fixed carbon 41.00, 43.00, 39.43 in coal *A*, *B* and *C*, respectively, measured by Sundry SDTGA5000 analyzer (Table 3).

Methods

Extraction of MHA from lignite.

MHA was extracted from three different lignites (noted above) under same conditions. Powdered and homogenized brown coal was mixed with distilled water chemical pure 0.5 M of sodium-hydroxide in a glass flask. Substances ratio and stirring speed, pH values are obtained from the studies [16]. MHA solution and sediments were subjected to drying until full drying at 60 °C in a drying furnace; then the weight was determined. Finally extraction yield of MHA was calculated according to the balance of products. The extraction flow sheet is shown in Fig. 5.

The chemical composition of varies MHA binder were determined by XRF as presented below:

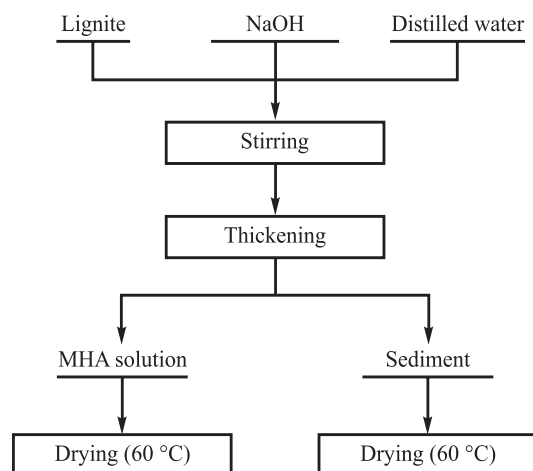


Fig. 5. Extraction flow of MHA binder from lignite

Рис. 5. Схема извлечение связующего МНА из бурого угля

Coal	A	B	C
Fe ₂ O ₃	5.43	4.92	12.80
K ₂ O	0.82	0.55	1.16
Na ₂ O	48.95	53.05	8.04
SiO ₂	21.17	13.11	43.41
Al ₂ O ₃	9.42	5.66	25.22
CaO	2.24	7.54	1.05
MgO	0.76	1.57	0.69
P ₂ O ₅	0.19	0.17	0.20
SO ₃	8.53	10.58	–
TiO ₂	0.11	0.26	–

Preparation of binder briquettes.

Preparation of the samples for briquetting process was carried out by mixing a certain amount of magnetite concentrate with different stoichiometric amount of MHA binder ranging from 0.5 up to 1.5 stoichiometric ratios. Those amounts of binders were extracted from selected lignites under alkaline condition.

The mixture of raw materials and 8 % water were input in a mold; then placed in small scale hydraulic presser described on Fig. 6. Green briquette with a diameter 10 mm

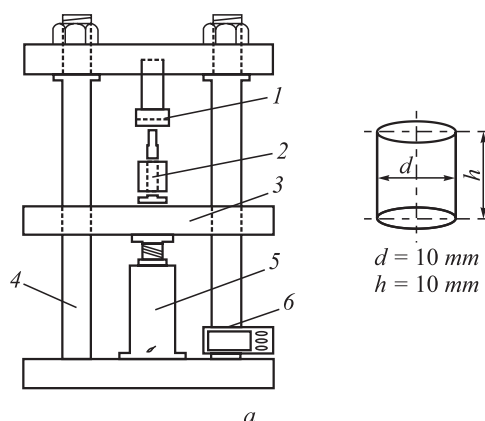


Fig. 6. Schematic layout of hydropresser (a) and appearance of green briquette (b):

1 – sensor pressure; 2 – metal cylinder bottle; 3 – movable plate; 4 – vertical core; 5 – hydraulic presser; 6 – pressing strength controller

Рис. 6. Схема гидропресса (a) и внешний вид зеленого брикета (b):

1 – сенсор давления; 2 – металлическая цилиндрическая бутылка; 3 – подвижная плита; 4 – вертикальный стержень; 5 – гидравлический пресс; 6 – контроллер силы прессования

and a height $\approx 10 \text{ mm}$ was produced under different conditions such as pressure and pressing time to making observed optimal condition. The green briquettes were dried at 100°C to obtain dry briquette. Then the produced briquettes were subjected to mechanical tests including dropping damage resistance test and compressive strength test.

Mechanical strength tests.

Ten green briquettes are individually dropped from a height of 50 cm onto a steel plate until breakage. The mean value of the tested briquettes gives their average dropping damage resistance [17].

The compression strength of green briquettes was determined, at least 10 briquettes sample were compressed on small size hydraulic press until they break onto electric balance. The compression strength of roasted-oxidized ten briquettes was determined by a universal material experimental machine (RHY-100B, China). The mean value for the tested briquettes gives their compressive strength. The observed load corresponds to the compressive strength measured in MPa for briquette [18].

Reduction, roasting tests and phase characteristic analysis.

The preheating and roasting tests were observed in a laboratory scale of horizontal electrically heated tube furnace with an internal diameter of 50 mm and an external diameter of 70 mm, schematically described on Fig. 7. Ten dry briquettes which contain 0.5 – 1.5 stoichiometric amount of three different MHA were placed in corundum crucible, and then pushed into the preheating zone of the furnace. The preheated sample was slowly and carefully

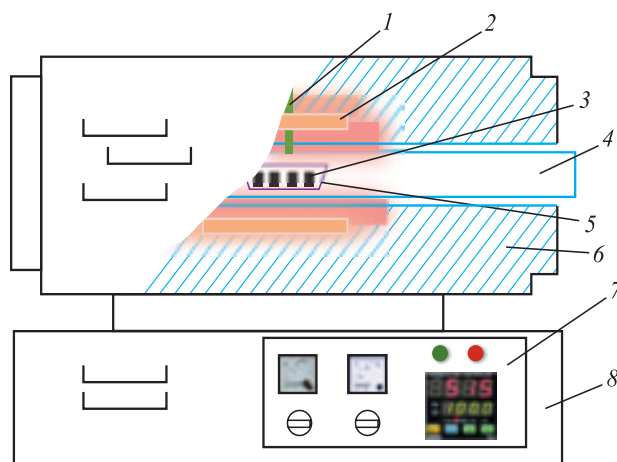


Fig. 7. Schematic layout of laboratory electric furnace:

1 – thermocouple; 2 – heating resistor; 3 – sample; 4 – corundum tube; 5 – corundum substrate; 6 – refractory lining; 7 – control panel and electrical switch; 8 – main core

Рис. 7. Схема лабораторной электропечи:

1 – термопара; 2 – нагревательный резистор; 3 – образец; 4 – корундовая трубка; 5 – корундовая подложка; 6 – огнеупорная футеровка; 7 – панель управления и электрический выключатель; 8 – основной корпус

pushed to appointed temperature of roasting zone. Finally, the roasted samples were pulled out and naturally cooled in room temperature [18]. Heating was carried out at different temperatures ranging from 950 °C up to 1150 °C for a different time. To heated at different temperatures, temperature ranging from 950 °C up to 1150 °C for a different time. The gas consumption of CO as reducer was constant (4L/min) at the reduction tests.

Optical microscope observation.

The microstructures of polished briquettes before and after reduction were studied using a Leica DMRXE microscope (Germany).

RESULTS AND DISCUSSION

Effect of binder dosage on properties of green briquette

The drop damage resistance and compressive strength of the green briquettes are shown in Fig. (4b), with respect to the different stoichiometric amounts of MHA binder under optimized briquetting load of 0.75 ton for fine magnetite (+80 % of -0.074 mm fraction) concentrate. It was found that the drop damage resistance and compressive strength

of produced briquettes increased with increasing binder dosage for every constant load and reached its maximum value at 1.5 stoichiometric amounts of binder fines for both concentrate sizes. The compressive strength of “Bg” green briquettes from fine concentrate with Bg MHA reached 12.32 MPa which is higher than for “Li” MHA of briquettes. The results of mechanical strengths tests of green briquettes are presented in Table 4 and Fig. 8.

Parameters of briquetting process were carried out according to the no-binder briquetting test 0.75 t·cm⁻² pressure, 5 seconds pressing time, 8 % of moisture content.

Effect of binder dosage on properties of roasted briquette

Firstly the roasting of produced briquettes at different temperatures ranging from 850 °C up to 1100 °C for different time at ambient atmosphere leads to optimized time and temperature. Optimal conditions of roasting-oxidation were 10 min and 950 °C. The temperature range is 10 °C per minute noted other before investigation. CCS of “Kh” is higher than “Bg” and “Li” briquettes, but FeO content of “Kh” increased with increasing MHA dosage (Fig. 9). Organic binders are easily burned out during roasting, leading to the generation of porosity as shown in Fig. 10. The poro-

Table 4

Effect of various MHA dosage on mechanical strength

Таблица 4. Влияние количества МНА на механическую прочность

Green briquette	Compressive strength, MPa					Dropping number, N				
MHA dosage	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
Bg (coal A)	3.50	3.60	4.70	4.99	5.40	1.30	1.50	2.20	2.50	2.80
Kh (coal B)	6.40	8.20	10.3	12.32	12.43	1.70	2.30	2.50	4.30	4.30
Li (coal C)	7.67	8.33	9.57	9.43	9.23	1.90	2.00	2.60	2.70	3.20

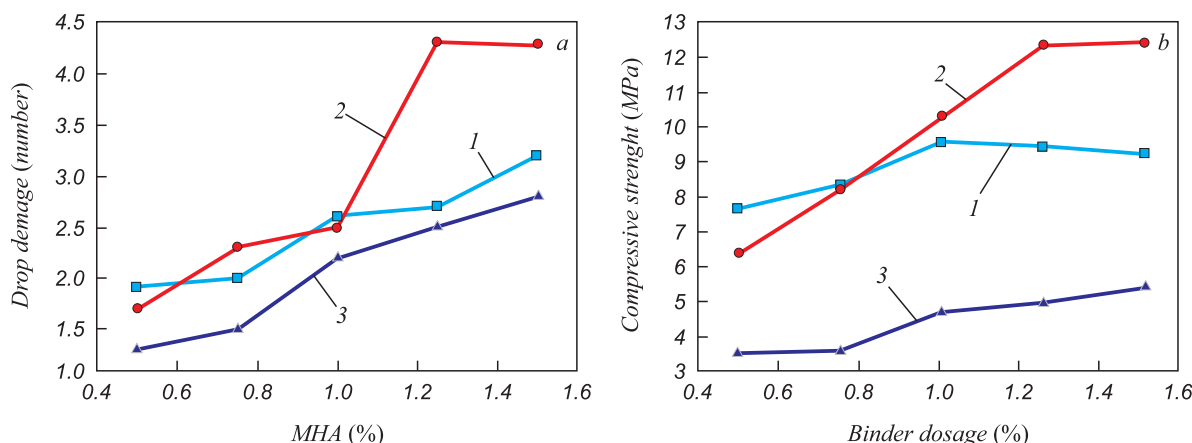


Fig. 8. Effect of MHA dosage on drop damage (a) and compressive strength (b) of green briquettes: 1 – Li; 2 – Kh; 3 – Bg

Рис. 8. Влияние количества МНА на устойчивость при падении (a) и прочность на сжатие (b) зеленого брикета: 1 – Li; 2 – Kh; 3 – Bg

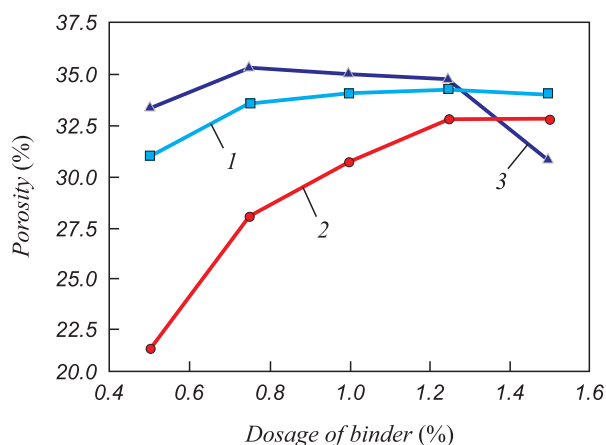


Fig. 9. Effect of MHA dosage on the porosity of roasted briquettes:
1 – Li; 2 – Kh; 3 – Bg

Рис. 9. Влияние количества МНА на пористость обожженных брикетов:
1 – Li; 2 – Kh; 3 – Bg

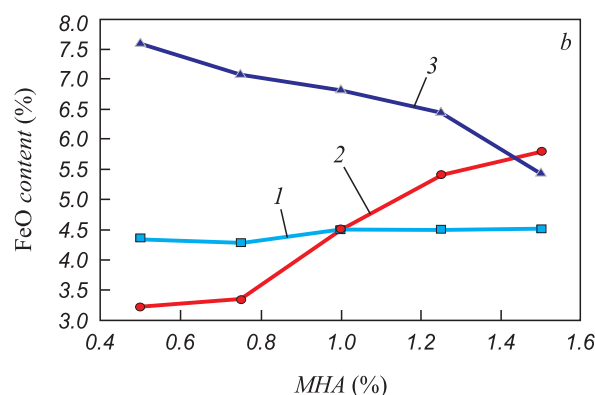
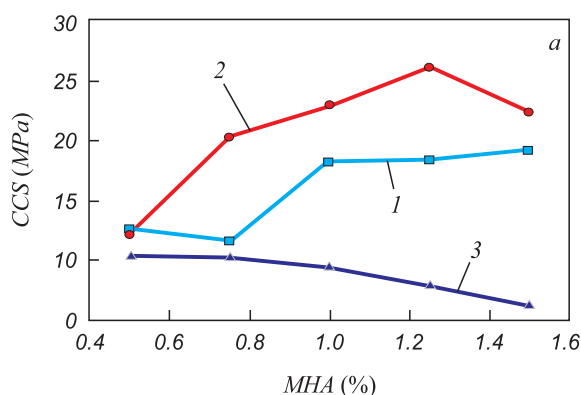


Fig. 10. Effect of MHA binder dosage on compressive crushing strength (a) and FeO content (b) at 950 °C for 10 min:
1 – Li; 2 – Kh; 3 – Bg

Рис. 10. Влияние количества связующего МНА на прочность при сжатии (a) и содержание FeO (b) при 950 °C в течение 10 мин:
1 – Li; 2 – Kh; 3 – Bg

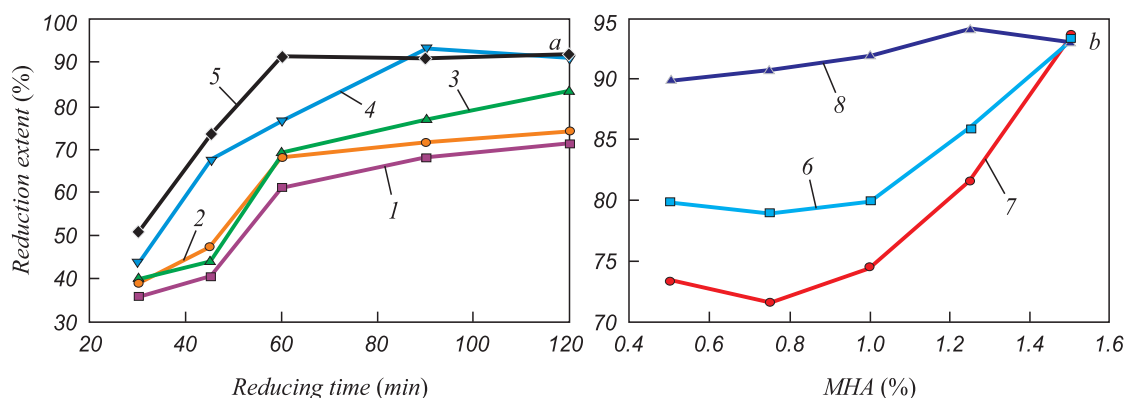


Fig. 11. Relation between reduction extent and reduction time under different temperature at °C:
950 (1); 1000 (2); 1050 (3); 1100 (4); 1150 (5) without binder (a); relation between reduction
extent and different stoichiometric amount of various MHA: Li (6); Kh (7); Bg (8) at 1100 °C, 90 min (b)

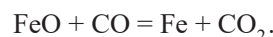
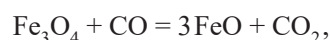
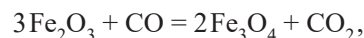
Рис. 11. Соотношение между степенью восстановления и временем восстановления
при разных температурах, °C: 950 (1); 1000 (2); 1050 (3); 1100 (4); 1150 (5) (a); соотношение
между степенью восстановления и стехиометрическим количеством различных МНА:
Li (6); Kh (7); Bg (8) при 1100 °C, 90 мин (b)

sity [19] is the most important factor to extent of reduction (Fig. 6, 8).

Effect of various MHA on reduced magnetite briquettes

The reduction procedure of magnetite briquettes with MHA binders extracted from different lignites was made in laboratory type electrical furnace in the CO atmosphere (Fig. 3).

The reaction of Fe_3O_4 to Fe by CO is:



The results are presented on the Fig. 3 in terms of the percent reducing extent against temperature due to oxygen

loss by CO gas which was produced during the reduction. The reduction degree was calculated by mass loss and FeO content was defined as:

$$R_t = 100 \left(\frac{0.11W_1}{0.43W_2} + \frac{m_1 - m_2}{m_2 \cdot 0.43W_2} \cdot 100 \right),$$

R_t – reduction degree, %; W_1 – FeO content of oxidized briquettes before reduction, %; W_2 – total iron content before reduction, %; m_1 – mass of sample before reduction, g; m_2 – mass of reduced briquettes, g.

The phase characteristics of the magnetite concentrate before and after reduction at these temperatures were analyzed by XRD [RIGAKU D/Max 2500, Japan] under the conditions of radiation: Cu K α tube, current and voltage: 250 mA, 40 kV, scanning range: 10 – 80° (2 θ), step size 0.02° (2 θ) and scanning speed 8°/min (Fig. 12).

CONCLUSIONS

The influence of modified humic acid on the carbo-thermal reduction of a magnetite concentrate by temperature programmed reduction ranging from 950 °C to 1150 °C for different reducing time is shown on microstructure of the samples on the Fig. 13 and can be summarized as follows.

The mechanical strength of oxidized pellet with “Bg” binder extracted from coal A decreased but extent of reduction was stable and higher than with “Kh”, “Li” with increasing binder dosage. The highest reduction ratio is 94.12 % with 1.25 % stoichiometry amount of “Bg” MHA. Relation between both “Kh”, “Li” binder dosage and reduction extent is immediately increasing under the same indicated condition: 1100 °C for 90 min.

REFERENCES

1. Jiang T., Qiu G., Xu J., Zhu D., Singh R. *Direct Reduction of Composite Binder Pellets and Use of DRI*. Electrotherm Press, Ahmedabad, India, 2007, pp. 35–215.
2. *World Steel Association, Statistics of international steel production 2018*. Available at: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:5a5aa269-d357-476f-bbc3-74c0eacd5566/World%2520Steel%2520in%2520Figures%25202018.pdf>.
3. *World direct reduction statistics*. Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A. May, 2018. Available at: https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex_STATSbookprint_2018Final-1.pdf.
4. *Statistic of mineral production 2018. Mineral Resource Agency of Mongolia*. Ulan-Bator, Mongolia. Available at: <https://www.mrpm.gov.mn/public/pages/131/monthly.report.2018.12.mon.pdf>.
5. *Foreign trade statistics of Mongolian Customs Agency 2004–2018*. Available at: http://www.customs.gov.mn/statistics/index.php?module=users&cmd=info_full&cid=1159&tid=131.
6. Sastry K.V.S., Fuerstenau D.W. Role of binders during pelletization of iron ore concentrate-pellet growth and strength aspects. In: *Proc. of 4th Int. Symposium on Agglomeration, Toronto, 1985*, pp. 41–48.
7. Zhang Yuan-bo, Li Peng, Zhou You-lian, Han Gui-hong, Li Guang-hui, Xu Bin, Jiang Tao. Adsorption of lignite humic acid onto magnetite particle surface. *Journal of Central South University*. 2012, vol. 19, pp. 1967–1972.
8. Zhang Yuan-bo, Han Gui-hong, Jiang Tao, Huang Yan-fang, Li Guang-hui, Guo Yu-feng, Yang Yong-bin. Structure characteristics and adhesive property of humic substances extracted with different methods. *Journal of Central South University*, 2011, vol. 18, pp. 1041–1046.
9. Jiang Tao, Li Guanghui, Zhang Yuanbo, Yang Yongbin, Han Guihong, Huang Yanfang, Guo Yufeng, Fan Xiaohui, Li Qian, Tang Zhao-kun, Chen Xuling, Qiu Guanzhou. *A kind of complex polymer-based pellet binder and its use method*. Patent number: CN 101693950 A[P]. 2010–04–14.
10. Tao Jiang, Guihong Han, Yuanbo Zhang, Guanghui Li, Yangang Huang. A further study on the interaction between one of organic active fractions of the MHA binder and iron ore surface. *Int. Journal of Mineral Processing*. 2011, vol. 100, no. 3–4, pp. 172–178.
11. Guihong Han, Tao Jiang, Guanghui Li, Yanfang Huang, Yuanbo Zhang. Investigation on modified humic substances based binders

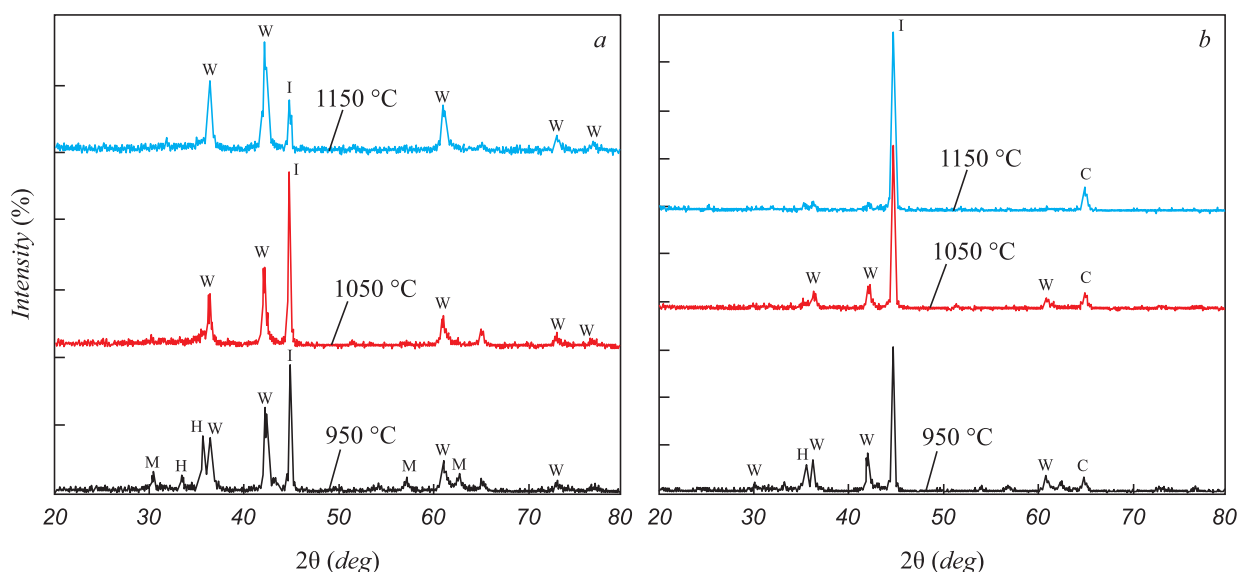


Fig. 12. XRD patterns of reduced briquettes under different temperature for 30 min (a) and 90 min (b): M – magnetite; H – hematite; I – metallic iron; C – carbon

Рис. 12. Рентгенограммы восстановленных брикетов при различной температуре в течение 30 мин (a) и 90 мин (b): M – магнетит; H – гематит; I – металлическое железо; C – углерод

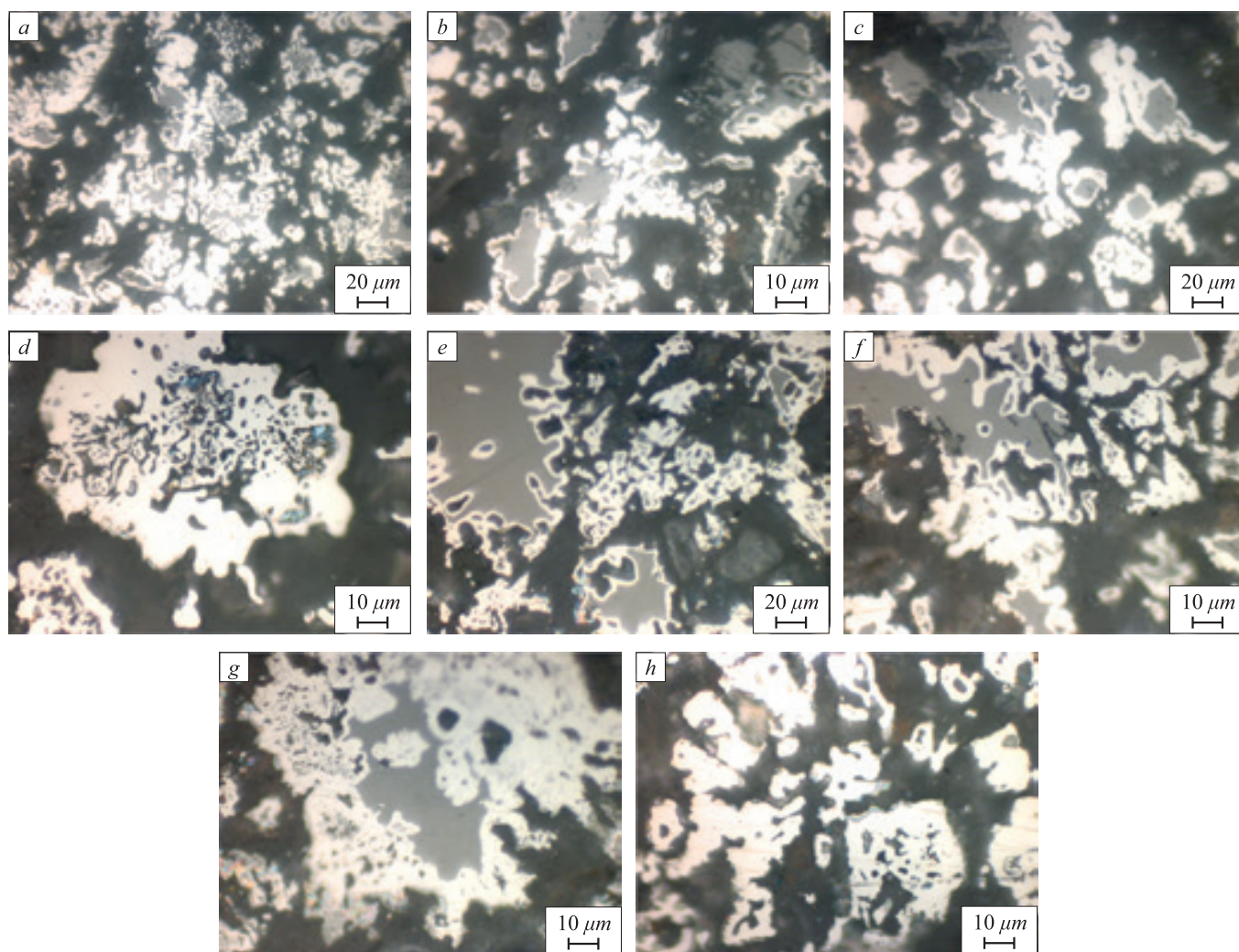


Fig. 13. Optical micrograph of reduced briquettes:
a, b, c, d for 30, 45, 60, 90 min at 1100 °C, e, f, g, h for 90 min at 1000, 1050, 1100, 1050 °C, respectively;
white zone – iron; grey zone – wustite; dark zone – porosity and hole

Рис. 13. Микроструктура восстановленных брикетов:
a, b, c, d в течение 30, 45, 60, 90 мин при 1100 °C соответственно; e, f, g, h в течение 90 мин при 1000, 1050, 1100, 1050 °C соответственно;
белая зона – железо; серая зона – вюстит; темная зона – пористость и пустоты

- for iron ore agglomeration. *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME*. 2012, vol. 134, no. 1, article 010901-5.
12. Haas L.A., Aldinger J.A., Nigro J.C. *Effectiveness of organic binders for iron ore pelletization. Report of Investigations*. U.S. Bureau of Mines, RI 9230, 1989, 25 p.
 13. Srivastava Ur., Kawatra S.K., Eisele T.C. Study of organic and inorganic binders on strength of iron oxide pellets. *Metallurgical and Materials Transactions B – Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2013, vol. 44, no. 4, pp. 1000–1009.
 14. Tao Jinag, Guihong Han, Yuanbo Zhang, Yanfang Huang, Guanghui Li, Yufeng Guo, Youngbin Ynag. Improving extraction yield of humic substances from lignite with anthraquinone in alkaline solution. *Journal of Central South University*. 2011, vol. 18, pp. 68–72.
 15. James G. Speight. *Handbook of coal analysis*. USA, 240 p.
 16. Forsmo S.P.E., Samskog P.O., Björkman B.M.T. A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness. *Powder Technology*. 2008, vol. 181, no. 3, pp. 321–330.
 17. Forsmo S.P.E., Apelqvist A.J., Björkman B.M.T., Samskog P.O. Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder. *Powder Technology*. 2006, vol. 169, no. 3, pp. 147–158.
 18. Jiang Tao, Zhang Yuan-bo, Huang Zhu-cheng, Li Guang-hui, Fan Xiao-hui. Preheating and roasting characteristics of hematite-magnetite (H-M) concentrate pellets. *Ironmaking & Steelmaking*. 2008, vol. 35, no. 1, pp. 21–26.
 19. Peter Klobes, Klaus Meyer, Ronald G. Munro. *Porosity and Specific Surface Area Measurements for Solid Materials*. Special Publications 960-17, September 2006. Available at: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication960-17.pdf>

Received April 9, 2019
Revised June 15, 2020
Accepted June 16, 2020

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ГУМИНОВОЙ КИСЛОТЫ (МНА) КАК СВЯЗУЮЩЕЙ ДОБАВКИ НА ОБЖИГ БРИКЕТИРОВАННОГО МОНГОЛЬСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТА «TUMURTEI»

Баяра Сараатанбазар, Гуан-хуэй Ли

Школа обогащения полезных ископаемых и биотехнологий,
Центральный Южный университет (410083, Китай, Чанша,
Хунань)

Аннотация. Существуют две основные группы связующих добавок: органические и неорганические для агломерационного процесса и спекающие для производства стали. В данной работе изучено влияние композиционного связующего на обжиг монгольских брикетов из железорудного концентрата «Tumurtei» в атмосфере воздуха с целью выявления оптимальных параметров их поведения при обжиге с тремя различными связующими МНА для прямого восстановления. Лигнит содержит органические и неорганические вещества и, согласно многим предшествующим исследованиям, он может быть сырьем для извлечения композиционного связующего. Прессованный железный концентрат со связующим МНА подвергали процессу окисления и восстановления в электропечи. Оптимальные условия экспериментов были следующими. Параметры процесса брикетирования выполнены в соответствии

с испытанием на сжатие без связующего при давлении $0,75 \text{ т} \cdot \text{см}^{-2}$, времени прессования 5 с, содержании влаги 8 %, окислении при 950°C в потоке воздуха в течение 10 мин и восстановлении при 1100°C в атмосфере CO . В результате связующее МНА, извлеченное из лигнита «Baganuur», повлияло на степень восстановления сильнее, чем два других связующих в этом исследовании. Общее содержание железа в восстановленном продукте достигло 98,33 % с 1 % МНА, извлеченного из лигнита «Baganuur». Степень восстановления выражена потерей кислорода.

Ключевые слова: магнетит, связующее МНА, восстановление, брикет.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-419-427

Information about the authors:

Баяра Сараатанбазар, аспирант (s.bayar9@gmail.com)

Гуан-хуэй Ли, профессор (2667361847@qq.com)

Поступила в редакцию 9 апреля 2019 г.

После доработки 15 июня 2020 г.

Принята к публикации 16 июня 2020 г.

УДК 669.412: 621.047

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ РАЗЛИВКИ В ВАКУУМНО-ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ

*Гуцин В.Н., д.т.н., профессор кафедры «Металлургические технологии
и оборудование» (guschinvn@rambler.ru)*

Коровин В.А., д.т.н., профессор кафедры «Металлургические технологии и оборудование»

Беляев С.В., к.т.н., доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование»

Демченко А.И., аспирант кафедры «Металлургические технологии и оборудование»

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
(603022, Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, 24)

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы, связанные с эффективностью процессов фильтрации металлических расплавов в зависимости от размеров неметаллических включений, параметров пенокерамических фильтров и вариантов их расположения. Исследования влияния основных конструктивных элементов на процессы фильтрации никелевых расплавов в процессе разлива в вакуумно-индукционной установке проводились на низкотемпературных физических моделях. Моделирование процессов фильтрации расплавов основано на гидродинамическом подобию процессов движения потоков расплава и неметаллических включений в разливочных емкостях. Разработана методика моделирования, определены масштабы и изготовлена модельная установка. Рассмотрено влияние схемы расположения фильтрационных и разделительных перегородок на динамику потоков металла, неметаллических включений и эффективность фильтрации. Эффективность процесса фильтрации никелевых расплавов рассмотрена в зависимости как от технических параметров самого фильтра (эффективной поверхности фильтрации, толщины фильтра, размеров каналов, количества каналов на единицу площади), а так и от типа и размеров неметаллических включений, особенностей конструкции разливочного устройства и схемы расположения фильтра. Установлено, что на общую эффективность фильтрации оказывает влияние скорость и равномерность распределения потоков расплава перед фильтром. Для обеспечения равномерного распределения скоростей потоков расплава перед фильтром устанавливается разделительная перегородка с перепускными отверстиями, расположение которых и их число также являлось предметом исследования. В результате проведенных исследований установлены зависимости между эффективностью фильтрации, размерами и видом неметаллических включений при использовании вертикальных и горизонтальных пенокерамических фильтров в процессе разлива никелевых расплавов в промежуточные разливочные емкости вакуумно-индукционной установки. Определено, что при вертикальном расположении фильтра эффективность его работы выше, чем при горизонтальном. Дополнительным средством повышения эффективности работы фильтрационной системы является использование разделительной перегородки. Определено оптимальное количество отверстий и расположение перегородки в разливочной емкости, обеспечивающие равномерное распределение потоков расплава по высоте перед фильтром и увеличение времени его работы.

Ключевые слова: фильтры, физическое моделирование, гидродинамика потоков расплава, неметаллические включения, эффективность фильтрации.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-428-435

ВВЕДЕНИЕ

Повышенные требования к качеству литых заготовок из жаропрочных никелевых сплавов, применяемых в авиационной промышленности [1 – 3], приводят к необходимости разработки мероприятий как во время их вакуумно-индукционного переплава, так и в процессе разлива, обеспечивающих снижение содержания неметаллических включений (НВ).

В настоящее время в процессе разлива для очистки расплавов от неметаллических включений (оксидов, нитридов, сульфидов и др.) широко используются фильтрующие элементы [4 – 7].

Для фильтрационного рафинирования металлических расплавов от неметаллических включений луч-

шим образом себя зарекомендовали пенокерамические фильтры (ПКФ), обладающие комплексом преимуществ в сравнении с аналогами [8]. Пенокерамический фильтр характеризуется высокой открытой пористостью и развитой поверхностью. Такая структура фильтра позволяет эффективно задерживать НВ в фильтруемом металле при условии смачивания расплавом поверхности пенокерамического фильтра. Для повышения адгезии НВ и стойкости поверхности материал ПКФ дополнительно проводили модифицирование его поверхности.

Как следует из работы [8], применение ПКФ позволяет очистить металл от НВ, а также добиться равномерного их распределения по объему металла, что, по мнению авторов, является причиной существенного роста комплекса механических свойств.

Однако остаются не решенными вопросы, связанные с рациональным расположением фильтра в разливочной емкости, возможностью использования дополнительных устройств для стабилизации процесса разлива, их влияния на эффективность процесса фильтрации и ресурс работы фильтра.

Существующие методы расчета эффективности процесса фильтрации ограничиваются техническими параметрами самого фильтра: эффективной поверхностью фильтрации, толщиной фильтра, размерами каналов (диаметром, протяженностью, их расположением) и количеством каналов на единицу площади [9 – 12].

Процесс фильтрации является многофакторным, на который оказывают влияние гидродинамика разлива, молекулярная диффузия, силы поверхностного натяжения на границе раздела фаз в гетерогенной среде, включающей расплав, газовые включения, жидкие и твердые НВ [13 – 15]. Поэтому использование расчетных численных методов затруднительно из-за необходимости решения системы уравнений, в том числе нелинейной, и неоднозначности задания граничных условий.

Оценка эффективности фильтрации при использовании различных технических решений обычно сводится к металлографическому исследованию состава и количества НВ в литом металле [16 – 18], что является трудоемким и затратным способом.

В случае сложности получения достоверной математической модели явления или процесса для решения ряда конкретных технологических задач можно воспользоваться методом физического моделирования, основанного на теории подобия [19 – 20], который в настоящее время успешно используется для проектирования разливочных устройств МНЛЗ.

Целью данной работы являлась разработка на основе теории физического моделирования методики исследования процессов фильтрации металлических расплавов с учетом динамики потоков металла и НВ, геометрии разливочного устройства, схемы расположения фильтрационных перегородок, а также определение эффективности фильтрации никелевых расплавов в процессе разлива в вакуумно-индукционной установке.

Объектом исследований был выбран жаропрочный сплав ЭП-648-ВИ, выплавляемый на ПАО «Русполмет». Данный сплав используется для изготовления деталей авиационной техники (диски, лопатки газовых турбин).

Вылавка производилась в вакуумно-индукционной печи ВИП-3,0 емкостью 3 т. В стандартном исполнении разливка осуществлялась через специальное разливочное устройство – промежуточный ковш, изготовленный из керамики. Для стабилизации процесса фильтрации перед пеночермическим фильтром устанавливалась чермическая перегородка с последо-

вательностью круглых отверстий определенного диаметра.

Чермическая перегородка, обладающая высокой конструкционной прочностью, предназначена для снижения кинетической энергии струи расплава и разделения ее на множество мелких струй, что препятствует эрозии и разрушению пеночермического фильтра и позволяет создать равномерное ламинарное течение расплава относительно поверхности фильтра.

В задачи исследований входило так же определение оптимального расположения ПКФ и перегородки, количество и расположение отверстий.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика моделирования процессов фильтрации расплавов основана на критериальном подоби моделируемых и модельных систем, которое устанавливается из системы уравнений, приведенных к безразмерному виду, описывающих данный процесс, и критериальной зависимости для моделирования гидродинамики потока расплава [19].

Для моделирования гидродинамики потока расплава эту систему уравнений при условии сохранения сплошности моделируемой среды можно записать в следующем виде:

$$W \nabla \theta = Ne \nabla^2 \theta; \quad (1)$$

$$W \nabla W = \frac{1}{Ne} \Delta f'' + \left(\frac{Ne}{Fr} Re \right) \theta - \nabla P_k + \frac{1}{Re} \nabla^2 W; \quad (2)$$

$$W_k = f(Fr, Ne, Re, X, Y), \quad (3)$$

где $Re = \frac{\omega X_o}{\nu}$, $Fr = \frac{\omega^2}{g X_o}$, $Ne = \frac{X_o}{\omega \tau}$ – числа подоби Рейнольдса, Фруда и Ньютона соответственно; X_o , $X = \frac{x}{X_o}$

и $Y = \frac{y}{Y_o}$ – характерный размер разливочной емкости и безразмерные координаты соответственно; ρ – плотность среды; g – ускорение силы тяжести; ν_o , ν_m – кинематическая вязкость расплава и модельной жидкости; $W = \frac{\omega}{\omega_k}$, $W_x = \frac{\omega_x}{\omega_k}$ и $W_y = \frac{\omega_y}{\omega_k}$ – безразмерная скорость потока и ее проекции на оси x и y соответственно; ω и ω_k – скорости в исследуемой точке и на выходе из выходного отверстия разливочной емкости соответственно; $\theta = \frac{t}{t_{фр}}$ – безразмерная температура расплава;

t , $t_{фр}$ – температуры в исследуемой точке и на фронте затвердевания соответственно; $P = \frac{p}{p_k}$ – относительное давление потока расплава; p , p_k – давление в данной точке и динамическое давление на выходе из отверстия разливочного стакана соответственно.

В уравнении (2) f'' является функцией, определяющей поверхность раздела фаз. В данном случае это площадь поверхности раздела жидкой и твердой (фильтра или стенки разливочной емкости) сред.

Исходя из этих зависимостей и выбранного геометрического масштаба для жидкой ванны $M_x = \frac{(X_o)_o}{(X_o)_m}$,

при заданных граничных условиях [19] получаем:

– масштаб скоростей (при $Re \cdot Fr = idem$)

$$M_\omega = \sqrt[3]{\frac{v_o}{v_m}}; \quad (4)$$

– масштаб вязкостей жидкостей ($Re = idem$)

$$M_v = \frac{(X_o)_o \omega_o}{(X_o)_m \omega_m} = M_x M_\omega = M_x^{1,5}; \quad (5)$$

– масштаб расхода ($Re \cdot Fr, X, Y = idem$)

$$M_Q = M_\omega M_x^2; \quad (6)$$

– масштаб времени ($Ne = idem$)

$$M_\tau = \frac{(X_o)_m \omega_o}{(X_o)_o \omega_m} = \frac{M_\omega}{M_x}, \quad (7)$$

где индекс «м» принадлежит параметру на модели; «о» – на оригинале.

При изучении поведения неметаллических включений в расплаве необходимо учитывать величину фазовых границ (функция f''), свободное движение частиц и вязкость двухфазного потока. Это позволяет определить масштабы моделирования для включений и подобрать материалы для их имитации при выбранных масштабах жидкой ванны.

Ниже приведены характеристики НВ для расплавов и имитирующих их модельных примесных образований.

Плотности неметаллических включений в расплаве:

Неметаллические включения	Плотность, кг/м ³
SiO ₂	2300
FeO·SiO ₂	3000
MnO·SiO ₂	3600
Al ₂ O ₃	3900
MnS	4000
2MnO·SiO ₂	4100
2FeO·SO ₂	4300
FeS	4600
MnO	5500
FeO	5900

Плотности модельных примесных образований:

Примесные образования	Плотность, кг/м ³
Пробка	220 – 260
Пенопласт (К-40)	200 – 240
Уголь сосновый	280 – 440
Уголь дубовый	570
Сосна	370 – 600
Осина	500
Тополь	350 – 500
Полипропилен	900 – 920
Графит	900 – 950
Полистирол	1050 – 1070

В случае изучения поведения твердых и жидких примесных образований в условиях конвекции потоков расплава и учета подъемной силы уравнения (2) и (3) принимают вид:

$$W \nabla W = \left(\frac{1}{Ne^2} Ar \right) f'' + \left(\frac{Ne}{Fr} Re \right) \theta - \nabla P_k + \frac{1}{Re} \nabla^2 W; \quad (8)$$

$$W = f(Fr, Ne, Re, Ar, X, Y), \quad (9)$$

где $Ar = \frac{g X_o^3 (\rho_v - \rho_{ж})}{\rho_{ж} v^2}$ – число подобия Архимеда; ин-

дексы «в» и «ж» принадлежат к включению и расплаву соответственно; v – кинематическая вязкость расплава.

На основании идентичности чисел подобия $Ar = idem$, т. е. из идентичности условия свободного движения этих примесных образований на модели и оригинале, определяем их геометрический масштаб:

$$M_{пр, x} = \sqrt[3]{\frac{v_o^2 \rho_{ж, o} (\rho_v - \rho_{ж})_m}{v_m^2 \rho_{ж, m} (\rho_v - \rho_{ж})_o}}. \quad (10)$$

При проектировании модельной установки линейный масштаб выбирался равным $M_x = 1,6$.

Получены следующие расчетные значения масштабов моделирования:

- скоростей потоков расплава $M_w = 1,27$;
- расхода расплава $M_v = 3,24$;
- времени $M_t = 1,26$;
- размера НВ $M_{xв} = 1,37$.

На рис. 1 приведена схема модельной установки для исследования процессов динамики расплава и его фильтрации.

Для исследования динамики НВ осуществлялась подача 20 г навески, имитирующей примесные образования, в струю подводимой в промежуточный ковш модельной среды (воды). Опыты проводились с предварительным рассевом НВ по фракциям и вводом общей массы навески в течение общего времени ее нахождения во взвешенном состоянии.

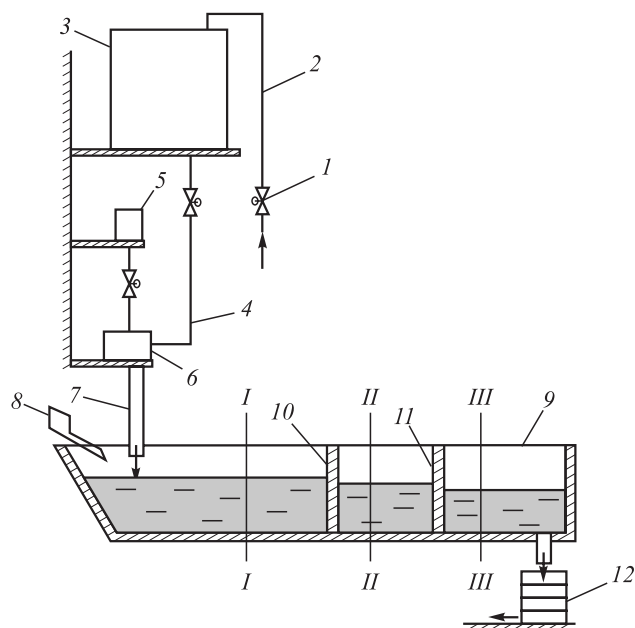


Рис. 1. Схема модельной установки:

1 – входной вентиль; 2 – линия подвода воды; 3 – модель промежуточной емкости (плавильная печь); 4 – трубопровод; 5 – резервуар с красителем; 6 – смеситель; 7 – разливочная труба; 8 – подача НВ; 9 – модель промежуточного ковша между вакуум-индукционной печью и изложницей; 10 – разделительная перегородка с отверстиями; 11 – пеночерамический фильтр; 12 – набор сит для просеивания НВ; I – I, II – II, III – III – сечения замера скоростей потоков расплава

Fig. 1. Scheme of the model installation:

1 – inlet valve; 2 – water supply line; 3 – model of intermediate tank (melting furnace); 4 – pipeline; 5 – tank with dye; 6 – mixer; 7 – casting tube; 8 – supply of non-metallic inclusions; 9 – model of tundish between vacuum induction furnace and mold; 10 – dividing partition with openings; 11 – ceramic foam filter; 12 – a set of sieves for screening the non-metallic inclusions; I – I, II – II, III – III – sections for measuring flow rates of the melt

Скорости гидротоков на модели определялись вводом красителя в подводимую струю воды и многократным фиксированием их фронтов с помощью видеосъемки на фоне координатной сетки и дальнейшей компьютерной обработки полученных результатов. Аналогично фиксировалось перемещение НВ до фильтрационной перегородки.

Эффективность фильтрации f определялась по массе частиц, уловленных на выходе из разливочной емкости и просеянных по фракциям

$$f = \frac{m_o - m_b}{m_o} 100 \%, \quad (11)$$

где m_o – исходная масса НВ; m_b – масса НВ, прошедших через фильтр.

В качестве НВ в модельной жидкости использовались измельченные и просеянные по фракциям частички пробки, соснового и дубового угля, сосновой и осиновой крошки, графита в диапазоне плотностей от 250 до 900 кг/м³ и приведенных диаметров от 0,1 до 0,7 мм.

На рис. 2 и 3 приведены общий вид модели промежуточного ковша с вертикальным и горизонтальным фильтрами 20 ррi и разделительной перегородкой с пятью отверстиями.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ИХ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 и 5 приведены результаты исследования эффективности фильтрации при использовании вертикального и горизонтального ПКФ от размеров НВ. Заштрихованное пространство – область фильтрации всех НВ от самых легких до тяжелых.

Легкие НВ плотностью от 2300 кг/м³ имитировались на гидравлической модели осиновыми опилками

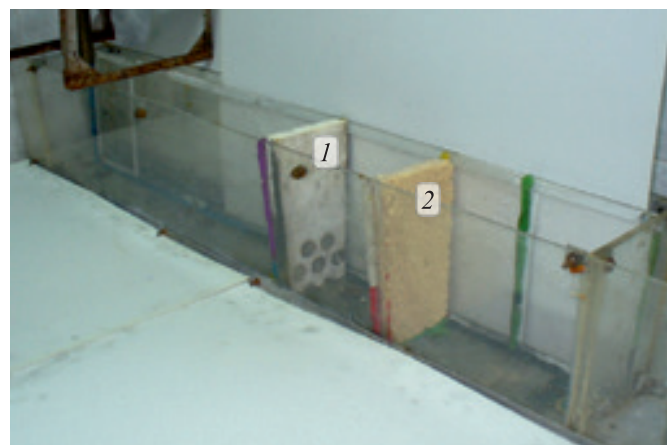


Рис. 2. Общий вид модели промежуточного ковша с разделительной перегородкой с пятью отверстиями (1) и вертикальным пеночерамическим фильтром (2)

Fig. 2. General view of the model of tundish with dividing baffle with five holes (1) and vertical ceramic foam filter (2)

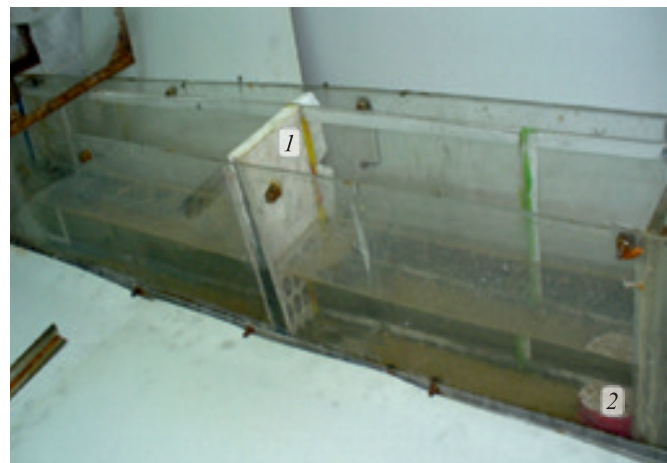


Рис. 3. Общий вид модели промежуточного ковша с разделительной перегородкой (1) и горизонтальным пеночерамическим фильтром (2)

Fig. 3. General view of the model of tundish with dividing baffle (1) and horizontal ceramic foam filter (2)

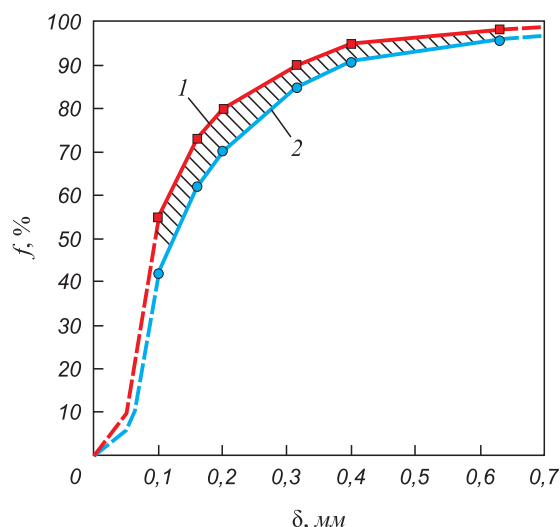


Рис. 4. Зависимость эффективности фильтрации при использовании вертикального пеннокерамического фильтра (20 ppi толщиной 24 мм) от размеров неметаллических включений:

1 – модельные НВ – графит; 2 – модельные НВ – опилки

Fig. 4. Dependence of filtration efficiency when using a vertical ceramic foam filter (20 ppi with a thickness of 24 mm) on non-metallic inclusions sizes:

1 – model non-metallic inclusions – graphite; 2 – model non-metallic inclusions – sawdust

ми плотностью 350 кг/м³, а тяжелые плотностью до 5900 кг/м³ – графитом плотностью 900 кг/м³.

Как следует из рис. 4, эффективность фильтрации зависит как от размеров НВ, так и их плотности. Повысить эффективность фильтрации можно, увеличивая толщину фильтра или уменьшая размеры фильтрационных отверстий (увеличивая ppi). Однако эти параметры связаны с пропускной способностью фильтра, которая ограничена при установленном в технологическом процессе расходе металла. Как показали промышленные испытания [8], при расходе никелевого расплава порядка 8 кг/с оптимальная толщина фильтра (20 ppi) составляла 24 мм. При увеличении толщины повышалась разность уровней металла в сечениях II – II и III – III (см. рис. 1), что приводило к зарастанию каналов в области перепада высот и снижению продолжительности его работы и, соответственно уменьшению эффективности фильтрации.

Оценка эффективности фильтрации проводилась так же при другом варианте, более удобном с точки зрения установки, горизонтальном расположении фильтрующего элемента в области выпускного отверстия (см. рис. 3). Однако исследования показали, что при тех же параметрах (толщина 24 мм, 20 ppi) его использование снижает эффективность фильтрации на 16 – 18 % (рис. 5). Это связано с уменьшением эффективной поверхности фильтрации и уменьшением траектории движения НВ в фильтре за счет изменения направления гравитационной силы и силы Архимеда по отношению направления движения потока рас-

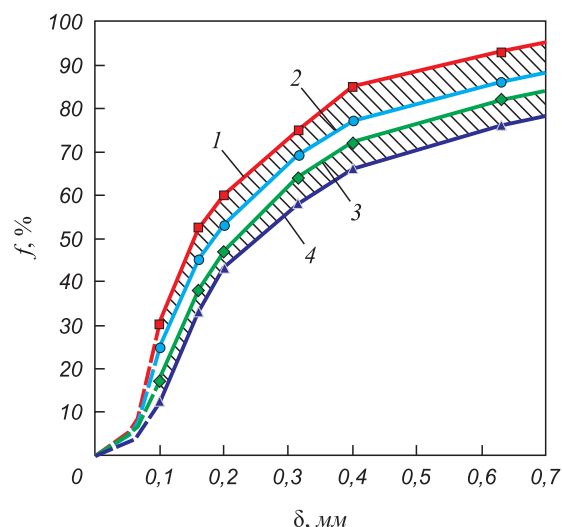


Рис. 5. Зависимость эффективности фильтрации при использовании горизонтального пеннокерамического фильтра (20 ppi) от размеров неметаллических включений:

1, 2 – толщиной 24 мм; 3, 4 – толщиной 12 мм; 1, 3 – графит; 2, 4 – опилки

Fig. 5. Dependence of filtration efficiency when using a horizontal ceramic foam filter (20 ppi) from the sizes of non-metallic inclusions:

1, 2 – 24 mm thick; 3, 4 – 12 mm thick; 1, 3 – graphite; 2, 4 – sawdust

плава в плоскости фильтра. Кроме того, снижается пропускная способность фильтра. Для ее повышения уменьшалась толщина фильтра до 12 мм (см. рис. 5), что привело к дополнительному снижению эффективности фильтрации еще на 15 – 18 %.

На рис. 6 показаны эпюры скоростей в трех сечениях промежуточного ковша в зависимости от конструкции промежуточной перегородки. В качестве контрольного варианта, используемого в промышленных условиях, служит промежуточная перегородка с пятью отверстиями, расположенными на двух уровнях в нижней части. Получено, что при использовании этой перегородки (рис. 6, а) наблюдается неравномерное распределение скоростей по высоте промежуточного ковша. В сечении II – II (перед фильтром) перепад скоростей по высоте составляет от 0,02 до 0,07 м/с, а в верхней части возникает обратный поток со скоростью – 0,01 м/с.

В качестве альтернативного варианта была разработана перегородка с десятью отверстиями на четырех уровнях, равномерно расположенных по высоте. При ее использовании (рис. 6, б) повысилась равномерность распределения скоростей потока расплава с перепадом скоростей от 0,03 до 0,055 м/с при незначительном обратном потоке в верхней части. Более равномерный фронт скоростей потока перед вертикальным фильтром позволил получить более равномерные условия фильтрации по высоте, что привело к некоторому повышению эффективности его работы и увеличению на 10 – 15 % живучести (времени работы) фильтра.

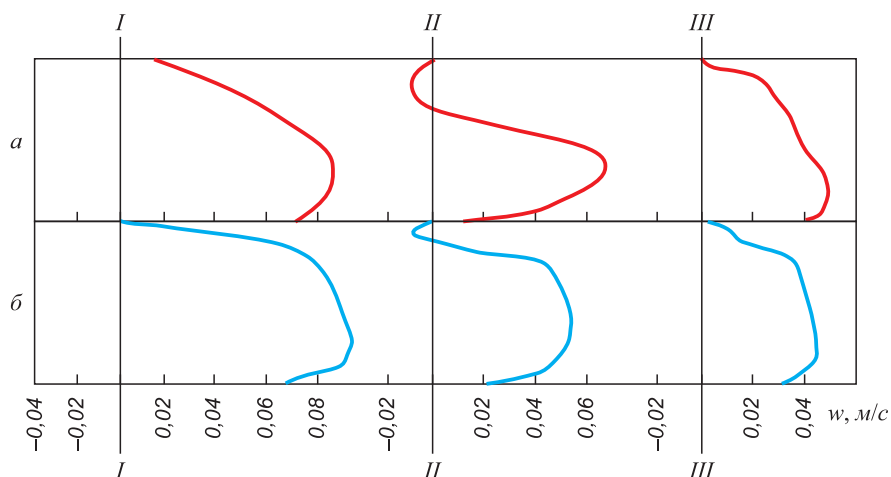


Рис. 6. Эпюры замера скоростей потоков расплава:

a – вариант перегородки с пятью отверстиями (2 уровня); *б* – вариант перегородки с десятью отверстиями (4 уровня); *I* – *I*, *II* – *II*, *III* – *III* – сечения замера скоростей потоков расплава (см. рис. 1)

Fig. 6. Plots of measuring the melt flow rates:

a – baffle with 5 holes (2 levels); *б* – baffle with 10 holes (4 levels); *I* – *I*, *II* – *II*, *III* – *III* – sections for measuring the melt flow rates (Fig. 1)

ВЫВОДЫ

Разработанная методика физического моделирования процессов фильтрации металлических расплавов с учетом динамики потоков металла и НВ позволяет проводить исследования эффективности работы различных фильтрующих устройств с учетом их параметров (толщины, плотности расположения каналов, размеров) и параметров НВ с учетом геометрии разливного устройства, схемы расположения фильтрационных перегородок и гидродинамики потоков металлических расплавов. Данная методика дает возможность конструировать разливочные фильтрационные системы с учетом их технологических особенностей.

В результате проведенных исследований были установлены зависимости между эффективностью фильтрации, размерами и видом НВ при использовании вертикальных и горизонтальных пеночероамических фильтров в процессе разлива никелевых расплавов в промежуточном ковше вакуумно-индукционной установки. Определено, что при вертикальном расположении фильтра эффективность его работы выше, чем при горизонтальном. Дополнительным средством повышения эффективности работы фильтрационной системы является использование разделительной перегородки с отверстиями, которая обеспечивает равномерное распределение потоков расплава по высоте перед фильтром.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 36 – 52.
2. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД // *Технология легких сплавов*. 2007. № 2. С. 6 – 16.
3. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
4. Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е. *Металлургия литейных жаропрочных сплавов: технология и оборудование*. – М.: ВИАМ, 2016. – 368 с.
5. Hawranek R., Lelito J., Suchy J.S., Zak P. The simulation of a liquid cast iron flow through the gating system with filter // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2009. Vol. 54. No. 2. P. 351 – 358.
6. Uemura K., Takahashi M., Koyama S., Nitta M. Filtration mechanism of non-metallic inclusions in steel by ceramic loop filter // *ISIJ International*. 1992. Vol. 32. No. 1. P. 150 – 156.
7. Inoue R., Ueda S., Ariyama T., Suito H. Extraction of nonmetallic inclusion particles containing MgO from steel // *ISIJ International*. 2011. Vol. 51. No. 12. P. 2050 – 2055.
8. Демченко А.И., Шевяков В.Ф., Коровин В.А. и др. Повышение качества никелевого сплава фильтрацией через пеночероамический фильтр // *Литейщик России*. 2019. № 6. С. 29 – 34.
9. Воеводина М.А. Оценка эффективности фильтрационного рафинирования металлических расплавов // *Вестник КрасГАУ*. 2011. № 11. С. 163 – 166.
10. Щукина И.Н., Воеводина М.А., Крушенко Г.Г. Очистка металлических расплавов фильтрованием в литейной форме // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Серия: Моделирование физико-механических и тепловых процессов*. 2011. № 3. С. 86 – 87.
11. Тэн Э.Б. Фильтрационное рафинирование жидких металлов // *Цветные металлы*. 2003. № 3. С. 64 – 69.
12. Rogler J., Heaslip L., Mehrvar M. Physical modeling of inclusion removal in a tundish by gas bubbling // *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2005. Vol. 44. No. 3. P. 357 – 369.
13. Adaba O., O'Malley R., Xu M. etc. Three-dimensional study of inclusion morphology and size distribution in Mn-Si killed steel // *AISTech*, Philadelphia, USA, 2018.
14. Janiszewski K. Influence of slenderness ratios of a multi-hole ceramic filters at the effectiveness of process of filtration of non-metallic inclusions from liquid steel // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2012. Vol. 57. No. 1. P. 135 – 143.
15. Chakraborty S., O'Malley R., Bartlett L., Huddleston L. Effect of physical state of non-metallic inclusions on the accumulation within-magnesia-stabilized zirconia foam filters // *AISTech 2019 – Proc. of the Iron & Steel Technology Conf.*, 6 – 9 May 2019, Pittsburgh, Pa., USA. P. 1030 – 1040.

16. Raiber K., Hammerschmid P., Janke D. Experimental studies on AIO inclusions removal from steel melts using ceramic filters // *ISIJ International*. 1995. Vol. 35. No. 4. P. 380 – 388.
17. Janiszewski K., Kudlinski Z. The influence of non-metallic inclusions physical state on effectiveness of the steel filtration process // *Steel Research International*. 2006. Vol. 77. No. 3. P. 169 – 176.
18. Chakraborty S., O'Malley R., Bartlett L., Xu M. Efficiency of solid inclusion removal from the steel melt by ceramic foam filter: Design and experimental validation // *AFS Metalcasting Congress*, Fort Worth, USA, 2018.

19. Гушин В.Н., Ульянов В.А. Особенности физического и математического моделирования многофазных потоков // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2007. № 7. С. 45 – 47.
20. Гушин В.Н., Ульянов В.А., Васильев В.А. Математическое и физическое моделирование теплофизических процессов в металлургии. – Н. Новгород: НГТУ, 2014. – 157 с.

Поступила в редакцию 12 июля 2019 г.

После доработки 22 марта 2020 г.

Принята к публикации 2 июня 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 6, pp. 428–435.

PHYSICAL MODELING OF FILTRATION PROCESSES OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS DURING CASTING IN A VACUUM INDUCTION INSTALLATION

V.N. Gushchin, V.A. Korovin, S.V. Belyaev, A.I. Demchenko

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article considers issues related to the efficiency of metal melts' filtration depending on the size of non-metallic inclusions, parameters of ceramic foam filters and their location options. Studies of influence of the main structural elements on the filtration processes of nickel melts during casting in a vacuum induction installation were carried out on low-temperature physical models. Modeling of melt filtration processes is based on the hydrodynamic similarity of the processes of motion of melt flows and nonmetallic inclusions in casting tanks. A modeling technique has been developed, the scale has been determined and a model installation has been made. Influence of the arrangement of filtration and dividing walls on the dynamics of metal flows, non-metallic inclusions and filtration efficiency is considered. The efficiency of nickel melts filtration is described depending on the technical parameters both on the filter itself (effective filtration surface, filter thickness, channel dimensions, number of channels per unit area), as well as on the type and size of non-metallic inclusions, design features of the casting device and filter layouts. It was found that the overall filtration efficiency is influenced by the rate and uniformity of the melt flows' distribution in front of the filter. To ensure uniform distribution of the melt flow rates, a dividing wall with bypass holes is installed in front of the filter, the location of which and their number was also the subject of research. As a result of the studies, the relationships were established between the filtration efficiency, the size and type of non-metallic inclusions when using vertical and horizontal foam ceramic filters during the casting of nickel melts in an intermediate casting tank of a vacuum induction installation. It was found that with a vertical arrangement of the filter, its efficiency is higher than with a horizontal one. An additional means of increasing efficiency of the filtration system is the use of a dividing wall. The optimal number of holes and the location of the baffle in the casting tank were determined, ensuring a uniform distribution of melt flows along the height in front of the filter and an increase in its operation time.

Keywords: filters, physical modeling, fluid flow dynamics of a melt, non-metallic inclusions, filtration efficiency.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-428-435

REFERENCES

1. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Casting heat-resistant nickel alloys of new generation. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2012, no. 5, pp. 36–52. (In Russ.).
2. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Casting heat-resistant nickel alloys for promising aircraft GTE. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2007, no. 2, pp. 6–16. (In Russ.).

3. Shalin R.E., Svetlov, I.L., Kachanov, E.B. *Monokristally nikelovykh zharoprochnykh splavov* [Monocrystals of heat-resistant nickel alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1997, 336 p. (In Russ.).
4. Sidorov V.V., Kablov D.E., Rigin V.E. *Metallurgiya liteinykh zharoprochnykh splavov: tekhnologiya i oborudovanie* [Metallurgy of casting heat-resistant alloys: Technology and equipment]. Moscow: VIAM, 2016, 368 p. (In Russ.).
5. Hawranek R., Lelito J., Suchy J.S., Zak P. The simulation of a liquid cast iron flow through the gating system with filter. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2009, vol. 54, no. 2, pp. 351–358.
6. Uemura K., Takahashi M., Koyama S., Nitta M. Filtration mechanism of non-metallic inclusions in steel by ceramic loop filter. *ISIJ International*. 1992, vol. 32, no. 1, pp. 150–156.
7. Inoue R., Ueda S., Ariyama T., Suito H. Extraction of nonmetallic inclusion particles containing MgO from steel. *ISIJ International*. 2011, vol. 51, no. 12, pp. 2050–2055.
8. Demchenko A.I., Shevyakov V.F., Korovin V.A., Belyaev S.V., Gushchin V.N. Improving the quality of nickel alloy by filtration through a ceramic foam filter. *Liteishchik Rossii*. 2019, no. 6, pp. 29–34. (In Russ.).
9. Voevodina M.A. Evaluation of the efficiency of filtration refining of metal melts. *Vestnik KrasGAU*. 2011, no. 11, pp. 163–166. (In Russ.).
10. Shchukina I.N., Voevodina M.A., Krushenko G.G. Purification of metal melts by filtration in a mold. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики. Seriya: Modelirovanie fiziko-mekhanicheskikh i teplovykh protsessov*. 2011, no. 3, pp. 86–87. (In Russ.).
11. Ten E.B. Filtration refining of liquid metals. *Tsvetnye metally*. 2003, no. 3, pp. 64–69. (In Russ.).
12. Rogler J., Heaslip L., Mehrvar M. Physical modeling of inclusion removal in a tundish by gas bubbling. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2005, vol. 44, no. 3, pp. 357–369.
13. Adaba O., O'Malley R., Xu M., Bartlett L., Lekakh S. *Three-dimensional study of inclusion morphology and size distribution in Mn-Si killed steel*. AISTech, Philadelphia, USA, 2018.
14. Janiszewski K. Influence of slenderness ratios of a multi-hole ceramic filters at the effectiveness of process of filtration of non-metallic inclusions from liquid steel. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2012, vol. 57, no. 1, p. 135–143.
15. Chakraborty S., O'Malley R., Bartlett L., Huddleston L. Effect of physical state of non-metallic inclusions on the accumulation within magnesia-stabilized zirconia foam filters. *AISTech 2019 – Proc. of the Iron & Steel Technology Conference, 6 – 9 May 2019, Pittsburgh, Pa., USA*, pp. 1030–1040.
16. Raiber K., Hammerschmid P., Janke D. Experimental studies on AIO inclusions removal from steel melts using ceramic filters. *ISIJ International*. 1995, vol. 35, no. 4, pp. 380–388.

17. Janiszewski K., Kudlinski Z. The Influence of non-metallic inclusions physical state on effectiveness of the steel filtration process. *Steel Research International*. 2006, vol. 77, no. 3, pp. 169–176.
18. Chakraborty S., O'Malley R., Bartlett L., Xu M. Efficiency of solid inclusion removal from the steel melt by ceramic foam filter: Design and experimental validation. *AFS Metalcasting Congress, Fort Worth, USA, 2018*.
19. Gushchin V.N., Ul'anov V.A. Features of physical and mathematical modeling of multiphase flows. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, no. 7, pp. 45–47. (In Russ.).
20. Gushchin V.N., Ul'anov V.A., Vasil'ev V.A. *Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie teplofizicheskikh protsessov v metallurgii* [Mathematical and physical modeling of thermophysical processes in metallurgy]. N.Novgorod: NSTU, 2014, 157 p. (In Russ.).

Information about the authors:

V.N. Gushchin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metallurgical Technology and Equipment" (gushchinn@rambler.ru)

V.A. Korovin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metallurgical Technology and Equipment"

S.V. Belyaev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metallurgical Technology and Equipment"

A.I. Demchenko, Postgraduate of the Chair "Metallurgical Technology and Equipment"

Received July 12, 2019

Revised March 22, 2020

Accepted June 2, 2020

УДК 669.191.24

ВЛИЯНИЕ ФЛЮСА «ФЛЮМАГ М» НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ

Кожухов А.А., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Металлургия
и металловедение им. С.П. Угаровой»

Тимофеева А.С., к.т.н., профессор кафедры «Металлургия и металловедение
им. С.П. Угаровой» (uked@yandex.ru)

Никитченко Т.В., к.т.н., старший научный сотрудник, доцент кафедры «Металлургия
и металловедение им. С.П. Угаровой»

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова, филиал НИТУ МИСИС
(309516, Россия, Белгородская обл., г. Старый Оскол, микрорайон Макаренко, 42)

Аннотация. Повысить прочностные свойства железорудных окатышей можно различными способами, одним из которых является применение магнийсодержащих флюсов. Применение оксида магния для получения железорудных окатышей позволяет увеличить температуру начала размягчения и уменьшить температурный интервал размягчения при прямом восстановлении железа. При обжиге с температурой около 1300 °С возможно получение готовых обожженных окатышей с высокой холодной и горячей прочностью. В настоящее время наиболее распространена такая флюсующая добавка к окатышам, как доломит $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, в котором содержание оксида магния может быть от 17 до 22 %. Однако при необходимости увеличения оксида магния в окатышах приходится увеличивать дозировку доломита, но при этом уменьшается содержание железа, что влечет за собой уменьшение выхода «годного» в последующем переделе. Одним из флюсов, содержащих магний, является брусит. Если его сравнить с доломитом, то в чистом брусите содержание оксида магния в три с лишним раза выше. Основой флюса «Флюмаг М» является брусит. Содержание оксида магния составляет в нем не менее 55 %. В данной работе представлены серии лабораторных исследований по влиянию дозировки флюса «Флюмаг М» на основе брусита на комкуемость шихты и такие свойства железорудных окатышей, как прочность на сжатие, удар и истирание. Проведены испытания по получению сырых и обожженных окатышей с применением флюса «Флюмаг М». Осуществлена сравнительная характеристика прочностных свойств полученных окатышей, офлюсованных «Флюмаг М» и известняком. Содержание связующего, бентонита и магнетитового концентрата, для всех экспериментов оставалось неизменным. Результаты данных экспериментов указывают, что «Флюмаг М» не препятствует комкуемости шихты. Прочность сырых окатышей на сброс и сжатие с флюсом «Флюмаг М» имеет небольшие отклонения от окатышей с добавлением известняка. Обожженные окатыши с добавлением флюса «Флюмаг М» обладают более высокой прочностью, чем с известняком. Самое большое различие в прочностных свойствах наблюдается при содержании 2 % флюса.

Ключевые слова: брусит, «Флюмаг М», прочностные свойства, сырые окатыши, обожженные окатыши, комкуемость, удар, сжатие, истирание, качество.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-436-442

Прогрессивным направлением современного металлургического производства является развитие технологии прямого восстановления твердофазного железа, где основной шихтой являются прочные железорудные окатыши.

Требования процессов металлизации обусловлены, главным образом, теми физико-химическими изменениями, которым железорудный материал подвергается в ходе этих процессов. Особенно полно эти требования проанализированы авторами работ [1 – 5].

В общем виде требования к сырью для шахтных печей металлизации следующие:

- высокое содержание железа при низком содержании серы, фосфора, щелочей и примесей цветных металлов, оказывающих большое влияние на качество стали и технико-экономические показатели ее выплавки в электропечах;
- высокая восстановимость;

– высокая горячая прочность, определяющая способность окатышей сохранять целостность в процессе восстановления;

– малая склонность к образованию спеков, разбуханию и деформации при прямом восстановлении железа в твердофазных процессах, что определяет высокую газопроницаемость шихты в печи;

– повышенная температура начала размягчения [1, 6, 7].

Для печей металлизации с целью создания оптимальных газодинамических условий, позволяющих обеспечить большую производительность и высокую степень металлизации, требуется узкий класс гранулометрического состава окатываемого сырья, обладающего достаточной прочностью как в исходном состоянии, так и при восстановлении с высокой температурой начала размягчения и низким содержанием мелкой фракции (менее 5 мм). По практическим дан-

ным этим условиям отвечают окатыши крупностью 9 – 16 мм при содержании класса менее 5 мм не более 5 % и прочности на сжатие не ниже 250 кг/ок в холодном состоянии.

С внедрением в эксплуатацию шахтных печей металлизации с горячей выгрузкой из-за большой деформации восстановленных окатышей возникли дополнительные показатели силы внешнего и внутреннего трения, которые определяют характер схода шихты в печи. При повышении коэффициента внутреннего трения нарушается равномерность движения шихты внутри шахтной печи, что приводит к нарушениям газодинамического режима восстановления и дестабилизации качества годного продукта. Коэффициенты трения определяются состоянием и структурой поверхности, а также степенью деформации окатышей в нижних горизонтах шахты при достижении высокой степени восстановления [8 – 9].

Многолетний опыт производства железорудных окатышей показал, что одним из самых распространенных способов регулирования физических и металлургических свойств окатышей является добавка в шихту различных флюсующих или флюсоупрочняющих добавок [10 – 18].

Внесение доломита в шихту окатышей вместо извести дает возможность избежать образования легкоплавких эвтектик, что позволяет повысить температуру восстановления окатышей в печах металлизации. Однако при сохранении температурно-временного режима обжига прочность окатышей на сжатие снижается (с 242 до 160 кг/окатыш), что обусловлено недостатком образования жидкофазной связки в процессе высокотемпературного упрочнения на обжиговой машине. Для получения высокой прочности обожженных окатышей с добавлением оксида магния необходимо повышать температуру в зоне обжиговой машины до 1300 – 1320 °C [6, 7, 10, 15].

Ввод MgO, наряду с улучшением показателей прочностных свойств окатышей при восстановлении, приводит к снижению их восстановимости. Наибольшей восстановимостью обладают окатыши основностью 1,2, где флюсом является известняк (0,6 % MgO). Несмотря на снижение восстановимости окатышей при вводе MgO, она остается выше, чем при основности 0,5, офлюсованных CaO. В процессе MIDREX основность обычно составляет 0,5 – 0,8, а в процессе HyL-III – изменяется от 0,2 до 1,2 [12 – 16].

Наилучшими металлургическими свойствами обладают окатыши, содержащие 3 – 5 % MgO, где флюсом является доломит. В качестве магнийсодержащих добавок к шихте окатышей могут служить магнезит, оливин, дунит. Исследованиями установлено, что добавка к супербогатому оленегорскому концентрату (0,4 – 0,6 % SiO₂) в количестве 1 – 2 % оливина (Mg, Fe)₂SiO₄ позволяет повысить как холодную (в 1,5 – 1,7 раза), так и горячую (в 1,5 – 3,0 раза) прочность окатышей [8].

На сегодняшний день исследователей в области производства железорудного сырья стал привлекать гидроксид магния (Mg(OH)₂), который относится к группе нерастворимых оснований.

Увеличение оксида магния в окатышах приводит к образованию пироксеновой фазы – (Mg, Fe, Ca)₂Si₂O₆, обладающей высокой температурой плавления (1540 – 1550 °C) [13].

Природный минерал гидроокиси магния, составляющий основной объем бруситовых руд, назван по имени американского минералога А. Бруса. Химическая формула Mg(OH)₂. Состав чистого минерала: 69,12 % MgO; 30,88 % H₂O.

Брусит – это минерал, который в основном состоит из гидроокиси магния, имеет меньшую пористость при нагревании и меньшую способность к растворению в материалах аглошихты по сравнению с магнезитом.

Брусит содержит меньше включений, которые являются основой образующегося шлама. Он содержит больше оксида магния и обладает меньшими потерями при прокаливании по сравнению с магнезитом. Это одна из позитивных характеристик, так как низкопористые материалы при нагревании предотвращают быструю когезию оксида магния в расплаве.

В брусите в целом меньше включений. Содержание оксида кремния меньше, чем в серпентините, а содержание оксида кальция меньше, чем в доломите. Если магнийсодержащая добавка содержит большое количество SiO₂, это приводит к образованию «толстой раковинной структуры» в шлаковой фазе и, в результате, уменьшению прочности агломерата [11, 16, 17].

На кафедре СТИ НИТУ «МИСиС» были проведены лабораторные эксперименты по применению магнезиального флюса «Флюмаг М» на основе брусита для получения железорудных окатышей [18].

«Флюмаг М» на основе брусита, согласно химическому анализу, имеет содержание оксида магния не менее 55 %, оксида кремния не более 6 %, оксида железа Fe₂O₃ не более 1 %, содержание серы не более 0,03 %, потери при прокаливании не более 35 %.

Проведены серии экспериментов по дозировке шихты в окатыши. Известняк, бентонит и флюс «Флюмаг М» измельчались в лабораторных условиях института на дисковом истирателе, материал просеивался через сито 0,071 мм. Магнетитовый концентрат, отобранный для исследований, содержал 97,65 % частиц менее 0,045 мм.

Качественные показатели шихтовых составляющих представлены в табл. 1.

С целью оценки флюса «Флюмаг М» в качестве флюсоупрочняющего компонента в производстве железорудных окатышей для выполнения сравнительного анализа были изготовлены окатыши с использованием известняка в аналогичных количествах.

Во всех экспериментах дозировка бентонита оставалась неизменной и составляла 0,6 %.

Таблица 1

Качественные показатели шихтовых материалов

Table 1. Quality indicators of charge materials

Материал	Химический состав, %									Массовая доля влаги, %
	Fe _{общ}	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	п.п.п.	
Концентрат	70,23	68,17	30,16	2,44	0,080	0,09	0,19	0,152	0,34	9,5
Бентонит	2,33	0,93	—	57,10	17,690	2,76	2,23	0,077	8,49	6,5
Известняк	1,11	—	0,27	4,45	3,480	49,25	0,55	0,041	—	2,3
Флюмаг М	—	0,15	—	4,24	0,045	3,40	59,14	—	31,5	1,9

Для изготовления окатышей брали по 2 кг магнетитового концентрата с целью обеспечения требуемого количества образцов для испытаний.

Сырые окатыши получали в лабораторном окомкователе (рис. 1). Затем их подвергали испытаниям на гранулометрический состав, прочность на сжатие, сброс, влагосодержание.

Прочность на сброс – n , раз, вычисляли по формуле

$$n = \frac{\sum n_i}{10},$$

где n_i – количество сбрасываний одного окатыша до нарушения целостности, раз.

Подсчет результата испытаний производился с точностью до целого значения. Под комкуемостью шихты

понимали способность материала образовывать гранулы с определенными прочностными свойствами.

Стандартизированной методики по определению комкуемости мелкодисперсного материала не существует, исследователями предлагаются различные способы определения комкуемости шихты. Сотрудниками кафедры СТИ НИТУ «МИСиС» с целью исследований процессов окомкования железорудных концентратов была предложена методика испытаний на комкуемость железорудной шихты, которая подробно представлена в работе [1]. В соответствии с этой методикой оценка комкуемости производится по выходу гранул более 5 мм, длительность процесса окомкования составляет 20 мин.

Определение данных по влажности и прочности сырых окатышей осуществлялось по методикам, принятым на промышленных предприятиях [19]. Результаты лабораторных исследований сырых окатышей представлены в табл. 2.

Массовую долю влаги (W) в процентах вычисляли по формуле

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} 100 \%,$$

где m_1 – масса емкости с навеской до высушивания, г; m_2 – масса емкости с навеской после высушивания, г; m – масса пустой емкости, г.

Вычисления производили с точностью до второго десятичного знака.

Расхождение между результатами двух параллельных измерений не превышало 0,3 %. Расхождение между результатами трех измерений не превышало 0,4 %.

Подсчет результата испытаний осуществлялся с точностью до целого значения.

Термическая обработка окатышей производилась в лабораторной печи в соответствии с разработанным температурно-временным режимом, который во всех экспериментах поддерживался одинаковым. Максимальная температура обжига составляла 1280 °С (рис. 2).

Прочность окатышей на сжатие определялась по методике согласно ГОСТ [20] с помощью гидравлическо-



Рис. 1. Окомкование шихты

Fig. 1. Charge pelletizing

Качественные показатели экспериментальных сырых окатышей с добавлением флюса «Флюмаг М»

Table 2. Quality indicators of experimental raw pellets with addition of FLUMAG M flux

Номер пробы	Флюсующая добавка	Массовая доля влаги в сырых окатышах, %	Комкуемость, %	Прочность сырых окатышей на сброс, количество, раз	Прочность сырых окатышей на сжатие, кг/ок
1	«Флюмаг М» 1 %	9,8	66,60	9	0,731
2	Известняк 1 %	9,8	76,40	10	0,791
3	«Флюмаг М» 2 %	9,6	99,00	6	1,216
4	Известняк 2 %	9,6	99,00	6	0,886
5	«Флюмаг М» 3 %	9,7	91,00	5	1,092
6	Известняк 3 %	9,6	87,00	7	0,948
7	Известняк 1 % + «Флюмаг М» 1 %	9,2	88,66	5	1,078
8	Известняк 0,5 % + «Флюмаг М» 1,5 %	9,4	98,25	5	0,837

го пресса, фиксирующего максимальную нагрузку на окатыш.

Прочность окатыша на сжатие P_{cp} вычисляли по формуле

$$P_{cp} = \frac{\sum P_i}{n},$$

где P_i – прочность на сжатие одного окатыша, кг (Н); n – количество окатышей, применяемых для определения прочности, шт.

Результаты округляли до одного десятичного знака, кг/ок. Прочность окатышей на дробление и истирание [21] проводили в лабораторном барабане и определяли по формуле

$$\Pi_{+5} = \frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3} 100,$$

где m_1 – масса фракции >5 мм после испытания в барабане, кг; m_2 – масса фракции <5 мм и >0,5 мм после испытания в барабане, кг; m_3 – масса фракции <0,5 мм после испытания в барабане, кг.

Сопротивление окатышей истиранию вычисляли по формуле

$$И_{-0,5} = \frac{m_3}{m_1 + m_2 + m_3} 100.$$

Определение прочности на удар и истирание проводили на двух пробах. За окончательный результат принимали среднее арифметическое результатов двух параллельных определений.

Анализ полученных результатов испытаний показал, что флюс «Флюмаг М» может быть использован при производстве железорудных окатышей. Учитывая особенности концентратов различных месторождений,

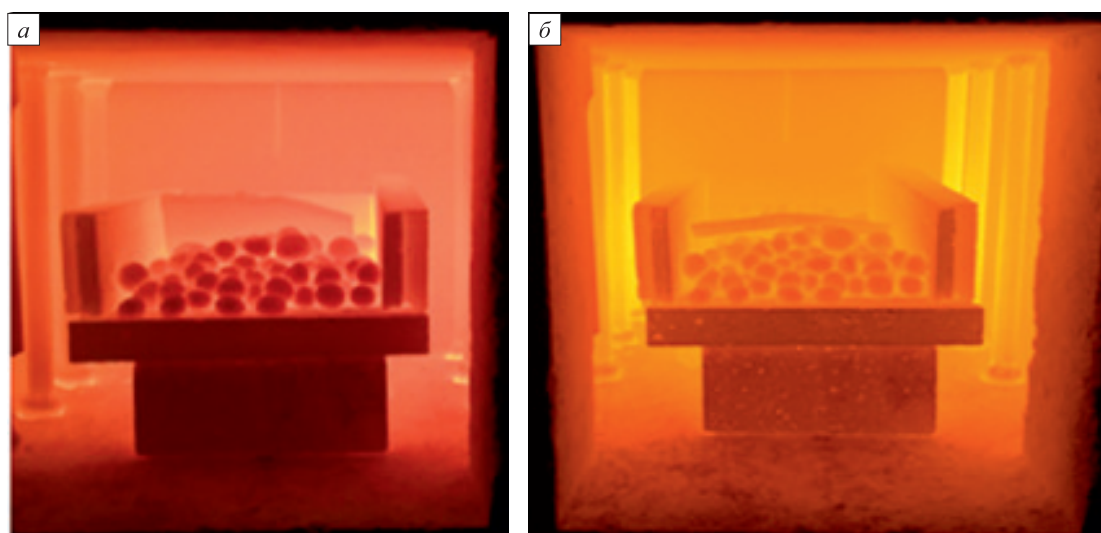


Рис. 2. Обжиг окатышей при температуре: 900 °C (а); 1280 °C (б)

Fig. 2. Pellets roasting: temperature 900 °C (a); temperature 1280 °C (b)

Таблица 3

Качественные показатели экспериментальных обожженных окатышей с добавлением флюса «Флюмаг М»

Table 3. Quality indicators of experimental roasted pellets with addition of FLUMAG M flux

Номер пробы	Флюсующая добавка	Прочность обожженных окатышей на сжатие, кг/ок	Прочность обожженных окатышей на удар (класс +5мм), %	Прочность обожженных окатышей на истирание (класс –0,5мм), %
1	«Флюмаг М» 1 %	324,7	87,60	6,90
2	Известняк 1 %	276,4	86,10	7,01
3	«Флюмаг М» 2 %	328,2	91,29	2,51
4	Известняк 2 %	335,6	91,26	5,50
5	«Флюмаг М» 3 %	309,4	90,24	5,54
6	Известняк 3 %	326,9	89,27	6,85
7	Известняк 1 % + «Флюмаг М» 1 %	295,5	90,47	4,87
8	Известняк 0,5 % + «Флюмаг М» 1,5 %	245,6	91,10	4,52

производимых в разных технологических условиях, оптимизация дозировки флюса должна осуществляться в каждом конкретном технологическом условии и может отличаться от представленных выше результатов.

Выводы. Флюс «Флюмаг М» при добавлении в железорудный концентрат в качестве шихтовой составляющей не препятствует процессу окомкования.

Флюмаг М (брусит) является технологически чистым поставщиком оксида магния в железорудную шихту и в процессе окомкования позволяет получить сырые окатыши без ухудшения их качественных характеристик.

Анализ физических характеристик обожженных окатышей показывает, что при вводе флюса «Флюмаг М» прочность обожженных окатышей на сжатие несколько снижается, что можно объяснить уменьшением количества жидкофазной связки при использовании оксида магния в качестве флюса. Данный фактор подтверждает необходимость увеличения температуры обжига окатышей при использовании магниевых флюсов до температур 1300 – 1330 °С.

Прочность обожженных окатышей на удар и истирание при вводе флюса «Флюмаг М» несколько выше, чем при использовании известняка. Самое высокое различие в прочностных свойствах на истирание наблюдается при содержании 2 % «Флюмаг М».

При увеличении дозировки флюса «Флюмаг М» наблюдается тенденция к снижению прочности окатышей на сжатие, но это можно регулировать путем изменения температурно-временного режима термической обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гиммельфарб А.И., Неменов А.М., Тарасов Б.Е. Металлизация и электроплавка железорудного сырья. – М.: Металлургия, 1981. – 152 с.
2. Тулин Н.А., Кудрявцев В.С., Пчелкин С.А. и др. Развитие бескоксовой металлургии. – М.: Металлург, 1987. – 328 с.
3. Carvalho R. Supply availability of DR grade pellets // 3rd World DRI & Pellet Congress, Abu Dhabi, March, 2015. Metals Bulletin. Pe-

жим доступа: <https://www.metalbulletin.com/events/download.ashx?document/speaker/7663/a0ID000000X0kBMMAJ/Presentation>.

4. Васильев С.С., Васильев Е.Н. Изменение прочности обожженных неофлюсованных окатышей из богатого Лебединского концентрата в процессе восстановления. – В кн.: Прямое получение железа и порошковая металлургия. Тематический отраслевой сборник. 1976. № 2. С. 5.
5. Nobuhiko T. Development of iron-making technology // Nippon Steel Technical Report. 2012. No. 101. P. 79 – 88.
6. Алексеев Л.Ф., Горбачев В.А., Кудинов Д.З., Шаврин С.В. Структура и разрушение окатышей при восстановлении. – М.: Наука, 1983. – 78 с.
7. Halt J.A., Kawatra S.K. Review of organic binders for iron ore concentrate agglomeration // Mineral & Metallurgical Processing. 2014. Vol. 31. No. 2. P. 73 – 94.
8. Ковалев Д.А., Ванюкова Н.Д., Иващенко В.П. и др. Теоретические основы производства окискованного сырья. – Днепропетровск: ИМА-пресс, 2011. – 476 с.
9. Chen M., Zhang W., Zhao Z. etc. High temperature softening behaviours of iron blast furnace feeds and their correlations to the microstructures // 6th Int. Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. – John Wiley & Sons, Inc., 2015. P. 67 – 74.
10. Okrkr S.I., Onukwuli O.D. Effect of basicity on metallurgical properties of pellets produced from Itakpe iron ore concentrates // Discovery and Innovation. 1999. Vol. 11. No. 3-4. P. 170-176
11. Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей / В.М. Абзалов, В.А. Горбачев, С.Н. Евстигнин и др. / Под ред. Л.И. Леонтьева. — Екатеринбург: МИЦ, 2015. – 335 с.
12. Kalenga M.K., Garbers-Craig A.M. Investigation into how the magnesia, silica and alumina contents of iron ore sinter influence its mineralogy and properties // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2010. Vol. 10. P. 447 – 456.
13. Poveromo J.J. Grade pellet quality and supply // AISTech (Assoc. Iron & Steel Technology) Annual Meeting, Indianapolis, May, 2015. P. 751 – 762.
14. Forsmo S.P.E., Samskog P.O., Bjorkman M.T. A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness // Powder Technology. 2008. Vol. 181. No. 3. P. 321 – 330.
15. Wang Zhaocai, Mansheng Chu, Shiqiang Chen etc. Effects of B-Mg additive on metallurgical properties of oxidized pellets // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 284-286. P. 1232 – 1236.
16. Umadevi T., Roy A.K., Prabhu P.C. Influence of magnesia on iron ore sinter properties and productivity – use of dolomite and

- dunite // *Steel Research International Journal*. 2009. Vol. 80. No. 11. P. 800 – 807.
17. Зборщик А.М. Теоретические основы металлургического производства. – Донецк: ГВУЗ ДонНТУ, 2008. – 189 с.
 18. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Кожухов А.А. Роль оксида магния в формировании физико-химических и металлургических свойств железорудных окатышей // *Черная металлургия*. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2018. Вып. 5 (1421). С. 23 – 27.
 19. ГОСТ 12764-73. Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Метод определения влаги. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200024455> (Дата обращения 9.01.2019).
 20. Межгосударственный стандарт. Окатыши железорудные. Метод определения прочности на сжатие. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-24765-81> (Дата обращения 9.01.2019).
 21. ГОСТ 15137-77. Руды железные и марганцевые, агломераты и окатыши. Метод определения прочности во вращающемся барабане. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-15137-77> (Дата обращения 9.01.2019).

Поступила в редакцию 17 мая 2019 г.

После доработки 20 мая 2019 г.

Принята к публикации 2 июня 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 6, pp. 436–442.

EFFECT OF FLUMAG M FLUX ON STRENGTH PROPERTIES OF IRON ORE PELLETS

A.A. Kozhukhov, A.S. Timofeeva, T.V. Nikitchenko

Ugarov Stary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology “MISiS”, Stary Oskol, Belgorod Region, Russia

Abstract. Currently, the most common fluxing additive to pellets is dolomite $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, in which the content of magnesium oxide can be from 17 to 22 %. But if it is necessary to increase magnesium oxide in pellets, it is necessary to increase the dosage of dolomite, and thus the iron content decreases, which entails a decrease in yield ratio at subsequent processing. One of the fluxes containing magnesium is brucite. Compared with dolomite, magnesium oxide content in pure brucite is more than 3 times higher. The basis of FLUMAG M flux is brucite. The content of magnesium oxide in it is not less than 55 %. The paper presents series of laboratory studies on the effect of FLUMAG M flux dosage on pelletizing ability of the charge and such properties of iron ore pellets as compressive, impact and abrasion strength. We have made the tests on raw and fired pellets with FLUMAG M flux. The comparative analysis of strength properties of the pellets obtained with the use of FLUMAG M and limestone was performed. Content of the binder – bentonite and magnetite concentrate for all experiments remained unchanged. The results of these experiments indicate that FLUMAG M does not interfere with charge pelletizing ability. The strength of raw pellets for discharge and compression with FLUMAG M flux has small deviations from the pellets with the addition of limestone. Roasted pellets with the addition of FLUMAG M flux have higher strength than ones with limestone. The higher difference in strength properties is observed at the flux content of 2 %.

Keywords: brucite, FLUMAG M, strength properties, raw pellets, roasted pellets, pelletizing ability, impact, compression, abrasion, quality.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-436-442

REFERENCES

1. Gimmel'farb A.I., Nemenov A.M., Tarasov B.E. *Metallizatsiya i elektropлавка zhelezorudnogo syr'ya* [Metallization and electric smelting of iron ore raw materials]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 152 p. (In Russ.).
2. Tulin N.A., Kudryavtsev V.S., Pchelkin S.A. etc. *Razvitie beskoksovoi metallurgii* [Development of non-coke metallurgy]. Moscow: Metallurg, 1987, 328 p. (In Russ.).
3. Carvalho R. Supply availability of DR grade pellet. In: *3rd World DRI & Pellet Congress, Abu Dhabi, March, 2015. Metals Bulletin*. Available at URL: <https://www.metalbulletin.com/events/download.ashx?document/speaker/7663/a0ID000000X0kBMMAJ/Presentation>
4. Vasil'ev S.S., Vasil'ev E.N. Changes in strength of roasted non-fluxed pellets from rich Lebedinsky concentrate during recovery process. In: *Pryamoe poluchenie zheleza i poroshkovaya metallurgiya. Tematicheskii otraslevoi sbornik* [Direct production of iron and powder metallurgy. Thematic industrial directory]. 1976, no. 2, p. 5. (In Russ.).
5. Nobuhiko T. Development of iron-making technology. *Nippon Steel Technical Report*. 2012, no. 101, pp. 79–88.
6. Alekseev L.F., Gorbachev V.A., Kudinov D.Z., Shavrin S.V. *Struktura i razrushenie okatyshei pri vosstanovlenii* [Structure and destruction of pellets during recovery]. Moscow: Nauka, 1983, 78 p. (In Russ.).
7. Halt J.A., Kawatra S.K. Review of organic binders for iron ore concentrate agglomeration. *Mineral & Metallurgical Processing*. 2014, vol. 31, no. 2, pp. 73–94.
8. Kovalev D.A., Vanyukova N.D., Ivashchenko V.P. etc. *Teoreticheskie osnovy proizvodstva okuskovannogo syr'ya* [Theoretical basics for agglomerates production]. Dnepropetrovsk: IMA-press, 2011, 476 p. (In Russ.).
9. Chen M., Zhang W., Zhao Z. etc. High temperature softening behaviours of iron blast furnace feeds and their correlations to the microstructures. In: *6th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. John Wiley & Sons, Inc., 2015, pp. 67–74.
10. Okrkr S.I., Onukwuli O.D. Effect of basicity on metallurgical properties of pellets produced from Itakpe iron ore concentrates. *Discovery and Innovation*. 1999, vol. 11, no. 3–4, pp. 170–176.
11. Abzalov V.M., Gorbachev V.A., Evstyugin S.N. etc. *Fiziko-khimicheskie i teplotekhnicheskie osnovy proizvodstva zhelezorudnykh okatyshei* [Physico-chemical and thermal basics of iron ore pellets production]. Leont'ev L.I. ed. Ekaterinburg: MITs, 2015, 335 p. (In Russ.).
12. Kalenga M.K., Garbers-Craig A.M. Investigation into how the magnesia, silica and alumina contents of iron ore sinter influence its mineralogy and properties. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2010, vol. 10, pp. 447–456.
13. Poveromo J.J. Grade pellet quality and supply. In: *AISTech (Assoc. Iron & Steel Technology) Annual Meeting, Indianapolis, May, 2015*, pp. 751–762.
14. Forsmo S.P.E., Samskog P.O., Bjorkman M.T. A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness. *Powder Technology*. 2008, vol. 181, no. 3, pp. 321–330.
15. Wang Zhaocai, Mansheng Chu, Shiqiang Chen etc. Effects of B-Mg additive on metallurgical properties of oxidized pellets. *Advanced Materials Research*. 2011, vol. 284–286, pp. 1232–1236.
16. Umadevi T., Roy A.K., Prabhu P.C. Influence of magnesia on iron ore sinter properties and productivity – use of dolomite and dunite. *Steel Research International Journal*. 2009, vol. 80, no. 11, pp. 800–807.
17. Zborshchik A.M. *Teoreticheskie osnovy metallurgicheskogo proizvodstva* [Theoretical basics of metallurgical production]. Donetsk: DonNTU, 2008, 189 p. (In Russ.).
18. Timofeeva A.S., Nikitchenko T.V., Kozhukhov A.A. Role of magnesium oxide in formation of physical, chemical and metallurgical

- properties of iron ore pellets. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2018, no. 5 (1421), pp. 23–27. (In Russ.).
19. GOST 12764-73. Rudy zheleznye, kontsentraty, aglomeraty i okatyshi. Metod opredeleniya vlagi [State standard GOST 12764-73. Iron ores, concentrates, agglomerates and pellets. Method of moisture determination]. Electronic resource. Available at URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200024455> (Accessed 9.01.2019). (In Russ.).
 20. Mezhsudarstvennyi standart. Okatyshi zhelezorudnye. Metod opredeleniya prochnosti na szhatie [Interstate standard. Iron ore pellets. Method for determination of compressive strength]. Electronic resource. Available at URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-24765-81> (Accessed 9.01.2019). (In Russ.).
 21. GOST 15137-77. Rudy zheleznye i margantsevye, aglomeraty i okatyshi. Metod opredeleniya prochnosti vo vrashchayushchetsya barabane [State standard GOST 15137-77. Iron and manganese ores, agglomerates and pellets. Method for determination of strength

in a rotating drum]. Electronic resource. Available at URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-15137-77> (Accessed 9.01.2019). (In Russ.).

Information about the authors:

A.A. Kozhukhov, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair "Metallurgy and Metal Science named after S.P. Ugarova"

A.S. Timofeeva, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metallurgy and Metal Science named after S.P. Ugarova" (uked@yandex.ru)

T.V. Nikitchenko, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Assist. Professor of the Chair "Metallurgy and Metal Science named after S.P. Ugarova"

Received May 17, 2019

Revised May 20, 2019

Accepted June 2, 2020

УДК 621.791.92; 621.791.754; 621.791.042

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ ИЗ СТАЛИ*

Жаткин С.С.¹, к.т.н., доцент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии»

Никитин К.В.¹, д.т.н., профессор, декан факультета машиностроения,
металлургии и транспорта

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

Панкратов С.С.¹, магистрант кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии»

Дунаев Д.А.¹, магистрант кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии»

¹ Самарский государственный технический университет
(443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 244)

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

Аннотация. Приведены результаты исследования по влиянию режимов объемной электродуговой наплавки на геометрическую точность объектов типа «куб» (20×20×20 мм) из стальных присадочных материалов 09Г2С и 06Х19Н9Т. Установлено, что при наплавке образцов из стали 09Г2С фактические размеры по длине и ширине в основном превышают, а по высоте меньше заданных размеров модели. Это может быть связано с повышенным растеканием расплава по подложке при формировании первых слоев. Определен оптимальный режим наплавки объектов типа «куб» из стали 09Г2С. При наплавке образцов из стали 06Х19Н9Т растекания не происходит, однако все фактические размеры получились меньше по отношению к заданным. Вероятно, это обусловлено влиянием усадочных процессов, протекающих в наплавляемых слоях в процессе их затвердевания. Для образцов из стали 06Х19Н9Т наиболее оптимальным является режим, при котором уменьшение размеров по длине и ширине составило не более 2,5 %, а по высоте – 13,5%. Исследования по влиянию напряжения сварочной дуги и марки присадочного материала на ширину наплавляемой дорожки подтвердили склонность стали 09Г2С к растеканию по подложке во всем исследованном интервале напряжения (11 ÷ 19 В). Изучена микроструктура наплавленных образцов. Механические испытания при комнатной температуре на растяжение наплавленных образцов показали, что они обладают приемлемым комплексом механических свойств, превышающих справочные значения. Это подтверждает, что процесс формирования идет с высоким качеством без образования зон несплавления и пористости.

Ключевые слова: аддитивные технологии, электродуговая наплавка, присадочные материалы, структура, механические свойства.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-443-450

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время технологии аддитивного производства находят все более широкое применение для изготовления отдельных деталей [1–4] в машиностроении, двигателестроении и, особенно, в аэрокосмической отрасли [5]. Это связано с тем, что производство фасонных изделий традиционными способами (литье, кузнечно-прессовое производство, механическая обработка и т. д.) требует существенных временных и энергетических затрат.

Одним из наиболее перспективных направлений аддитивного производства являются развитие и адаптация технологий послойного получения трехмерных объектов (Additive Layered Manufacturing, ALM), которые известны под более общим термином – «быстрое производство» (Rapid Manufacturing, RM) [2].

Методы аддитивного производства могут быть классифицированы по природе и агрегатному состоянию исходного сырья, а также по механизмам связывания между собой слоев материала [6, 7]. Среди большого разнообразия технологий аддитивного производства для непосредственного получения деталей сложной конфигурации и ответственного назначения наибольшее внимание уделяется технологиям, основанным на использовании металломатричных материалов [8–10].

Технологии, основанные на лазерном спекании или сплавлении металлических порошков из стали, титановых и алюминиевых сплавов, получили широкое распространение для производства изделий сложной конфигурации, но небольших размеров [7]. Однако для производства изделий из вышеперечисленных материалов, но большей массы и размеров, наиболее целесообразен метод, основанный на послойной электродуговой наплавке присадочного материала в виде проволоки

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проектной части государственного задания № 0778-2020-0005.

(Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM) [11 – 15]. Среди проволоочно-дугового аддитивного производства следует выделить сварку металлическим электродом в газовой среде (GMAW), газoeлектрическую сварку вольфрамовым электродом (GTAW) и сварку плазменной дугой (PAW) [16, 17]. В целях расширения области применения технологий WAAM проводятся исследования по использованию различных материалов: из сплавов на основе титана [18, 19], никеля [20], алюминия [21, 22], стали [23, 24]. Наряду с совершенствованием оборудования для реализации технологий WAAM, разрабатываются стратегии построения металлических изделий сложной конфигурации, обеспечивающие качественные показатели по структуре и геометрии [25].

Таким образом, аддитивное производство, основанное на технологиях WAAM, является перспективным научно-техническим направлением.

Цель работы – исследование процессов формирования объектов, их структуры и свойств из стальных присадочных материалов 09Г2С и 06Х19Н9Т объемной дуговой наплавкой при помощи сварочного инверторного аппарата на базе станка с числовым программным управлением.

Работы выполнялись в лаборатории электрофизических технологий Центра литейных технологий Самарского государственного технического университета.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В исследованиях по объемной электродуговой наплавке использовался сварочный инверторный полуавтомат СВАРОГ MIG 200PRO (N229) с системой подачи проволоки внутреннего исполнения. Для автоматизации процесса наплавки применяли станок с числовым программным управлением (ЧПУ) МШ-2.2. Для реализации процесса объемной дуговой наплавки на данном станке на место крепления шпиндельной головки устанавливался специально изготовленный держатель, позволяющий закреплять и позиционировать сварочную головку с подачей присадочной проволоки. Дополнительно для управления процессом наплавки в комплекс был включен электронный прерыватель, представляющий собой блок управления для включения и выключения сварочной горелки в процессе ее движения по задаваемой программе. Работа штатива осуществля-

лась при подключенных PC-совместимом компьютере и блоке управления БУ-03 через программы управления CNC (например, Mach3, KAM4 и пр.). Для создания управляющих программ и последующей реализации объемной электродуговой наплавки использовались пакет трехмерного моделирования КОМПАС-3D фирмы АСКОН, программа подготовки управляющей программы Simplify-3D, а также программное обеспечение Mach3Loader (профиль ReabinMill), предназначенное для управления станком с ЧПУ МШ-2.2. Трехмерная модель объекта создавалась в КОМПАС-3D. Полученная модель загружалась в Simplify-3D, где происходила подготовка траектории движения горелки с заданным размером «сопла» и последующее сохранение разработанного файла управляющей программы с использованием G-кодов, необходимых для работы в программе Mach3Loader.

Сформированные объемной наплавкой образцы исследовались на соответствие фактических и заданных размеров, а также на однородность структуры по всей зоне наплавки и наличие дефектов. Определение механических свойств объектов, полученных объемной наплавкой, осуществляли на вырезанных из них образцах в соответствии с ГОСТ 1497-84.

Исследования микроструктуры зон наплавки проводились на аналитическом растровом электронном микроскопе JSM-6390А фирмы JEOL, а механические испытания на растяжение – на разрывной испытательной машине ИР 5057-50.

В качестве присадочного материала использовались стальные проволоки марок 09Г2С и 06Х19Н9Т диаметром 0,8 мм (табл. 1).

Для исследований наплавлялись образцы типа «куб» (20×20×20 мм). Объемная наплавка осуществлялась в непрерывном автоматическом режиме в среде аргона послойно по траекториям, созданным в программе Simplify-3D.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе экспериментов варьировали следующими параметрами наплавки (табл. 2): скоростью движения горелки $v_{дв}$ относительно стола; скоростью подачи $v_{под}$ присадочной проволоки; напряжением U дуги (число слоев во всех экспериментах равнялось 7).

Таблица 1

Химический состав присадочной проволоки для наплавки

Table 1. Chemical composition of the filler wire for surfacing

Материал	Химический состав, % (по массе)						
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Ti
09Г2С (ГОСТ 2246-70)	<0,12	0,5 – 0,8	1,3 – 1,7	<0,3	<0,3	<0,3	–
06Х19Н9Т (ГОСТ 2246-70)	<0,08	<1,0	1,0 – 2,0	8,0 – 10,0	18,0 – 20,0	–	0,5 – 1,0

Таблица 2

Параметры режимов наплавки образцов

Table 2. Parameters of surfacing modes of the samples

Параметр	Режим						
	1	2	3	4	5	6	7
Сталь 09Г2С							
$v_{\text{под}}$, м/мин	3,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,5	4,0
U , В	15	18	18	15	15	18	20
$v_{\text{дв}}$, м/мин	0,30	0,30	0,45	0,45	0,60	0,60	0,60
Сталь 06Х19Н9Т							
$v_{\text{под}}$, м/мин	3,0	3,0	3,0	3,5	3,5	3,5	4,0
U , В	15	15	15	18	18	18	20
$v_{\text{дв}}$, м/мин	0,30	0,45	0,60	0,30	0,45	0,60	0,60

На рис. 1 представлены наплавленные образцы в виде куба, полученные при различных режимах наплавки из сталей 09Г2С и 06Х19Н9Т.

Анализ влияния режимов наплавки на точность воспроизведения математической модели производили по величине отклонения Δ (%) фактического линейного размера от заданного ($20 \times 20 \times 20$ мм):

$$\Delta = \frac{h - H}{H} 100, \quad (1)$$

где h – фактический линейный размер, мм; H – заданный линейный размер.

При наплавке образцов из стали 09Г2С (рис. 2, а) фактические размеры по длине и ширине в основном больше (положительные значения Δ), а по высоте меньше (отрицательные значения Δ) заданных размеров модели. Это может быть связано с повышенным растеканием расплава по подложке при формировании первых наплаваемых слоев. Наиболее оптимальным для образцов из стали 09Г2С является режим 3 (см. табл. 2, рис. 2, а), при котором отклонение всех фактических размеров не превышает 5 % от заданных размером модели.

При наплавке образцов из стали 06Х19Н9Т (рис. 2, б) растекания не происходит, однако все фактические размеры получились меньше по отношению к заданным. Вероятно, это обусловлено большим влиянием усадочных процессов, протекающих в наплаваемых слоях в процессе их затвердевания. Наиболее оптимальным для образцов из стали 06Х19Н9Т является режим 7 (см. табл. 2, рис. 2, б), при котором уменьшение размеров по длине и ширине составило не более 2,5 %, а по высоте – 13,5 %.

Исследовано влияние напряжения сварочной дуги и марки присадочного материала на ширину (h , мм) наплаваемой дорожки. Режимы наплавки: скорость подачи $v_{\text{под}}$ проволоки 3 м/мин; скорость перемещения $v_{\text{дв}}$ стола 0,45 м/мин; количество слоев 7. При одинаковых режимах наплавки ширина дорожки из стали 09Г2С больше по сравнению с шириной дорожки, полученной при наплавке стали 06Х19Н9Т (рис. 3). Полученные данные подтверждают склонность присадочного материала из стали 09Г2С к растеканию по подложке. При этом установлена общая тенденция к увеличению

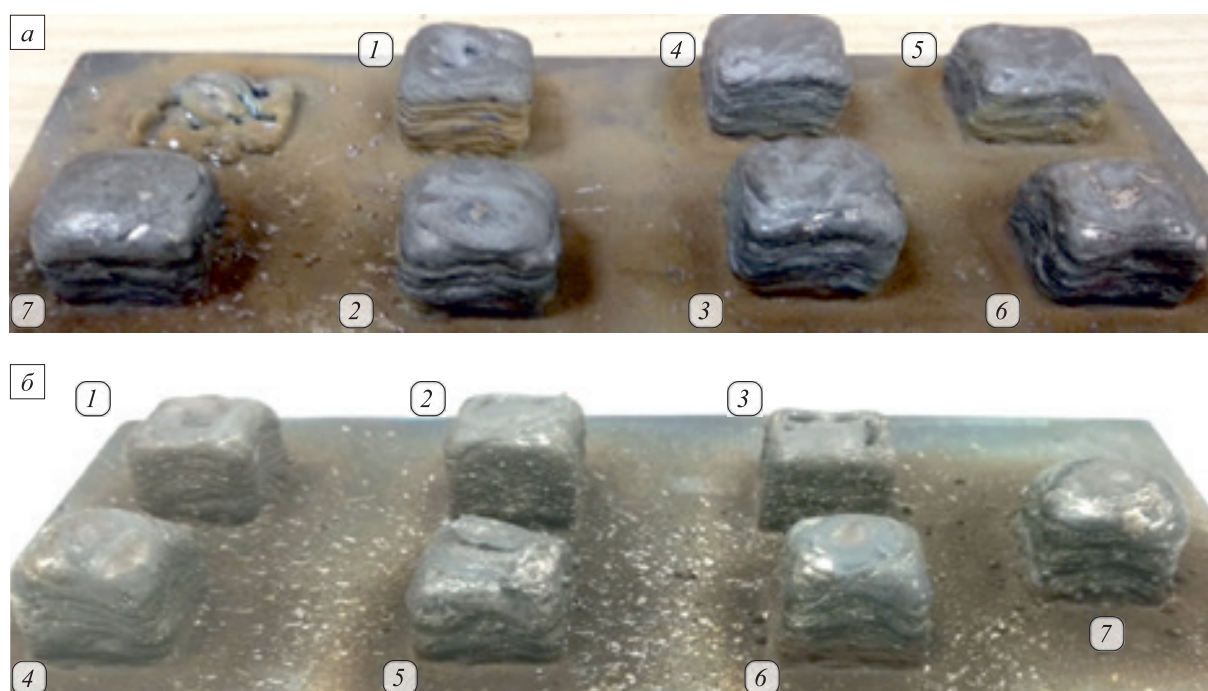


Рис. 1. Наплавленные образцы «куб» из сталей 09Г2С (а) и 06Х19Н9Т (б)

Fig. 1. Surfaced samples of “cube” type of steels 09G2S (a) and 06Kh19N9T (b)

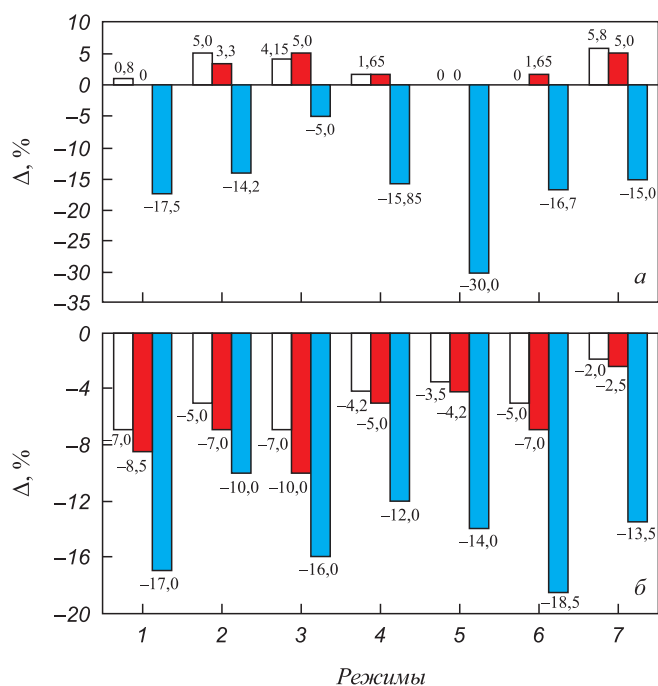


Рис. 2. Влияние режимов наплавки на отклонение фактических линейных размеров от заданных:

□ – длина; ■ – ширина; ■ – высота;
а – сталь 09Г2С; б – сталь 06Х19Н9Т

Fig. 2. Effect of surfacing modes on deviation of the actual linear dimensions from the set ones:

□ – length; ■ – width; ■ – height;
а – 09G2S steel; б – 06Kh19N9T steel

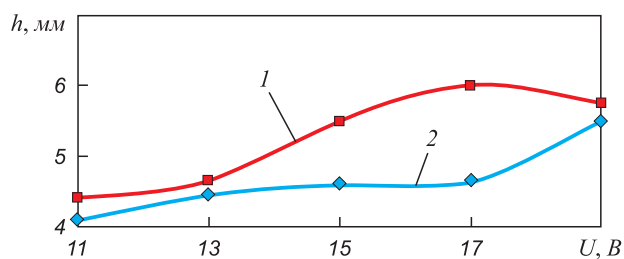


Рис. 3. Влияние напряжения сварочной дуги и марки присадочного материала на ширину наплавляемой дорожки:

1 – сталь 09Г2С; 2 – сталь 06Х19Н9Т

Fig. 3. Effect of voltage of the welding arc and grade of the filler material on width of surfaced track:
1 – 09G2S steel; 2 – 06Kh19N9T steel

ширины наплавляемой дорожки с ростом напряжения сварочной дуги.

Микроструктуру заготовок «куб» исследовали на образцах, полученных по режимам, которые обеспечили получение наиболее точных фактических размеров: из стали 09Г2С – режим 3; из стали 06Х19Н9Т – режим 7 (рис. 4).

Видно, что в образцах присутствует незначительное количество пор при достаточно однородной структуре по высоте наплавки (см. рис. 4). Микроструктура наплавки из стали 09Г2С состоит из бейнита, феррита и перлита. В микроструктуре стали 06Х19Н9Т наблюдаются хорошо выраженные аустенитные зерна. В ниж-

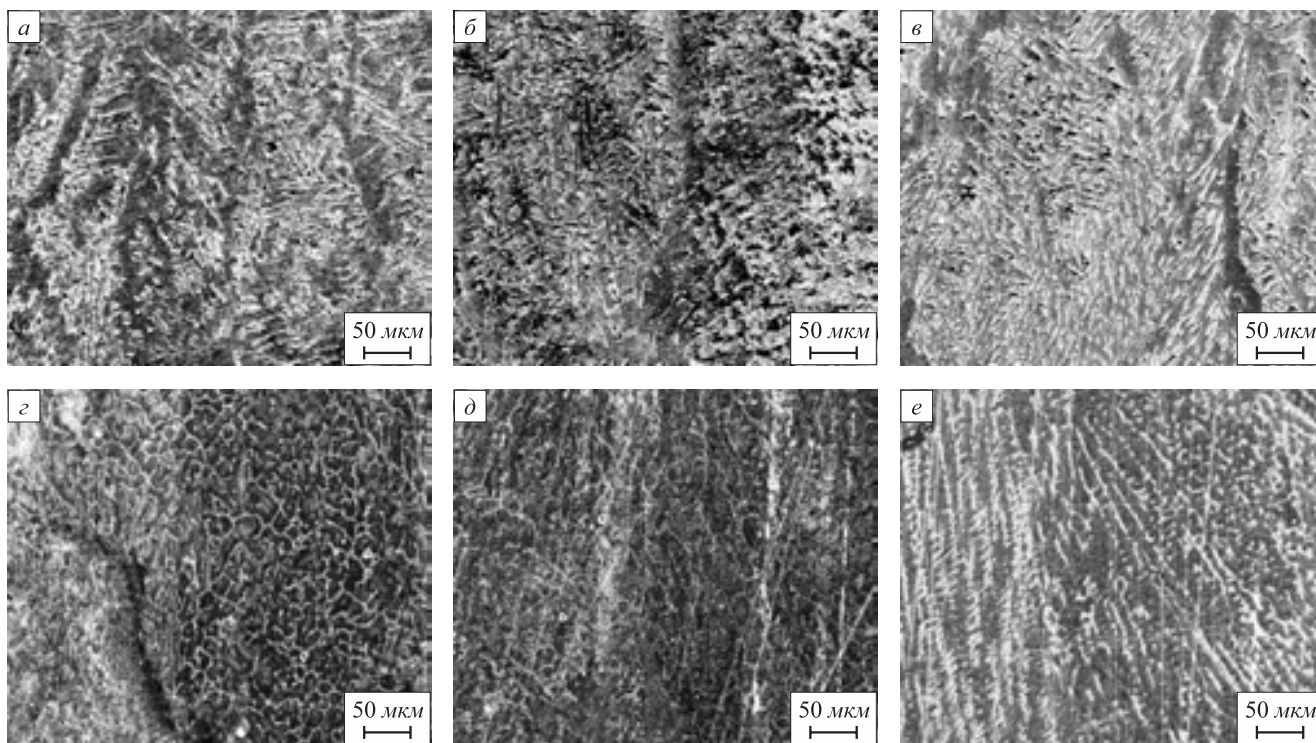


Рис. 4. Микроструктура наплавленных образцов:
а – в – сталь 09Г2С; г – е – сталь 06Х19Н9Т; верх, середина, низ, соответственно

Fig. 4. Microstructure of the surfaced samples:
а – в – 09G2S steel; г – е – 06Kh19N9T steel; top, middle, bottom, respectively

ней части зоны наплавки формируется выраженная дендритная структура (аустенит и α -фаза), обусловленная более высоким теплоотводом через подложку.

Далее получали наплавкой заготовки ($d \times ш \times в = 70 \times 20 \times 25$ мм) для испытания механических свойств при растяжении (рис. 5, а, б). Режимы наплавки были одинаковы для обоих присадочных материалов: $v_{\text{под}} = 4,0$ м/мин; $v_{\text{дв}} = 0,3$ м/мин; $U = 2$ В. Усредненные значения механических свойств получали по результатам пяти испытаний (табл. 3). Изображения вырезанных образцов после механических испытаний представлены на рис. 5, в, г.

Механические свойства наплавленных образцов превосходят минимально допустимые значения, что

указывает на качественное формирование слоев и отсутствие зон несплавления и пористости.

Выводы

На основе разработанного комплекса и управляющих программ для объемной электродуговой наплавки проведена отработка режимов и получены опытные образцы объемных объектов типа «куб» из сталей 09Г2С и 06Х19Н9Т.

Экспериментально установлены следующие наиболее оптимальные режимы, обеспечивающие при наплавке максимальное соответствие фактических размеров размерам модели: $U = 18$ В, $v_{\text{под}} = 3,5$ м/мин,



Рис. 5. Наплавленные заготовки (а, б) и вырезанные образцы (в, г) после механических испытаний: а, в – сталь 09Г2С; б, г – сталь 06Х19Н9Т

Fig. 5. Surfaced billets (a, b) and cut samples (v, g) after mechanical tests: a, v – 09G2S steel; b, g – 06Kh19N9T steel

Таблица 3

Результаты испытаний на растяжение после наплавки

Table 3. The results of tensile testing after surfacing

Материал образца	σ_b , МПа		σ_t , МПа		δ , %	
	эксп.	справ.	эксп.	справ.	эксп.	справ.
09Г2С	536,7	510 – 520 [26, 27]	423,3	400 – 420 [24, 25]	23	Не менее 22 [26, 27]
06Х19Н9Т	683,3	Не менее 640 [28, 29]	493,3	Не менее 430 [26, 27]	41	Не менее 35 [28, 29]

$v_{\text{дв}} = 0,45$ м/мин (сталь 09Г2С); $U = 20$ В, $v_{\text{под}} = 4,0$ м/мин,
 $v_{\text{дв}} = 0,60$ м/мин (сталь 06Х19Н9Т).

Исследования микроструктуры наплавленных образцов показали, что при многопроходной наплавке в оптимальных режимах формируется однородная структура по высоте наплавки с минимальным количеством пор.

Проведенные механические испытания при комнатной температуре на растяжение наплавленных образцов показали, что они обладают приемлемым комплексом механических свойств, превышающих справочные значения. Это подтверждает, что процесс формирования идет с высоким качеством, без образования зон несплавления и пористости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Huang S., Liu P., Mokasdar A., Hou L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review // *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 67. No. 5 – 6. P. 1191 – 1203.
- Petrovic V., Gonzales J., Ferrando O. etc. Additive layered manufacturing: sectors of industrial applications shown through case studies // *Int. Journal of Production Research*. 2011. Vol. 49. No. 4. P. 1061 – 1079.
- Sharon L.N. Ford. Additive Manufacturing Technology: Potential Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness // *Journal of Int. Commerce and Economics*. September 2014. Electronic resource. Available at URL: https://usitc.gov/publications/332/journals/vol_vi_article4_additive_manufacturing_technology.pdf (Accessed 06.06.2020).
- Gebhardt A., Höttner J.-S. Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. – Munich Hanser: Carl GmbH + Co., 2016. – 611 p.
- Liu P., Huang S., Mokasdar A. etc. The impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain: supply chain operation reference (SCOR) model based analysis // *Production Planning and Control*. 2014. Vol. 25. No. 13 – 14. P. 1169 – 1181.
- Gebhardt A. Rapid Prototyping. – Hanser: Carl GmbH + Co., 2003. – 379 p.
- Kruth J.-P., Mercelis P., Van Vaerenbergh J. etc. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting // *Rapid Prototype Journal*. 2005. Vol. 11. No. 1. P. 26 – 36.
- Zhukov V.V., Grigorenko G.M., Shapovalov V.A. Additive manufacturing of metal products (review) // *The Paton Welding Journal*. 2016. No. 5 – 6. P. 137 – 142.
- Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 117. P. 371 – 392.
- DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S. etc. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties // *Progress in Materials Science*. 2018. Vol. 92. P. 112 – 224.
- Knezović N., Topić A. Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) – a new advance in manufacturing // *New Technologies, Development and Application*. Karabegović I. ed. 2018. Vol. 42. P. 65 – 71.
- Williams S. W., Martina F., Addison A. C. etc. Wire + Arc Additive Manufacturing // *Materials Science and Technology*. 2016. Vol. 32. No. 7. P. 641 – 647.
- Ding D., Pan Z., Stephen van Duin etc. Fabricating Superior NiAl bronze components through wire arc additive manufacturing // *Materials*. 2016. Vol. 9. No. 652. P. 1 – 12.
- Nagamatsua H., Sasahara H., Mitsutake Y., Hamamoto T. Development of a cooperative system for wire and arc additive manufacturing and machining // *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 31. Article 100896.
- Chen X., Su C., Wang Y. etc. Cold Metal Transfer (CMT) Based Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) System // *Journal of Surface Investigation*. 2018. Vol. 12. No. 6. P. 1278 – 1284.
- Wang X., Fan D., Huang J., Huang Y. Numerical simulation of arc plasma and weld pool in double electrodes tungsten inert gas welding // *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 85. P. 924 – 934.
- Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests // *The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 81. No. 1 – 4. P. 465 – 481.
- Baufeld B., Van der Biest O., Gault R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties // *Materials & Design*. 2010. Vol. 31. P. 106 – 111.
- Wang F., Williams S., Colegrove P., Antonysamy A.A. Microstructure and mechanical properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012. Vol. 44. No. 2. P. 968 – 977.
- Clark D., Bache M.R., Whittaker M.T. Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 203. No. 1 – 3. P. 439 – 448.
- Ланченко О.В., Жабров Л.А., Курушкин Д.В., Попович А.А. Макроструктура и механические свойства Al – Si, Al – Mg – Si, Al – Mg – Mn-сплавов, полученных электродуговым аддитивным выращиванием // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2018. No. 11. С. 63 – 69.
- Korzyk V.N., Khaskin V.Yu., Grinyuk A.A. etc. The study of the technological characteristics of hybrid plasma arc welding of aluminum alloys // *Sciences of Europe*. 2016. No. 6. P. 45 – 51.
- Peleshenko S., Korzyk V., Voitenko O. etc. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review) // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 87. No. 3/1. P. 42 – 52.
- Konovalov S.V., Kornyshev V.E., Gromov V.E. etc. Formation features of structure-phase states of Cr–Nb–C–V containing coatings on martensitic steel // *Journal of Surface Investigation*. 2016. Vol. 10. No. 5. P. 1119 – 1124.
- Michel F., Lockett H., Ding J. etc. A modular path planning solution for Wire + Arc Additive Manufacturing // *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. 2019. No. 60. P. 1 – 11.
- Св-08Г2С. Омедненная сварочная проволока ESAB // Производство сварочной проволоки: официальный сайт. 2019. Режим доступа: http://akar.pro/images/docs/listovka_sv-08g2s.pdf (дата обращения 10.12.2019).
- Проволока сварочная ESAB CB-08Г2С // Компания НТД: официальный сайт. 2019. Режим доступа: <https://www.ventsvr.ru/catalog/esab-sv-08g2s.html?pid=17200> (дата обращения 10.12.2019).
- Проволока нержавеющая Св-06Х19Н9Т // Компания «РЭП»: официальный сайт. 2019. Режим доступа: <http://sarsvarka.ru/content/provoloka-nerzhaveyushchaya-sv-06kh19n9t> (дата обращения 10.12.2019).
- Характеристики сварочной проволоки Св-06Х19Н9Т. Текст: электронный // ООО Терминал. Цветные металлы, нержавеющие, конструкционные, инструментальные, легированные и качественные стали, прокат: официальный сайт. 2019. Режим доступа: <http://www.xn--18-qmc.xn--plai/page124.html> (дата обращения 10.12.2019).

Поступила в редакцию 2 января 2020 г.

После доработки 11 июня 2020 г.

Принята к публикации 6 июня 2020 г.

APPLICATION OF ELECTRIC ARC SURFACING IN MANUFACTURE OF THREE-DIMENSIONAL STEEL OBJECTS

S.S. Zhatkin¹, K.V. Nikitin¹, V.B. Deev², S.S. Pankratov¹,
D.A. Dunaev¹

¹ Samara State Technical University, Samara, Russia

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

Abstract. The article presents the results of research on the influence of modes of the volume electric arc surfacing on the geometric accuracy of objects of the "cube" type made of 09G2S and 06Kh19N9T steel fillers. It was found, that when surfacing the samples made of 09G2S steel, the actual dimensions in length and width, generally exceed, and in height are smaller than the specified dimensions of the model. It may be due to melt spreading on the substrate during formation of the first layers. The optimal surfacing mode for objects of the "cube" type made of 09G2S steel was defined. When surfacing the samples of 06Kh19N9T steel, spreading does not occur, but all the actual dimensions are smaller in relation to the specified. It might be due to the influence of shrinkage processes occurring in the surfaced layers during their solidification. The most optimal mode for the samples made of 06Kh19N9T steel is the mode in which the size reduction in length and width was no more than 2.5 %, and in height – 13.5 %. Studies on the influence of welding arc voltage and the grade of filler material on width of the surfaced track confirmed the tendency of 09G2S steel to spread over the substrate in the entire studied voltage range (11 – 19 V). The structure of the surfaced samples was investigated. Mechanical tests on the tensile strength of the surfaced samples at room temperature have shown that they have an acceptable set of mechanical properties that exceed the reference values.

Keywords: additive technologies, electric arc surfacing, filler materials, structure, mechanical properties.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-443-450

REFERENCES

- Huang S., Liu P., Mokasdar A., Hou L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013, vol. 67, no. 5-6, pp. 1191–1203.
- Petrovic V., Gonzales J., Ferrando O., Gordillo J., Puchades J., Grinan L. Additive layered manufacturing: Sectors of industrial applications shown through case studies. *Int. Journal of Production Research*. 2011, vol. 49, no. 4, pp. 1061–1079.
- Sharon L.N. Ford. Additive Manufacturing Technology: Potential Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness. *Journal of Int. Commerce and Economics*. September 2014. Available at URL: https://usitc.gov/publications/332/journals/vol_vi_article4_additive_manufacturing_technology.pdf (Accessed 06.06.2020).
- Gebhardt A., Hötter J.-S. *Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. Munich Hanser: Carl GmbH & Co., 2016, 611 p.
- Liu P., Huang S., Mokasdar A., Zhou H., Hou L. The impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain: Supply chain operation reference (SCOR) model based analysis. *Production Planning and Control*. 2014, vol. 25, no. 13–14, pp. 1169–1181.
- Gebhardt A. *Rapid Prototyping*. Hanser: Carl GmbH & Co., 2003, 379 p.
- Kruth J.-P., Mercelis P., Van Vaerenbergh J., Froyen L., Rombouts M. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototype Journal*. 2005, vol. 11, no. 1, pp. 26–36.
- Zhukov V.V., Grigorenko G.M., Shapovalov V.A. Additive manufacturing of metal products (review). *The Paton Welding Journal*. 2016, no. 5-6, pp. 137–142.
- Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. 2016, vol. 117, pp. 371–392.
- DeRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018, vol. 92, pp. 112–224.
- Knezović N., Topić A. Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) – a new advance in manufacturing. In: *New Technologies, Development and Application*. Karabegović I. ed. 2018, vol. 42, pp. 65–71.
- Williams S.W., Martina F., Addison A.C., Ding J., Parda G., Colegrove P. Wire + Arc Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology*. 2016, vol. 32, no. 7, pp. 641–647.
- Ding D., Pan Z., Stephen van Duin, Li H., Shen C. Fabricating Superior NiAl bronze components through Wire Arc Additive Manufacturing. *Materials*. 2016, vol. 9, no. 652, pp. 1–12.
- Nagamatsua H., Sasahara H., Mitsutake Y., Hamamoto T. Development of a cooperative system for wire and arc additive manufacturing and machining. *Additive Manufacturing*. 2020, vol. 31, article 100896.
- Chen X., Su C., Wang Y., Siddiquee A.N., Konovalov S., Jayalakshmi S., Singh R.A. Cold Metal Transfer (CMT) based Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) System. *Journal of Surface Investigation*. 2018, vol. 12, no. 6, pp. 1278–1284.
- Wang X., Fan D., Huang J., Huang Y. Numerical simulation of arc plasma and weld pool in double electrodes tungsten inert gas welding. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015, vol. 85, pp. 924–934.
- Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, vol. 81, no. 1-4, pp. 465–481.
- Baufeld B., Van der Biest O., Gault R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties. *Materials & Design*. 2010, vol. 31, pp. 106–111.
- Wang F., Williams S., Colegrove P., Antonysamy A.A. Microstructure and mechanical properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012, vol. 44, no. 2, pp. 968–977.
- Clark D., Bache M.R., Whittaker M.T. Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008, vol. 203, no. 1-3, pp. 439–448.
- Panchenko O.V., Zhabrev L.A., Kurushkin D.V., Popovich A.A. Macrostructure and mechanical properties of Al – Si, Al – Mg – Si, and Al – Mg – Mn aluminum alloys produced by electric arc additive growth. *Metal Science and Heat Treatment*. 2019, vol. 60, no. 11-12, pp. 749–754.
- Korzyk V.N., Khaskin V.Yu., Grinyuk A.A., Babich A.A., Sutkovo A.D., Olyinychenko T.V. The study of the technological characteristics of hybrid plasma arc welding of aluminum alloys. *Sciences of Europe*. 2016, no. 6, pp. 45–51.
- Peleshenko S., Korzyk V., Voitenko O., Khaskin V., Tkachuk V. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017, vol. 87, no. 3/1, pp. 42–52.

24. Konovalov S.V., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Y.F., Kapralov E.V., Semin A.P. Formation features of structure-phase states of Cr–Nb–C–V containing coatings on martensitic steel. *Journal of Surface Investigation*. 2016, vol. 10, no. 5, pp. 1119–1124.
25. Michel F., Lockett H., Ding J., Martina F., Marinelli G., Williams S. A modular path planning solution for Wire + Arc Additive Manufacturing. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. 2019, no. 60, pp. 1–11.
26. Sv-08G2S Omednennaya svarochnaya provoloka ESAB. *Proizvodstvo svarochnoi provoloki: ofitsial'nyi sait* [SV-08G2 Scopper-plated welding wire ESAB. Welding wire production: official website]. 2019. Available at URL: http://akar.pro/images/docs/listovka_sv-08g2s.pdf (Accessed 10.12.2019).
27. Provoloka svarochnaya ESAB SV-08G2S. *Kompaniya NTD: ofitsial'nyi sait* [Welding wire ESAB SV-08G2S. NTD Company: Official website]. 2019. Available at URL: <https://www.ventsvar.ru/catalog/esab-sv-08g2s.html?pid=17200> (Accessed 10.12.2019).
28. Provoloka nerzhavayushchaya Sv-06Kh19N9T. *Kompaniya "REP": ofitsial'nyi sait* [Stainless wire SV-06H19N9T. REP Company: Official website]. 2019. Available at URL: <http://sarsvarka.ru/content/provoloka-nerzhavayushchaya-sv-06kh19n9t> (Accessed 10.12.2019).
29. *Kharakteristiki svarochnoi provoloki Sv-06Kh19N9T. OOO Terminal. Tsvetnye metally, nerzhavayushchie, konstruktsionnye, instrumental'nye, legirovannye i kachestvennye stali, prokat: ofitsial'nyi sait* [Characteristics of welding wire SV-06H19N9T.

LLC Terminal. Non-ferrous metals, stainless, structural, tool, alloy and high-quality steel, rolled products: official website]. 2019. Available at URL: <http://www.xn--18-qmc.xn--p1ai/page124.html> (Accessed 10.12.2019).

Funding. The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the design part of state assignment No. 07782020-0005.

Information about the authors:

S.S. Zhatkin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Foundry and Enabling Technologies"

K.V. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Dean of the Faculty of Mechanical Engineering, Metallurgy and Transport

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

S.S. Pankratov, MA Student of the Chair "Foundry and Enabling Technologies"

D.A. Dunaev, MA Student of the Chair "Foundry and Enabling Technologies"

Received January 2, 2020

Revised June 11, 2020

Accepted June 6, 2020

УДК 621.928.9

К ВОПРОСУ ОБ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗООЧИСТКИ И ЗОЛОУЛАВЛИВАНИЯ В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ РФ

*Горбатюк С.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Инжиниринг
технологического оборудования» (sgor02@mail.ru)*

*Макаров П.С., аспирант кафедры «Инжиниринг технологического
оборудования» (pavel13-rus@ya.ru)*

*Сухорукова М.А., инженер Горного института
НИТУ «МИСиС» (marinasuhruk242822@yandex.ru)*

**Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)**

Аннотация. Проблема снижения выбросов диоксида серы с дымовыми газами угольных тепловых электростанций (ТЭС) является для отечественной энергетики весьма актуальной в связи с ежегодным ростом объемов добычи угля. В настоящей работе проведен анализ статистических данных в области добычи угля, описано текущее состояние в области газоочистки и золоулавливания в горно-металлургической отрасли РФ. Для регулирования выбросов загрязняющих веществ стационарными источниками в России ввели систему предельно допустимых и временно согласованных выбросов (ПДВ и ВСВ). Страна принимает участие в международных программах, направленных на защиту окружающей среды от вредного воздействия человеческой деятельности. Несмотря на общую динамику снижения уровня загрязнения воздуха на территории РФ, выбросы предприятий горно-металлургической отрасли лишь увеличиваются. Это связано с недостатками технического состояния и эксплуатации пылегазоочистного оборудования на предприятиях электроэнергетики. Основными из них являются моральный и физический износ парка оборудования, необходимость реконструкции и модернизации устройств. Средняя степень очистки дымовых газов от золы на российских ТЭС составляет 95,5 %, что заметно меньше, чем за рубежом. Эффективность используемых газоочистных установок не соответствует современным экологическим требованиям. Дымовые газы на ТЭС от оксидов серы и азота не очищаются, практически отсутствуют приборы непрерывного контроля над выбросами ТЭС. В работе приведено обоснование перехода предприятий на наилучшие доступные технологии в области газоочистки. Использование системы кондиционирования газов позволяет на 30 – 40 % сократить объем средств, затрачиваемых на сооружение электростатических фильтров. В последние годы в связи с появлением новых технологий сжигания угля создаются фильтры для очистки горячих газов, изготовленные из керамических материалов. Проведен анализ состояния газоочистки и золоулавливания в горно-металлургической отрасли РФ. Изучена степень воздействия предприятий горно-металлургической отрасли на атмосферу. Осуществлена оценка текущего состояния газоочистного оборудования на предприятиях. Приведено обоснование перехода предприятий на наилучшие доступные технологии в области газоочистки.

Ключевые слова: газоочистка, золоулавливание, экологическая эффективность, предельно допустимая концентрация (ПДК), предельно допустимый выброс (ПДВ), индекс загрязнения атмосферы (ИЗА), электростатические фильтры, рукавные фильтры, мокрое пылеулавливание.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-451-457

ВВЕДЕНИЕ

Многие технологические процессы в горно-металлургической отрасли [1 – 15], а также складирование, хранение органического топлива, его подготовка и сжигание в котельных и на тепловых электростанциях (ТЭС) сопровождаются выбросами в воздушную среду вредных веществ, в составе которых, наряду с газовыми соединениями, содержится пыль [16 – 22].

Пыль негативно влияет на здоровье человека. Существуют три пути ее проникновения в наш организм: через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт и кожу. Твердые зольные частицы содержат в своем составе соединения тяжелых металлов и конденсированные ароматические органические системы. Указанные элементы обладают канцерогенными свойствами. Они

замедляют рост и вызывают гибель растений, приводят к увеличению числа заболеваний органов дыхания у людей и животных.

Масштабы загрязнения окружающей среды выбросами золы твердого топлива значительны. В отличие от газовых компонентов, которые в процессе диффузии распространяются как на нижние, так и на верхние слои атмосферы, вследствие чего их концентрация в приземном слое значительно снижается, зольные частицы в основном оседают на землю. Выбросы предприятий энергетической отрасли с каждым годом лишь увеличиваются, вследствие чего необходимо обратить внимание на состояние пылегазоочистных сооружений предприятий электроэнергетики. Эта проблема актуальна как для нашей страны, так и за рубежом [23 – 41].

АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЕ ГАЗООЧИСТКИ И ЗОЛОУЛАВЛИВАНИЯ

На территории РФ можно выделить несколько крупных месторождений энергетического угля, таких как Кузнецкий, Экибастузский, Канско-Ачинский и Интинский (Воркутинский) бассейны, а также ряд местных месторождений. В России угольные тепловые электростанции по состоянию на 2005 г. потребляли около 30 % всего сожженного условного топлива. С намеченной сменой курса топливного баланса в энергетической отрасли, согласно Концепции долгосрочного социально-экономического развития РФ до 2020 г. (КДР) и подготовленной по заказу российского правительства в 2011 г. стратегии развития до 2020 г. (даже по умеренному сценарию), было предусмотрено увеличение добычи угля до 375 млн т в 2020 г. [42 – 44]. Фактически, по данным Министерства энергетики РФ, в 2019 г. добыча угля достигла 440,65 млн т, что привело к увеличению выбросов диоксида серы. По данным экспертов [45], в 2018 г. в этом антирейтинге на первом месте Индия с годовым объемом выброса в 4586 килотонн. Далее идет Россия – 3683 килотонны, что совпадает с данными Минприроды РФ. Поэтому проблема снижения выбросов диоксида серы с дымовыми газами угольных ТЭС является для отечественной энергетики весьма актуальной.

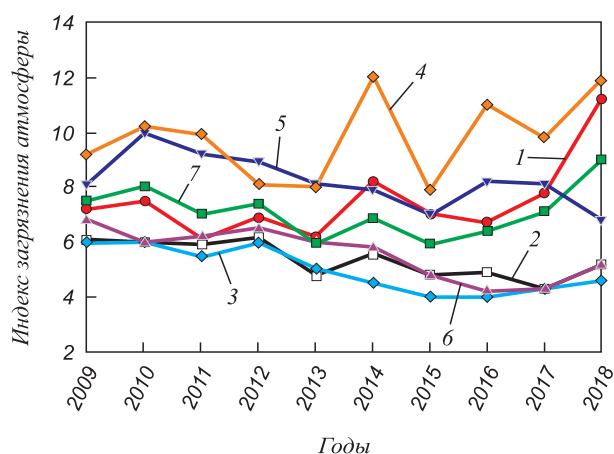
Лучше всего масштабы выбросов на ТЭС отражает ее материальный баланс. Для составления баланса задается мощность ТЭС, равная 2400 МВт, а в качестве сырья используют донецкий антрацитовый штыб. Для

данной ТЭС при сжигании 1060 т угля за час, из топок котлов извлекается 34,5 т шлака, а из бункеров газоочистных установок эффективностью 99 % удаляется 193,5 т золы. Данные отходы сливаются в золоотвалы станций, которые в свою очередь занимают огромные территории и делают непригодным дальнейшее их использование. Однако за час выбрасывается 8 млн. м³ дымовых газов, вместе с которыми также уносятся 2350 т углекислого газа, 251 т водяных паров, 34 т сернистого ангидрида, 9,3 т оксидов азота, 2 т летучей золы при эффективности золоуловителей 99 %.

В начале 1970-х годов Россия начала принимать активное участие в различных международных программах, направленных на защиту окружающей среды от вредного воздействия человеческой деятельности. Например, с 1977 г. страна вошла в состав совместной программы по наблюдению и оценке распространения загрязняющих воздух веществ на большие расстояния в Европе. Европейской комиссией определены исходные требования к экологически чистой ТЭС ($a = 1,4$ в нормальных условиях)*:

Золы не более, г/м ³	0,05
Оксидов серы, г/м ³	0,2 – 0,3
Оксидов азота, г/м ³	0,15 – 0,20
Неочищенных жидких стоков, %	0
Доля твердых отходов, используемых в народном хозяйстве, %	80

* a – показатель избытка кислорода



Изменения индекса загрязнения атмосферы (ИЗА) за 10 лет в группах городов с крупными предприятиями различных отраслей промышленности:

1 – энергетика; 2 – цветная металлургия; 3 – нефтехимическая;
4 – алюминиевая; 5 – черная металлургия; 6 – нефтеперерабатывающая; 7 – химическая

Changes in the atmospheric pollution index (IZA) over 10 years in city groups with large enterprises of various industries:

1 – energetics; 2 – non-ferrous metallurgy; 3 – petrochemical;
4 – aluminum; 5 – ferrous metallurgy; 6 – oil refining;
7 – chemical

Для регулирования выбросов загрязняющих веществ стационарными источниками в России ввели систему предельно допустимых и временно согласованных выбросов (ПДВ и ВСВ) (ГОСТ 17.2.02-78), контролируруемую местными природоохранными органами. Если количество выбросов ниже ПДВ, то загрязнение воздуха сверх предельно допустимых концентраций (ПДК) отсутствует. При превышении ПДВ до установленного уровня ВСВ, предприятию позволяют выбросы, загрязняющие атмосферу сверх ПДК. Также в каждом регионе установлены свои определенные размеры штрафов для предприятий при выбросах в интервалах от 0 до ПДВ и от 0 до ВСВ. На сегодняшний день нормативными правовыми актами не регламентирован порядок установления нормативов ПДВ [46].

Однако нормативы ПДВ и ПДК и штрафы за их нарушение для стран с высокоразвитой промышленностью все еще значительно строже, чем на территории РФ. Отсюда следует нежелание предприятий обратить внимание на экологическую ситуацию на своей территории, так как платить штрафы дешевле, чем обновить пылегазоочистное оборудование, что несет за собой последствия для экологической обстановки на территории РФ.

В 2009 – 2018 гг. [47] (см. рисунок), уровень загрязнения воздуха в городах с предприятиями горно-метал-

лургической отрасли повысился более чем на 17 %, а за последние пять лет и вовсе на 33 – 34 %.

Несмотря на общую динамику снижения уровня загрязнения воздуха на территории РФ, выбросы предприятий горно-металлургической отрасли лишь увеличиваются. Ввиду вышеизложенного, необходимо обратить пристальное внимание на состояние пылегазоочистных сооружений предприятий электроэнергетики.

Основные показатели и недостатки технического состояния и эксплуатации пылегазоочистного оборудования на предприятиях:

- моральный и физический износ парка оборудования – более 80 %;
- необходимость реконструкции и модернизации пылегазоочистного оборудования для достижения степени снижения выбросов зольных частиц (электрофильтров – 99,8 %, рукавных фильтров – 99,9 %) и обеспечения очистки выбросов ТЭС от летучих соединений, в том числе от оксидов серы (сероочистка, т. е. десульфуризация дымовых газов), оксидов азота (азотоочистка, т. е. денитрификация газов);
- низкий уровень автоматизации и технологического контроля как пылегазоочистных установок, так и основного технологического оборудования;
- отсутствие технологических регламентов работы установок или их несоблюдение;
- недостаточный уровень подготовки эксплуатационного персонала;
- несоблюдение условий эксплуатации пылегазоочистного оборудования;
- несвоевременное и некачественное проведение ремонтных работ не специализированными организациями;
- отсутствие специализированных сервисных служб.

Очистку дымовых газов от твердых зольных частиц проводят на ТЭС с 30-х годов прошлого века. Сегодня системы золоулавливания являются обязательным оборудованием пылеугольных и мазутных котельных установок. Для очистки дымовых газов от

твердых зольных частиц используются электростатические фильтры, рукавные фильтры тканевые, «мокрые» золоуловители на основе скрубберов Вентури. Наиболее глубокой степени очистки удастся достичь при комбинировании электростатического фильтра с рукавным фильтром или с кольцевым эмульгатором (см. таблицу).

До настоящего времени в составе газоочистных установок угольных ТЭЦ и котельных РФ широко используются аппараты инерционной очистки и мокрого пылеулавливания – циклоны и аппараты мокрого пылеулавливания, среди которых наиболее эффективными являются турбулентные аппараты (скрубберы) Вентури. Они обеспечивают эффективность улавливания дисперсных частиц золы до 94 – 96 %. Такая эффективность не соответствует современным экологическим требованиям. При этом дальнейшее увеличение эффективности пылеуловителей такого типа за счет изменения конструкции и режимов движения газодисперсной и жидкой фаз не приносит желаемых результатов.

По данным Большой энциклопедии нефти и газа в настоящее время средняя степень очистки дымовых газов от золы на российских ТЭС составляет 95,5 %, что заметно меньше, чем за рубежом [48]. Дымовые газы на наших ТЭС не очищаются от оксидов серы и азота, практически отсутствуют приборы непрерывного контроля над выбросами ТЭС.

Для повышения эффективности работы электростатического фильтра прибегают к кондиционированию дымовых газов (их обработке перед фильтром). Для снижения электрического сопротивления золы в дымовые газы либо добавляют небольшие количества SO_2 , сульфата аммония, аммиака, либо в дымовых газах конвертируют SO_2 и SO_3 (с использованием катализатора или под действием импульсного коронного разряда) [49].

По состоянию на 2017 г. в мире эксплуатировалось более 40 котельных установок общей мощностью 66 800 МВт, оборудованных системами кондициони-

Современные методы золоулавливания на тепловых электростанциях

Modern methods of ash collection in thermal power plants

Метод золоулавливания	Степень снижения выбросов зольных частиц, %	Концентрация летучей золы в дымовых газах, мг/м ³
Стандарт России	98,6 – 99,8	50 – 150
Стандарт США (на 2015 г.)	99,9	4 – 5
Электростатические фильтры	98,6 – 99,8	25 – 50
Рукавные тканевые фильтры	99,98	5 – 10
Скрубберы Вентури с интенсивным орошением	99,0 – 99,5	до 25
Кольцевые эмульгаторы	99,5 – 99,8	до 10
Электростатический фильтр + рукавный фильтр	99,9	4 – 5
Электростатический фильтр + кольцевой эмульгатор	99,9	4 – 5

рования. Использование системы кондиционирования газов позволяет на 30 – 40 % сократить объем средств, затрачиваемых на сооружение электростатических фильтров.

В последние годы в связи с появлением новых технологий сжигания угля (в циркулирующем кипящем слое – ЦКС) создаются фильтры для очистки горячих газов. Эти новые фильтры изготавливают из керамических материалов, выдерживающих агрессивные среды и высокие температуры (выше 900 °С). Такие фильтры (из пенной керамики с добавками соединений кремния) способны автоматически очищаться в процессе эксплуатации, так как задержанные сажевые частицы сгорают на поверхности фильтра. Разработаны керамические фильтры двух модификаций:

– первая представляет собой систему «обращенных» свечей, где фильтрация осуществляется на внутренней поверхности тонкостенных трубчатых керамических элементов, заключенных в металлический кожух;

– вторая – с применением плоских керамических пластин.

Керамические фильтры устанавливаются либо непосредственно на выходе горячих газов из котла с ЦКС (в газоходе под давлением), либо после циклона при включении байпасом к циклонной системе. Основными разработчиками керамических фильтров являются фирмы Германии и Японии.

Выводы

В данной работе определена степень воздействия предприятий горно-металлургической отрасли на атмосферу, проведена оценка текущего состояния газоочистного оборудования на предприятиях и приведено обоснование перехода предприятий на наилучшие доступные технологии в области газоочистки.

Несмотря на то, что выбросы предприятий горно-металлургической отрасли вносят огромный вклад в ухудшение экологической обстановки на территории РФ, многие предприятия находят экономически нецелесообразным замену существующих газоочистных установок на новые. В высокоразвитых промышленных странах (США, Япония, Германия и т. д.) [50], в отличие от РФ, все вновь строящиеся предприятия оснащаются установками сероочистки еще до ввода в эксплуатацию. Также ведутся постоянные работы по модернизации существующих методов и аппаратов газоочистки.

В РФ проводят лишь первичные мероприятия по снижению вредных выбросов, которые не способны дать прорывного эффекта в области газоочистки, поэтому необходимо обратить пристальное внимание на состояние газоочистного оборудования на промышленных агрегатах и принять меры, стимулирующие руководство предприятий к переходу на наилучшие доступные технологии в области газоочистки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A. Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method // EUREKA: Physics and Engineering. 2019. No. 2. P. 52 – 60.
2. Dragobetskii V., Zagirnyak M., Naumova O. etc. Method of determination of technological durability of plastically deformed sheet parts of vehicles // International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. Vol. 7. No. 4. P. 92 – 99.
3. Горбатюк С.М., Морозова И.Г., Наумова М.Г. Формирование цветной маркировки поверхности металла с помощью высококонцентрированного источника энергии // Металлург. 2016. № 6. С. 91 – 94.
4. Глухов Л.М., Горбатюк С.М., Морозова И.Г., Наумова М.Г. Эффективные лазерные технологии производства металлопродукции и инструмента // Металлург. 2016. № 3. С. 306 – 312.
5. Naumova M.G., Basyrov I.I., Aliev Kh.B. Reengineering of the ore preparation production process in the context of «Almalyk MMC» JSC // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 224. Article 01030.
6. Наумова М.Г., Морозова И.Г., Зарапин А.Ю., Борисов П.В. Создание маркировки медного сплава по изменению топологии его поверхности под воздействием лазерной термической обработки // Металлург. 2018. № 5. С. 464 – 469.
7. Kryukov I. Y., Gorbatyuk S.M., Naumova M. Mathematical model of the crystallizing blank's thermal state at the horizontal continuous casting machine // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 129. Article 02010.
8. Busygin A.M. The force analysis of the caterpillar excavator stick arrangement mechanism with three degrees of freedom // Mining Information and Analytical Bulletin. 2018. No. 1. P. 133 – 142.
9. Горбатюк С.М., Морозова И.Г., Наумова М.Г. Разработка рабочей модели процесса реиндустриализации производства термической обработки штамповых сталей // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 5. С. 410 – 415.
10. Naumova M.G., Morozova I.G., Borisov P.V. Investigating the features of color laser marking process of galvanic chrome plating in order to create a controlled color image formation at given marking // Materials Today: Proceedings 2019. Vol. 19. P. 2405 – 2408.
11. Efremov D.B., Gerasimova A.A., Gorbatyuk S.M., Chichenev N.A. Study of kinematics of elastic-plastic deformation for hollow steel shapes used in energy absorption devices // CIS Iron and Steel Review. 2019. Vol. 18. P. 30 – 34.
12. Naumova M.G., Morozova I.G., Borisov P.V. Study of metal surface with color image obtained with laser marking // Solid State Phenomena. 2020. Vol. 299. P. 943 – 948.
13. Solomonov K., Tishchuk L., Fedorin N. Simulation of forming a flat forging // Journal of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 918. Article 012038.
14. Тишук Л.И., Соломонов К.Н. Влияние трения на формоизменение плоской заготовки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 3. С. 251 – 253.
15. Solomonov K., Tishchuk L. Virtual and physical simulation forming of flat workpieces under upsetting // Procedia Manufacturing. 2019. No. 37. P. 467 – 471.
16. Solomonov K.N., Tishchuk L.I. Simulation of deformation processes in upsetting // Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1348. Article 012020.
17. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Литвинова Н.Н. Исследование усилия протягивания оцинкованных полос на правильной машине агрегата непрерывного горячего цинкования // Металлург. 2014. № 5. С. 79 – 82.
18. Шаталов Р.Л., Генкин А.Л. Управление листопрокатным технологическим комплексом, обеспечивающее минимизацию энергозатрат // Металлург. 2008. № 9. С. 485 – 490.
19. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A. Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method // EUREKA: Physics and Engineering. 2019. No. 2. P. 52 – 60.

20. Чиченев Н.А. Импортотамещающий реинжиниринг привода роликов в промежуточном рольганге машины непрерывного литья заготовок // *Металлург*. 2015. № 9 – 10. С. 892 – 895.
21. Gorbatyuk S., Pashkov A., Chichenov N. Improved copper-molybdenum composite material production technology // *Materials Today: Proceedings*. 2019. No. 11. P. 31 – 35.
22. Николаев В.А., Русаков А.Д., Чиченев Н.А. Прогнозирование твердости валков многовалковых станов // *Сталь*. 1996. № 9. С. 58 – 60.
23. Maheshwaran M.V., Hyness N.R.J., Sentharamaikkannan P. etc. Characterization of natural cellulosic fiber from *Epipremnum aureum* stem // *Journal of Natural Fibers*. 2018. Vol. 15. No. 6. P. 789 – 798.
24. Manimaran P., Sanjay M.R., Sentharamaikkannan P. etc. A new study on characterization of *Pithecellobium dulce* fiber as composite reinforcement for light-weight applications // *Journal of Natural Fibers*. 2020. Vol. 17. No. 3. P. 359 – 370.
25. Fathy A., Le Pivert M., Kim Y.J. etc. Continuous monitoring of air purification: A study on volatile organic compounds in a gas cell // *Sensors (Switzerland)*. 2020. Vol. 20. No. 3. Article 934.
26. Chou C.-T., Hsu T.-F., Shen C.-Y. etc. Experimental study of high purity CO₂ concentration from syngas by a dual-bed six-step pressure swing adsorption process // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 330. No. 3. Article 032031.
27. Jacobs J.H., Wynnyk K.G., Lalani R. etc. Removal of sulfur compounds from industrial emission using activated carbon derived from petroleum coke // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2019. Vol. 58. No. 40. P. 18896 – 18900.
28. Huang Y., Su W., Wang R., Zhao T. Removal of typical industrial gaseous pollutants: From carbon, zeolite, and metal-organic frameworks to molecularly imprinted adsorbents // *Aerosol and Air Quality Research*. 2019. Vol. 19. No. 9. P. 2130 – 2150.
29. Liu J., Zhu F., Ma X. Industrial application of a deep purification technology for flue gas involving phase-transition agglomeration and dehumidification // *Engineering*. 2018. Vol. 4. No. 3. P. 416 – 420.
30. Kurella S., Bhukya P.K., Meikap B.C. Removal of H₂S pollutant from gasifier syngas by a multistage dual-flow sieve plate column wet scrubber // *Journal of Environmental Science and Health – Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 52. No. 6. P. 515 – 523.
31. Chatlynne C.J., Mobley J.D., Stern R.D. Flue gas cleaning: Flue gas desulfurization (regenerable), NO_x, and SO_x/NO_x // *Thin Solid Films*. 2017. 13 p.
32. Gehri D.C., Dustin D.F., Katz B. Flue gas desulfurization and particulate control with the aqueous carbonate process // *Thin Solid Films*. 2017. 12 p.
33. Ma T., Huang Y., Deng S. etc. The relationship between selenium retention and fine particles removal during coal combustion // *Fuel*. 2020. Vol. 265. Article 116859.
34. Sobczyk A.T., Jaworek A., Marchewicz A. etc. Electrostatic agglomeration of fly ash particles for hybrid gas cleaning devices // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1322. No. 1. Article 012012.
35. Guan L., Yuan Z., Gu Z. etc. Numerical simulation of ash particle deposition characteristics on the granular surface of a randomly packed granular filter // *Powder Technology*. 2017. Vol. 314. P. 78 – 88.
36. Shi Y., Wang X., Chu D. etc. An experimental study of ash accumulation in flue gas // *Advanced Powder Technology*. 2016. Vol. 27. No. 4. P. 1473 – 1480.
37. Dobrzycki P., Ivannikov A.L., Rybak J. etc. The impact of Rapid Impulse Compaction (RIC) of large non-cohesive material deposits on the surrounding area // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 362. No.1. Article 012132.
38. Ivannikov A.L., Kongar-Syuryun C., Rybak J., Tyulyaeva Y. The reuse of mining and construction waste for backfill as one of the sustainable activities // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 362. No. 1. Article 012130.
39. Batugin A., Myaskov A., Ignatov Y. etc. Re-using of data on rockbursts for up-to-date research of the geodynamic safety problem // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 221. No. 1. Article 012089.
40. Gupta K., Jain N.K., Laubscher R.F. Spark erosion machining of miniature gears: A critical review // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 80. No. 9 – 12. P. 1863 – 1877.
41. Трубецкой К.Н., Мясков А.В., Галченко Ю.П., Еременко В.А. Обоснование и создание конвергентных горных технологий подземной разработки мощных месторождений твердых полезных ископаемых // *Горный журнал*. 2019. № 5. С. 6 – 13.
42. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года. URL: <http://government.ru/info/6217/> (дата обращения 25.03.2020).
43. Писаренко М.В., Шаклеин С.В. Производство и потребление угля в мире и России // *Горная промышленность*. 2015. № 2 (120). С. 24 – 27.
44. Угольная отрасль России. URL: <https://wtcmoscow.ru/services/international-partnership/analytcs/ugolnaya-otrasl-rossii> (дата обращения 25.03.2020).
45. Greenpeace составил антирейтинг стран по выбросам диоксида серы. URL: <https://www.mk.ru/social/2019/08/19/greenpeace-sostavil-antireyting-stran-po-vybrosam-dioksida-sery.html> (дата обращения 25.03.2020).
46. Колчина Е.Н. Нормативы выбросов в атмосферный воздух, процедура нормирования и разрешение на выбросы // *Справочник эколога*. 2013. № 3. С. 54 – 59.
47. Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2018 г. – Санкт-Петербург, 2019. – 250 с.
48. Большая энциклопедия нефти и газа. URL: <http://ngpedia.ru/id481488p1.html>. (дата обращения 25.03.2020).
49. МУ 34-70-019-82. Методические указания по интенсификации золоулавливания в электрофильтрах и порядку планирования и организации работ по их реконструкции. 1982.
50. Экология. Справочник. URL: <https://ru-ecology.info/term/2702/> (дата обращения 25.03.2020).

Поступила в редакцию 27 марта 2020 г.

После доработки 27 марта 2020 г.

Принята к публикации 2 июня 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 6, pp. 451–457.

ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF GAS PURIFICATION AND ASH COLLECTION IN RUSSIAN MINING AND METALLURGICAL INDUSTRY

S.M. Gorbatyuk, P.S. Makarov, M.A. Sukhorukova

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),
Moscow, Russia

Abstract. The problem of reducing emissions of sulfur dioxide from the flue gases of coal-fired TPPs is highly relevant for domestic energy

in connection with the annual increase in coal production. This article analyzes statistical data in the field of coal mining, describes the current state in the field of gas purification and ash collection in the mining and metallurgical industry of the Russian Federation. To regulate pollutant emissions by stationary sources in Russia, a system of maximum permissible and temporarily agreed emissions (MPE and ENV) was introduced. The country takes part in international programs

aimed at protecting the environment from the harmful effects of human activity. Despite the general dynamics of reducing air pollution in the Russian Federation, emissions from mining and metallurgical enterprises only increase. This is due to deficiencies in the technical condition and operation of dust and gas cleaning equipment at electric power enterprises. The main ones are the moral and physical deterioration of the equipment fleet, the need for reconstruction and modernization of devices. The average degree of flue gas cleaning from ash at Russian TPPs is 95.5 %, which is noticeably less than abroad. Efficiency of the gas treatment plants used does not meet modern environmental requirements. The flue gases at our TPPs are not cleaned from sulfur and nitrogen oxides; there are practically no devices for continuous monitoring of TPP emissions. The article provides the rationale for the transition of enterprises to the best available technologies (BAT) in the field of gas purification. The use of a gas conditioning system allows 30 – 40 % reduction in the amount of funds spent on the construction of electrostatic filters. In recent years, in connection with the advent of new technologies for burning coal, filters for the purification of hot gases made of ceramic materials have been created. We have analyzed the state of gas purification and ash collection in the mining and metallurgical industry of the Russian Federation and its impact on the atmosphere. An assessment of the current state of gas purification equipment at the enterprises was carried out.

Keywords: gas purification, ash collection, environmental efficiency, maximum permissible concentration (MPC), maximum permissible emission (MPE), IZA index, electrostatic filters, bag filters, wet dust collection.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-451-457

REFERENCES

1. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A. Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019, no. 2, pp. 52–60.
2. Dragobetskii V., Zagirnyak M., Naumova O., Shlyk S., Shapoval A. Method of determination of technological durability of plastically deformed sheet parts of vehicles. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018, vol. 7, no. 4, pp. 92–99.
3. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Color mark formation on a metal surface by a highly concentrated energy source. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 5-6, pp. 646–650.
4. Glukhov L.M., Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Effective laser technology for making metal products and tools. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 3-4, pp. 306–312.
5. Naumova M.G., Basyrov I.I., Aliev Kh.B. Reengineering of the ore preparation production process in the context of “Almalyk MMC” JSC. *MATEC Web of Conferences*. 2018, 224, article 01030.
6. Naumova M.G., Morozova I.G., Zarapin A.Y., Borisov P.V. Copper alloy marking by altering its surface topology using laser heat treatment. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 5-6, pp. 464–469.
7. Kryukov I.Y., Gorbatyuk S.M., Naumova M.G. Mathematical model of the crystallizing blank’s thermal state at the horizontal continuous casting machine. *MATEC Web of Conferences*. 2017, vol. 129, article 02010.
8. Busygin A.M. The force analysis of the caterpillar excavator stick arrangement mechanism with three degrees of freedom. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2018, no. 1, pp. 133–142.
9. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Development of the working model of production reindustrialization of die steel heat treatment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 5, pp. 410–415. (In Russ.).
10. Naumova M.G., Morozova I.G., Borisov P.V. Investigating the features of color laser marking process of galvanic chrome plating in order to create a controlled color image formation at given marking. *Materials Today: Proceedings*. 2019, vol. 19, pp. 2405–2408.
11. Efremov D.B., Gerasimova A.A., Gorbatyuk S.M., Chicheney N.A. Study of kinematics of elastic-plastic deformation for hollow steel shapes used in energy absorption devices. *CIS Iron and Steel Review*. 2019, vol. 18 pp. 30–34.
12. Naumova M.G., Morozova I.G., Borisov P.V. Study of metal surface with color image obtained with laser marking. *Solid State Phenomena*. 2020, vol. 299, pp. 943–948.
13. Solomonov K., Tishchuk L., Fedorin N. Simulation of forming a flat forging. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2017, vol. 918, article 012038.
14. Tishchuk L.I., Solomonov K.N. Influence of friction on shaping of a flat blank. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 3, pp. 251–253. (In Russ.).
15. Solomonov K., Tishchuk L. Virtual and physical simulation forming of flat workpieces under upsetting. *Procedia Manufacturing*. 2019, no. 37, pp. 467–471.
16. Solomonov K.N., Tishchuk L.I. Simulation of deformation processes in upsetting. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019, vol. 1348, article 012020.
17. Maksimov E.A., Shatalov R.L., Litvinova N.N. Study of the tractive forces applied to galvanized strip on a straightening machine in a continuous hot-galvanizing unit. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 5-6, pp. 415–420.
18. Shatalov R.L., Genkin A.L. Operating a sheet-rolling complex to minimize energy costs. *Metallurgist*. 2008, vol. 52, no. 9-10, pp. 485–490.
19. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A. Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019, no. 2, pp. 52–60.
20. Chicheney N.A. Import-replacing re-engineering of the drive of the rollers in the intermediate roller table of a continuous bloom caster. *Metallurgist*. 2015, vol. 58, no. 9-10, pp. 892–895.
21. Gorbatyuk S., Pashkov A., Chicheney N. Improved copper-molybdenum composite material production technology. *Materials Today: Proceedings*. 2019, vol. 11, pp. 31–35.
22. Nikolaev V.A., Rusakov A.D., Chicheney N.A. Forecasting a multi-roll mills rolls hardness. *Stal’*. 1996, no. 9, pp. 58–60.
23. Maheshwaran M.V., Hyness N.R.J., Senthamaraiannan P., Saravanakumar S.S., Sanjay M.R. Characterization of natural cellulosic fiber from *Epipremnum aureum* stem. *Journal of Natural Fibers*. 2018, vol. 15, no. 6, pp. 789–798.
24. Manimaran P., Sanjay M.R., Senthamaraiannan P., Yogesha B., Barile C., Siengchin S. A new study on characterization of *Pithecellobium dulce* fiber as composite reinforcement for light-weight applications. *Journal of Natural Fibers*. 2020, vol. 17, no. 3, pp. 359–370.
25. Fathy A., Le Pivert M., Kim Y.J., Ba M.O., Erfan M., Sabry Y.M., Khalil D., Leprince-wang Y., Bourouina T., Gnambodoe-Capochichi M. Continuous monitoring of air purification: A study on volatile organic compounds in a gas cell. *Sensors (Switzerland)*. 2020, vol. 20, no. 3, article 934.
26. Chou C.-T., Hsu T.-F., Shen C.-Y., Lee S.-H., Yang H.-S. Experimental study of high purity CO₂ concentration from syngas by a dual-bed six-step pressure swing adsorption process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 330, no. 3, article 032031.
27. Jacobs J.H., Wynnyk K.G., Lalani R., Sui R., Wu J., Montes V., Hill J.M., Marriott R.A. Removal of sulfur compounds from industrial emission using activated carbon derived from petroleum coke. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2019, vol. 58, no. 40, pp. 18896–18900.
28. Huang Y., Su W., Wang R., Zhao T. Removal of typical industrial gaseous pollutants: From carbon, zeolite, and metal-organic frameworks to molecularly imprinted adsorbents. *Aerosol and Air Quality Research*. 2019, vol. 19, no. 9, pp. 2130–2150.
29. Liu J., Zhu F., Ma X. Industrial application of a deep purification technology for flue gas involving phase-transition agglomeration and dehumidification. *Engineering*. 2018, vol. 4, no. 3, pp. 416–420.

30. Kurella S., Bhukya P.K., Meikap B.C. Removal of H₂S pollutant from gasifier syngas by a multistage dual-flow sieve plate column wet scrubber. *Journal of Environmental Science and Health – Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. 2017, vol. 52, no. 6, pp. 515–523.
31. Chatlynne C.J., Mobley J.D., Stern R.D. Flue gas cleaning: Flue gas desulfurization (regenerable), NO_x, and SO_x/NO_x. *Thin Solid Films*, 2017, 13 p.
32. Gehri D.C., Dustin D.F., Katz B. Flue gas desulfurization and particulate control with the aqueous carbonate process. *Thin Solid Films*, 2017, 12 p.
33. Ma T., Huang Y., Deng S., Fu B., Luo G., Wang J., Hu H., Yuan C., Yao H. The relationship between selenium retention and fine particles removal during coal combustion. *Fuel*. 2020, vol. 265, article 116859.
34. Sobczyk A.T., Jaworek A., Marchewicz A., Krupa A., Czech T., Sliwiński L. Electrostatic agglomeration of fly ash particles for hybrid gas cleaning devices. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019, vol. 1322, no. 1, article 012012.
35. Guan L., Yuan Z., Gu Z., Yang L., Zhong W., Wu Y., Sun S., Gu C. Numerical simulation of ash particle deposition characteristics on the granular surface of a randomly packed granular filter. *Powder Technology*. 2017, vol. 314, pp. 78–88.
36. Shi Y., Wang X., Chu D., Sun F., Guo Z. An experimental study of ash accumulation in flue gas. *Advanced Powder Technology*. 2016, vol. 27, no. 4, pp. 1473–1480.
37. Dobrzycki P., Ivannikov A.L., Rybak J., Shkodkina V.O., Tyulyaeva Y. The impact of Rapid Impulse Compaction (RIC) of large non-cohesive material deposits on the surrounding area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 362, no. 1, article 012132.
38. Ivannikov A.L., Kongar-Syuryun C., Rybak J., Tyulyaeva Y. The reuse of mining and construction waste for backfill as one of the sustainable activities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 362, no. 1, article 012130.
39. Batugin A., Myaskov A., Ignatov Y., Khotchenkov E., Krasnoshtanov D. Re-using of data on rockbursts for up-to-date research of the geodynamic safety problem. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 221, no. 1, article 012089.
40. Gupta K., Jain N.K., Laubscher R.F. Spark erosion machining of miniature gears: A critical review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, vol. 80, no. 9–12, pp. 1863–1877.
41. Trubetskoi K.N., Myaskov A.V., Galchenko Y.P., Eremenko V.A. Creation and justification of convergent technologies for underground mining of thick solid mineral deposits. *Gornyi zhurnal*. 2019, no. 5, pp. 6–13. (In Russ.).
42. *Kontseptsiya dolgosrochnogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2020 goda* [The concept of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period until 2020]. Available at URL: <http://government.ru/info/6217/>. (Accessed 25.03.2020). (In Russ.).
43. Pisarenko M.V., Shaklein S.V. Production and consumption of coal in the world and in Russia. *Gornaya Promyshlennost'*. 2015, no. 2 (120), pp. 24–27. (In Russ.).
44. *Ugol'naya otasl' Rossii* [Russian coal industry]. Available at URL: <https://wtcmoscow.ru/services/international-partnership/analitics/ugolnaya-otrasl-rossii>. (Accessed 25.03.2020). (In Russ.).
45. *Greenpeace sostavil antireiting stran po vybrosam dioksida sery* [Greenpeace compiled an anti-rating of countries for sulfur dioxide emissions]. Available at URL: <https://www.mk.ru/social/2019/08/19/greenpeace-sostavil-antireiting-stran-po-vybrosam-dioksida-sery.html>. (Accessed 25.03.2020). (In Russ.).
46. Kolchina E.N. Air emission standards, standardization procedure and emission permit. *Spravochnik ekologiya*. 2013, no. 3, pp. 54–59. (In Russ.).
47. *Ezhegodnik sostoyaniya zagryazneniya atmosfery v gorodakh na territorii Rossii za 2018 g.* [Annual state of air pollution in Russian cities in 2018]. St. Petersburg, 2019, 250 p. (In Russ.).
48. *Bol'shaya entsiklopediya nefi i gaza* [Big encyclopedia of oil and gas]. Available at URL: <https://ngpedia.ru/id481488p1.html>. (Accessed 25.03.2020). (In Russ.).
49. *MU 34-70-019-82 Metodicheskie ukazaniya po intensivifikatsii zolulavlivaniya v elektrofiltakh i poryadku planirovaniya i organizatsii rabot po ikh rekonstruktsii* [Guidelines for the intensification of ash collection in electrostatic precipitators and the procedure for planning and organizing work on their reconstruction]. 1982. (In Russ.).
50. *Ekologiya. Spravochnik* [Ecology. Directory]. Available at URL: <https://ru-ecology.info/term/2702/>. (Accessed 25.03.2020). (In Russ.).

Information about the authors:

S.M. Gorbatyuk, Dr. Sci. (Eng.), Professor; Head of the Chair “Engineering of Technological Equipment” (sgor02@mail.ru)

P.S. Makarov, Postgraduate of the Chair “Engineering of Technological Equipment” (pavel13-rus@ya.ru)

M.A. Sukhorukova, Engineer of the Mining Institute (marinasuhruk242822@yandex.ru)

Received March 27, 2020

Revised March 27, 2020

Accepted June 2, 2020

УДК 621.039 + 519.28

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ ХРОМИСТЫХ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ

*Беломытцев М.Ю., д.т.н., профессор кафедры металловедения
и физики прочности (myubelom@yandex.ru)*

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

Аннотация. Для прогнозирования химического состава жаропрочных высокохромистых сталей с ферритно-мартенситной структурой (ХФМС) (с числом легирующих элементов до 10 и таким же числом параметров технологии получения и термической обработки) необходима математическая модель. В настоящей работе проведен поиск зависимостей предела текучести и предела прочности ХФМС от содержания легирующих элементов и температуры испытания без анализа технологических факторов ввиду их однотипности. Анализ проведен на базе совокупности экспериментальных данных, включающих в себя 63 испытания на растяжение при 20 – 720 °С образцов из 10 марок сталей. Предложены регрессионные мультипликативные зависимости, учитывающие через соответствующие сомножители в экспоненциальной и степенной форме твердорастворное и дисперсионное упрочнение, общее температурное разупрочнение стали, содержание углерода, суммарное содержание молибдена и вольфрама, упрочняющее воздействие марганца. Оценки влияния азота и кремния на прогнозные характеристики прочности показали, что сомножитель, учитывающий влияние азота, улучшает модель и является необходимым в общей формуле, а введение в модель сомножителя, учитывающего содержание кремния, модель ухудшает. Введение сомножителя от кремния в формулу может оказаться необходимым при анализе сталей с повышенным содержанием кремния (типа ЭП-823). Экспериментальный факт тесной связи пределов текучести и пределов прочности для исследуемых ХФМС сталей позволил использовать найденную для предела текучести формулу уравнения и прогноза для предела прочности, отличающуюся лишь коэффициентами при переменных. Отклонение рассчитанных модельных пределов текучести и пределов прочности от экспериментальных составляет 13 – 18 %. Приведен пример анализа поведения предела текучести сталей с экспериментальными химическими составами. Показано, что найденные зависимости для предела текучести и предела прочности являются устойчивыми по отношению к увеличению размеров матрицы экспериментальных данных: с ростом числа опытов от 94 и выше коэффициент вариации V монотонно снижается вплоть до максимального размера массива в 299 опытов.

Ключевые слова: математическое моделирование, многофакторный анализ, нелинейная регрессия, ферритно-мартенситные стали, предел текучести, предел прочности, химический состав.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-458-468

ВВЕДЕНИЕ

Для прогнозирования химического состава жаропрочной стали необходима математическая модель зависимости прочностных свойств от содержания легирующих компонентов, условий термообработки и температуры эксплуатации. Построение корректной модели, учитывающей все факторы, на основе физико-химических предпосылок затруднительно из-за многомерности этой задачи. Кроме того, априори невозможно предусмотреть кооперативное влияние легирующих элементов на служебные характеристики стали. Например, экспериментально обнаружено, что при упрочнении молибденом хромистых ферритно-мартенситных сталей (ХФМС) с 12 %-ным содержанием хрома необходимо учитывать содержание вольфрама, так как превышение оптимального суммарного содержания этих элементов может привести к ухудшению прочностных свойств [1 – 4].

Методы многофакторного статистического анализа позволяют оценить в первом приближении характер и степень влияния химических элементов на проч-

ность [5]. Так, при помощи метода главных компонент (МГК) [6] были получены линейные регрессионные уравнения, связывающие предел текучести и содержание компонентов ферритно-мартенситной стали при комнатной и высокой температуре [7].

Компьютерные эксперименты, проводимые на основе экспериментально-статистических моделей, выявляют тенденции в оптимальном перераспределении содержания легирующих элементов [8 – 12]. В частности, нейросетевое моделирование прочностных и пластических свойств ХФМС повышенной жаропрочности показало необходимость повышения содержания марганца при снижении содержания ниобия. Расчетные выводы получили экспериментальное подтверждение [13, 14], что доказывает необходимость применения компьютерных методов решения обратных задач при разработке сталей с заданными свойствами.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В представляемой работе проведен анализ данных измерения предела текучести и предела прочности но-

вых ХФМС, в результате которого разработаны нелинейные регрессионные уравнения зависимости предела текучести и предела прочности от содержания легирующих элементов и температуры испытания.

Рассмотрены характеристики прочности, получаемые при испытании на растяжение, поскольку в ряду всех показателей конструкционной прочности эти характеристики являются первыми из анализируемых.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ

Первичный массив экспериментальных данных включал 63 строки (табл. 1 – 3), каждая из которых содержит информацию о температуре испытания (t , °C), химическом составе ($C_{эл}$, % (по массе)), величине предела текучести и предела прочности ($\sigma_{0,2}$, σ_b , МПа) образцов экспериментальных сталей. В этих сталях номенклатура легирующих элементов назначалась из числа тех, которые используют в аналогичных промышленных сталях типа ЭП-450, ЭП-823, ЭП-900, ЧС-139. Мотивировка назначения уровней легирования раскрыта далее. Образцы на растяжение плоской формы с

размерами рабочей части $22 \times 3 \times 1$ мм вырезали из листа, полученного горячей прокаткой прутка сечением 16×16 мм на лист толщиной 2 мм с последующей механической шлифовкой с каждой поверхности 0,5 мм. Образцы подвергали нормализации от 1050 – 1100 °C с выдержкой 20 мин и последующему отпуску в Ag при 720 °C в течение 2 ч с итоговым охлаждением на воздухе. Испытания на растяжение проводили на воздухе при 20 – 720 °C со скоростью ~10 %/мин.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ

С 1960 по 2018 г. опубликованы данные об индивидуальном влиянии на характеристики холодной и горячей прочности и сопротивление ползучести всех элементов, используемых в качестве легирующих или представляющих интерес с этой точки зрения для ХФМС. Приводимые экспериментальные данные часто противоречивы. В качестве базовых автором использованы сведения из монографий К.А. Ланской [1, 15] и отечественных монографий того же периода [16, 17], остающихся наиболее авторитетными источниками ин-

Таблица 1

Результаты механических испытаний экспериментальных ХФМС

Table 1. Results of mechanical tests of experimental HFMS

Номер опыта	Номер стали (плавки)	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	T , °C	Номер опыта	Номер стали (плавки)	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	T , °C	Номер опыта	Номер стали (плавки)	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	T , °C
1	1	682	787,0	20	22	5	174	195,0	710	43	7	143	158,3	720
2		627	668,0	300	23		190	200,0	720	44	8	287	510,0	20
3		535	584,0	400	24		378,8	465,4	300	45		81	122,0	720
4		226	257,0	720	25		347,8	439,1	400	46		205,2	402,3	300
5	2	592	722,0	20	26		358,6	415,5	500	47		28,8	384,6	400
6		500	570,0	300	27		253,3	286,4	600	48		243,6	335,7	500
7		390	409,0	400	28		154,1	159,5	700	49		171,9	263,0	600
8		184	209,3	720	29		145,2	148,1	720	50		115,8	145,6	700
9	3	653	756,0	20	30	6	500	660,0	20	51	9	510,2	688,6	20
10		562	590,0	300	31		150	160,0	720	52		533,7	621,7	300
11		491	537,0	400	32		437,7	569,8	300	53		521,2	565,9	400
12		186	213,0	720	33		410	512,2	400	54		426,5	481,5	500
13	4	586	721,0	20	34		399,5	439,7	500	55		279,1	297,3	600
14		517	567,0	300	35		317	365,3	600	56		160	171,2	700
15		489	555,0	400	36		251,2	262,9	700	57		125	142,9	720
16		221	235,8	720	37		424,4	594,9	20	58	10	635,9	794,0	20
17	5	417	568,0	20	38	7	309,1	374,9	300	59		578,2	759,7	300
18		462	604,0	25	39		316,7	444,7	400	60		524,2	630,9	500
19		400	512,0	300	40		281,9	384,2	500	61		359,5	409,2	600
20		349	427,0	500	41		239,5	285,6	600	62		220,4	245,9	700
21		277	321,0	600	42		146,3	171,0	700	63		156,4	186,3	720

Таблица 2

Химический состав экспериментальных сталей (Al, Cu – как примесные элементы)

Table 2. Chemical composition of experimental steels (Al, Cu – as impurity elements)

Номер п/п	Химический состав, % (по массе)													
	C	Mn	Cr	Ni	Si	Mo	W	V	Nb	B	Ta	Ti	Zr	Ce
1	0,165	0,260	12,25	0,110	0,230	1,240	0,015	0,110	0,24	0,0048	0,075	0,0018	0,011	0,0005
2	0,120	1,200	11,90	0,260	0,500	1,260	0,071	0,310	0,35	0,0032	0,010	0,0046	0,013	0,0010
3	0,130	1,980	11,72	0,280	0,480	0,110	0,061	0,300	0,03	0,0036	0,015	0,0023	0,013	0,0030
4	0,120	0,300	12,17	0,110	0,170	1,280	0,051	0,120	0,26	0,0090	0,008	0,0039	0,013	0,0020
5	0,089	0,360	12,25	0,100	0,200	0,015	3,170	0,170	0,36	0,0050	0,010	0,0040	0,017	0,0010
6	0,105	0,035	11,75	0,200	0,210	1,700	0,001	0,120	0,35	0,0040	0,007	0,0040	0,011	0,0004
7	0,100	0,930	14,10	0,100	0,200	1,660	1,150	0,210	0,32	0,0030	0,010	0,0030	0,016	0,0010
8	0,135	1,330	12,30	0,125	0,545	1,590	2,105	0,305	0,34	0,0035	1,380	0,0042	0,017	0,0080
9	0,110	2,400	11,50	0,260	0,480	0,015	0,630	0,320	0,01	0,0060	0,005	0,0030	0,010	0,0015
10	0,170	0,660	10,00	0,610	1,180	0,810	0,630	0,290	0,32	0,0063	0,015	0,0051	0,013	0,0015
														0,0009
														0,0150
														0,008

Таблица 3

Границы варьирования легирующих элементов, % (по массе)

Table 3. Boundaries of the variation of alloying elements, (% mass.)

Легирующий элемент	C	Mn	Cr	Ni	Si	Mo	W	V	Nb	Ti	Zr	Ce	B	Ta	N
Минимальное содержание	0,089	0,26	10,0	0,10	0,17	0,015	0,001	0,11	0,01	0,002	0,01	0,001	0,003	0,01	0,015
Максимальное содержание	0,180	2,40	14,1	0,61	1,18	1,800	3,170	0,32	0,36	0,100	0,07	0,020	0,006	1,38	0,050
Предельный уровень	0,230	5,00	15,00	1,50	2,00	2,000	3,500	0,50	0,50	0,150	0,15	0,030	0,009	1,50	0,060

формации по данной тематике до настоящего времени. Данные «второго уровня» – из зарубежных монографий [2, 3, 18], данные «третьего уровня» – современные отечественные и зарубежные периодические издания [19 – 25]. Для примера, для основного легирующего элемента (хрома) зарубежные исследователи считают оптимальным его содержание на уровне 7 – 9 % (сплавы типа Eurofer 97, 9Cr2WVTa, CLAM, JLF), тогда как в отечественной промышленности используются сплавы с содержанием хрома 11,5 – 13,5 % (ЭП-450, ЭП-823, ЧС-139) [26 – 27]. Авторами [1] и [28] на основе экспериментальных исследований сформулированы рекомендации по оптимальному содержанию некоторых легирующих элементов в ХФМС. По этим данным содержание вольфрама в хромокремнистой малоуглеродистой стали не должно превышать 1 % (по массе), а молибдена – 1,5 % (по массе). Оптимальная добавка ванадия в такие стали составляет 0,1 % (по массе), ниобия – 0,4 % (по массе). В этой же работе подчеркивается, что комплексное легирование вольфрамом, молибденом, ванадием и ниобием в оптимальных количествах более эффективно, чем введение их в состав стали по отдельности и в других (больших) количествах. В работе [1] утверждается, что оптимальное совместное содержание вольфрама и молибдена в ХФМС с 12 %-ным содержанием хрома равно 0,65 % (по массе). Взаимообусловленное легирование может приводить к возникновению упрочняющих интерметаллидных фаз, например Fe_2W , Fe_2Mo , $\text{Fe}_2(\text{Mo}, \text{W})$ и карбидов различного состава [1], чем авторы и объясняют повышение жаропрочности.

Из нейросетевых расчетов [8, 29] следует, что оптимизация химического состава ХФМС должна идти в направлении повышения содержания марганца и согласованному уменьшению содержания ниобия.

Добавка в химическую композицию ХФМС кремния до 0,8 % (по массе) упрочняет сталь, превышение этой пороговой величины может ухудшить жаропрочные свойства [1, 30], никель также демонстрирует двойное влияние на прочностные характеристики [1, 31].

Не очевидным является влияние на характеристики прочности ХФМС меди, тантала, циркония, бора, кремния, никеля [32]. Однако эти элементы активно используют в качестве легирующих в ХФМС по тем или иным причинам.

В области малых концентраций такие легирующие элементы, как С, N, V, Nb, Mo, W, Si имеют положительные коэффициенты концентрационного упрочнения K_s в парных сплавах с железом [32 – 35] (0,450; 0,130; 0,005; 0,030; 0,020; 0,030; 0,030 соответственно). Поэтому в математической модели должна присутствовать часть, отвечающая за твердорастворное упрочнение. В качестве таковой автором была взята суммарная атомная доля легирующих элементов. Линейная зависимость $\sigma_{0,2}$ от K_s при больших концентрациях легирующих элементов ослабевает и может менять свой знак на противоположный.

Анализ результатов испытаний на сжатие при 20 – 720 °С с определением предела текучести показал, что из всех проанализированных параметров, характеризующих уровень легированности сталей и их электронное строение (как то сумма легирующих элементов в разном представлении, количество электронов связи, параметр электронного строения Md , сумма валентных электронов), слабая зависимость для предела текучести есть лишь от числа электронных дырок (которая характеризует легированность стали элементами с незаполненными sp -3 оболочками) [36 – 38]. Предел текучести сталей снижается с ростом числа электронных дырок D , т. е. с уменьшением степени легированности элементами с незаполненными sp -3 оболочками или, что то же самое, с уменьшением количества элементов 6 – 8 периодов таблицы Д.И. Менделеева (рис. 1). Это позволило автору ввести в математическую модель сомножитель, учитывающий этот параметр через соответствующее суммирование показателя числа электронных дырок для легирующих элементов в стали. Теория этого вопроса изложена в работе Л. Полинга [38], а пример успешного использования данной концепции применительно к анализу стабильности структурны жаропрочных никелевых сплавов – в работах Симса Ч., Хагеля В. [36] и Логунова А.В. [37].

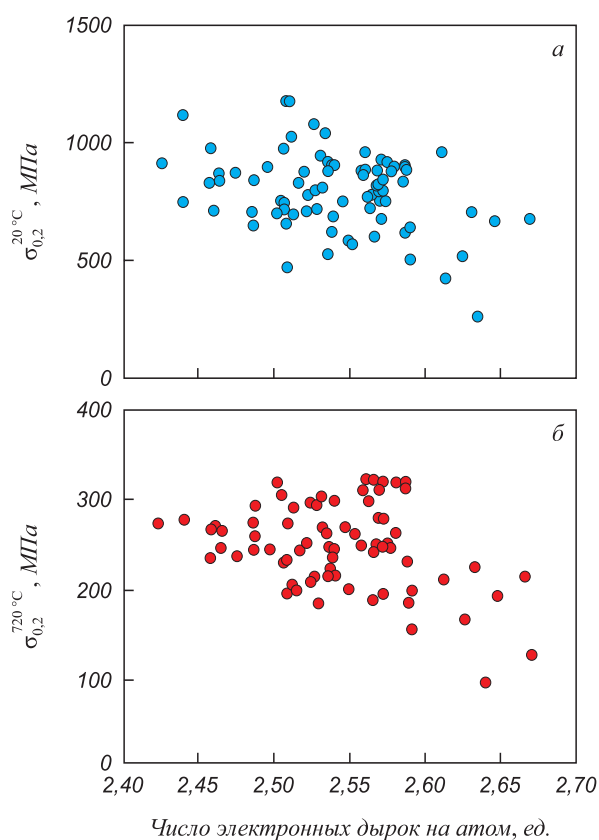


Рис. 1. Связь электронного строения ХФМС и предела текучести при сжатии при температуре 20 (а) и 720 °С (б)

Fig. 1. Relation between HFMS electronic structure and yield strength under compression at 20 (a) and 720 °C (b)

По результатам литературного анализа была сделана попытка создания математической модели, учитывающей влияние на прочность следующих основных (по мнению автора) легирующих элементов: углерода, марганца, молибдена, вольфрама, а также интегральных параметров, описывающих химический состав.

ПОСТРОЕНИЕ РЕГРЕССИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ

Разработка математической модели осуществлялась на основе данных о пределе текучести и основывалась на следующих критериях:

- Согласие с известными экспериментальными и расчетными сведениями о характере влияния легирующих элементов на предел текучести.

- Наилучшая сходимость расчетных $\sigma_{0,2}^{\text{расч}}$ и экспериментальных $\sigma_{0,2}^{\text{эксп}}$ значений предела текучести.

- Минимальное число модельных коэффициентов.

Исходя из этих требований, разработана мультипликативная модель зависимости предела текучести от температуры и содержания легирующих элементов. Для ее сомножителей выбрана экспоненциальная (кроме сомножителя, учитывающего влияние углерода) форма уравнений связи. Модель представляется в виде

$$\sigma_{0,2} = X_1 X_2 \sigma' \sigma_C \sigma_{\text{Mo} + \text{W}} \sigma_{\text{Mn}}, \quad (1)$$

где сомножители выглядят как

$$X_1 = \exp[-0,01(-0,7 + at)^{2,0}], \quad (2)$$

$$X_2 = \exp[-0,01(3,5 + D)^{2,0}], \quad (3)$$

$$\sigma' = \exp(739 - t)^{0,156}, \quad (4)$$

$$\sigma_C = 100C_C^{0,39}, \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{Mo} + \text{W}} = \exp\{-0,072[1,76 - (1,76C_{\text{Mo}} + C_{\text{W}})]^{2,0}\}, \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{Mn}} = \exp[-0,04(2,3 - C_{\text{Mn}})^{2,0}]. \quad (7)$$

Сомножитель (2) задает зависимость прочности от общего содержания (в атомных долях) легирующих элементов в стали и учитывает твердорастворное упрочнение. Сомножитель (3) описывает склонность сплава к образованию в его структуре химических соединений через учет количества электронных дырок. Зависимость (4) описывает общее температурное разупрочнение стали, которое резко ускоряется в районе температур 450 – 600 °С. На рис. 2, а представлена экспериментальная зависимость предела текучести сталей различного химического состава от температуры испытания.

Выражение (5) отражает влияние содержания углерода и носит затухающий характер по мере роста его содержания. Сомножитель (6) лимитирует суммарное

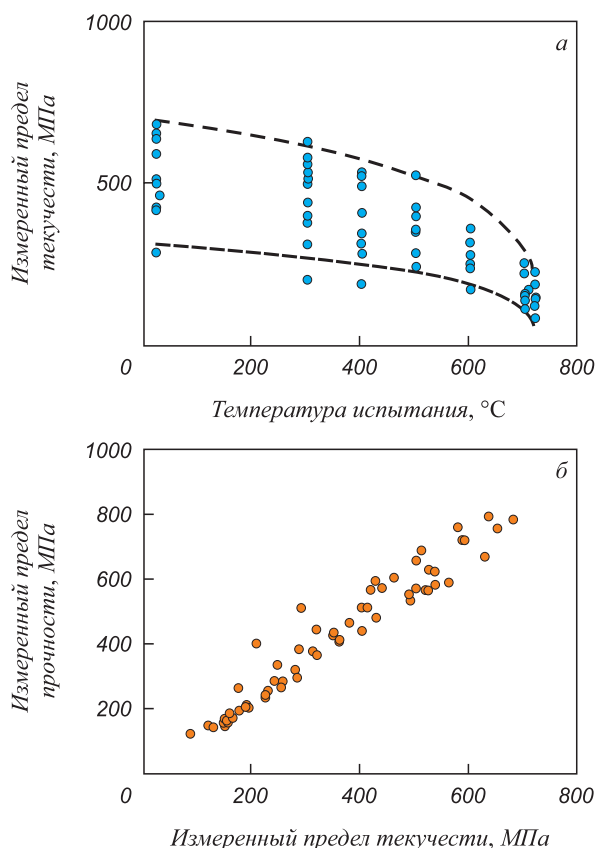


Рис. 2. Экспериментальные зависимости механических свойств ХФМС:

а – зависимость предела текучести от температуры испытания (пунктиром показаны огибающие экспериментальные данные); б – соотношение между экспериментальными пределами прочности и пределами текучести ХФМС

Fig. 2. Experimental dependences of mechanical properties of HFMS: а – dependence of yield strength on the test temperature (dashed lines show the envelopes of the experimental data); б – ratio between the experimental tensile and yield strengths of HFMS

содержание молибдена и вольфрама. Выражение (7) учитывает упрочняющее воздействие марганца.

В качестве статистических характеристик использовались [39] корень квадратный из суммы квадратов отклонений, нормированной на число измерений

$$Q = \sqrt{\frac{(\sigma_{0,2}^{\text{расч}} - \sigma_{0,2}^{\text{эксп}})^2}{n - 1}} \text{ в МПа, коэффициент вариации}$$

$$V = \frac{100Q}{(\sigma_{0,2}^{\text{эксп}})_{\text{среднее}}} \text{ в \% и средний модуль относительного}$$

$$\text{отклонения } \varepsilon = 100 \frac{\sum \frac{\sigma_{0,2}^{\text{расч}} - \sigma_{0,2}^{\text{эксп}}}{\sigma_{0,2}^{\text{эксп}}}}{n} \text{ в \% (n – полное число опытов).}$$

Коэффициенты уравнений (2) – (7) найдены численными методами по признаку минимума показателя Q.

В табл. 4 приведены значения Q, V и ε при различном числе сомножителей, описывающих предел текучести.

Таблица 4

Статистические характеристики в зависимости от формы регрессионного уравнения

Table 4. Statistical characteristics depending on the regression equation form

Вид регрессии	ε , %	V , %	Q , МПа
$\sigma_{0,2} \sim \sigma'$	24,1	27,3	94,9
$\sigma_{0,2} \sim \sigma' \sigma_C$	22,0	25,0	88,0
$\sigma_{0,2} \sim X_1 X_2 \sigma' \sigma_C$	16,9	20,6	88,6
$\sigma_{0,2} \sim X_1 X_2 \sigma' \sigma_C \sigma_{Mn}$	14,2	18,6	68,5
$\sigma_{0,2} = X_1 X_2 \sigma' \sigma_C \sigma_{Mo+W} \sigma_{Mn}$	14,3	16,8	58,4
$\sigma_{0,2} = X_1 X_2 \sigma' \sigma_C \sigma_{Mo+W} \sigma_{Mn} \sigma_N$	12,3	16,6	57,6
$\sigma_{0,2} = X_1 X_2 \sigma' \sigma_C \sigma_{Mo+W} \sigma_{Mn} \sigma_{Si} \sigma_N$	15,0	18,1	62,9

Из табл. 4 видно, что предложенная модель (1) удовлетворительно аппроксимирует исходные данные с ошибкой 14,3 %. В работе сделана попытка расширить полученную модель введением в нее зависимостей от азота (целенаправленного варьирования его содержания в сталях не делали) и кремния. Результаты показывают (см. табл. 4), что множитель, учитывающий влияние азота, улучшает модель и является необходимым в общей формуле, а введение в модель множителя, учитывающего содержание кремния, модель ухудшает. Введение множителя от кремния в формулу может оказаться необходимым при анализе сталей с повышенным содержанием кремния (типа ЭП-823), но для этого должна быть сформирована другая база исходных данных на сталях с соответствующими химическими составами.

На рис. 3, а представлена взаимосвязь экспериментальных пределов текучести и рассчитанных по пред-

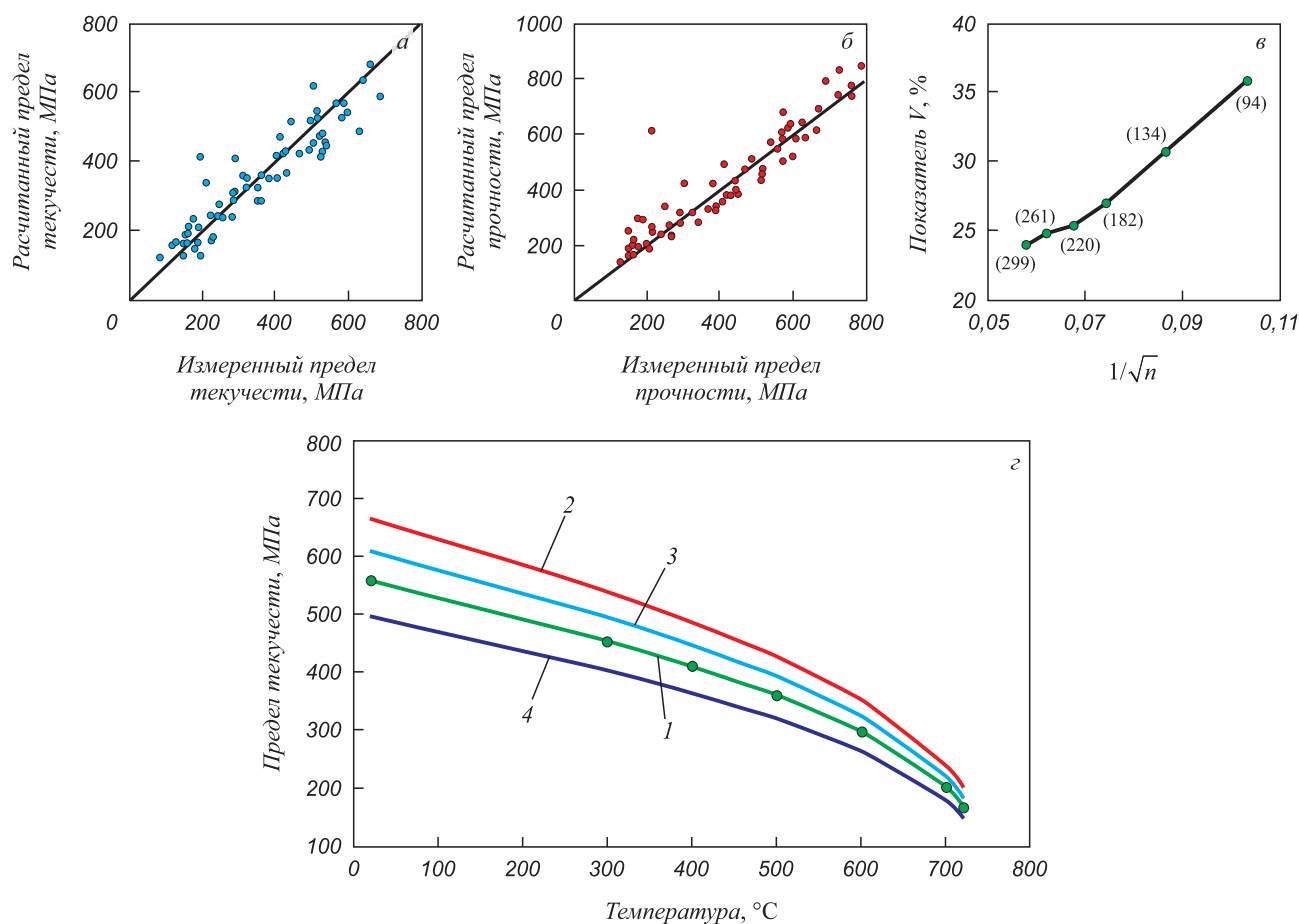


Рис. 3. Прогностическо-статистический анализ моделей: сравнение экспериментальных и расчетных значений пределов текучести (а) и пределов прочности (б); в – зависимость относительной ошибки прогноза для предела текучести от размера матрицы экспериментальных данных (приведена обратная величина от корня квадратного из этого числа), числа около экспериментальных точек – число опытов в данной серии; г – расчетные (по уравнению (1)) температурные зависимости предела текучести при различном химическом составе, цифры у кривых соответствуют составам А(1), Б(2), В(3), Г(4) из табл. 5

Fig. 3. Predictive and statistical analysis of the models: comparison of experimental and calculated values of yield (а) and tensile strengths (б); в – dependence of the relative forecast error for yield strength on the size of experimental data matrix (reciprocal of the square root of this number is given); numbers near the experimental points – the number of experiments in this series; г – calculated (according to the equation 1) temperature dependences of yield strength at different chemical composition; numbers of the curves correspond to compositions А(1), Б(2), В(3), Г(4) from the table 5

Химический состав прогнозируемых сталей

Table 5. Chemical composition of the predicted steels

Номер п/п	Химический состав, % (по массе)																
	C	Mn	Cr	Ni	Si	Mo	W	V	Nb	B	Ta	Ti	Zr	Ce	Al	N	Cu
А	0,16	0,5	12	0,10	0,5	0,50	0,50	0,3	0,30	0,006	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,001
Б	0,18	2,5	13	0,01	0,5	0,50	0,50	0,1	0,01	0,006	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,001
В	0,22	2,5	13	0,01	0,5	0,75	1,25	0,1	0,30	0,006	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,001
Г	0,18	5,0	13	0,01	0,5	0,50	0,50	0,1	0,01	0,006	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,001

лагаемой модели (1), из чего видно, что данные располагаются вдоль прямой, идущей под углом 45°. Это говорит о высоком значении коэффициента корреляции между этими величинами.

Экспериментальный факт тесной связи пределов текучести и пределов прочности для исследуемых ХФМС сталей (рис. 2, б) позволил применить такой же подход к нахождению уравнения связи предела прочности с температурой и содержанием легирующих элементов в сталях. Форма уравнения для предела прочности осталась той же, что и для предела текучести вида (1). Формулы незначительно отличаются лишь коэффициентом при (% C), а именно

$$\sigma_b = \exp[-0,011(-0,8 + at)^{2,0}] \times \exp[-0,01(3,5 + D)^{2,0}] (745 - t)^{0,156} 130(\% C)^{0,4} \times \exp\left\{-0,074[1,75 - (1,75C_{Mo} + C_W)]^{2,0}\right\} \times \exp\left\{-0,04[2,3 - (\% Mn)^{2,0}]\right\}. \quad (8)$$

Сопоставление рассчитанных по формуле (8) и экспериментальных значений пределов прочности экспериментальных ХФМС приведено на рис. 3, б. Статистические характеристики для этого случая составили 77,2 (S, МПа), 18 (V, %), 17 (ε, %).

Найденное выражение для предела текучести

$$\sigma_{0,2} = \exp[-0,01(-0,7 + at)^{2,0}] \times \exp[-0,01(3,5 + D)^{2,0}] (739 - t)^{0,156} 100(\% C)^{0,39} \times \exp\left\{-0,072[1,76 - (1,76C_{Mo} + C_W)]^{2,0}\right\} \times \exp\left\{-0,04[2,3 - (\% Mn)^{2,0}]\right\} \quad (9)$$

является устойчивым по отношению к увеличению размеров матрицы экспериментальных данных. Начиная с числа опытов 94 и более, коэффициент вариации V монотонно снижается вплоть до максимального размера массива в 299 опытах (рис. 3, б; увеличение чис-

ла опытов соответствовало переходу к новым этапам исследования). Такое поведение коэффициента вариации характерно для величин, имеющих распределение Пуассона.

Уравнения (8) и (9) справедливы для сталей, в которых содержание легирующих элементов находится в пределах значений, представленных в табл. 3 (строки 1 и 2). При этом статистические характеристики, оценивающие его адекватность, минимальны. Превышение этих концентраций до уровня, указанного в строке 3 табл. 3, ухудшает статистические характеристики примерно в 2 раза. Для больших отклонений от указанного диапазона варьирования работоспособность модели не анализировалась. Уравнение (9) может быть использовано для поиска оптимального химического состава жаропрочной стали ферритно-мартенситного класса с 12 % хрома и различными микролегирующими добавками. На рис. 3, г представлены температурные зависимости предела текучести при исходном (состав А из табл. 5; в нем содержание легирующих элементов является характерным и усредненным для промышленных сталей ЭП450, ЭП823, ЧС159, но при этом не обеспечивающим максимальную жаропрочность) и модифицированных химических составах, отличающихся от базового:

- повышенным содержанием марганца и хрома и пониженным содержанием никеля, ниобия и ванадия (Б);
- чрезмерным повышением содержания молибдена и вольфрама одновременно (В);
- чрезмерным содержанием марганца (Г).

Видно, что при увеличенном содержании углерода и оптимальном содержании марганца, хрома, молибдена и вольфрама при сниженном содержании никеля, ниобия, ванадия прочность повышается во всем температурном диапазоне. Большие количества марганца (5 %), как и молибдена с вольфрамом (2 % в сумме) прочность снижают.

Полученное уравнение (9) использовалось для проведения расчетов по определению влияния некоторых легирующих элементов на предел текучести ферритно-мартенситных сталей при 700 °С. В качестве модельного выбран химический состав А из табл. 5. Для этого

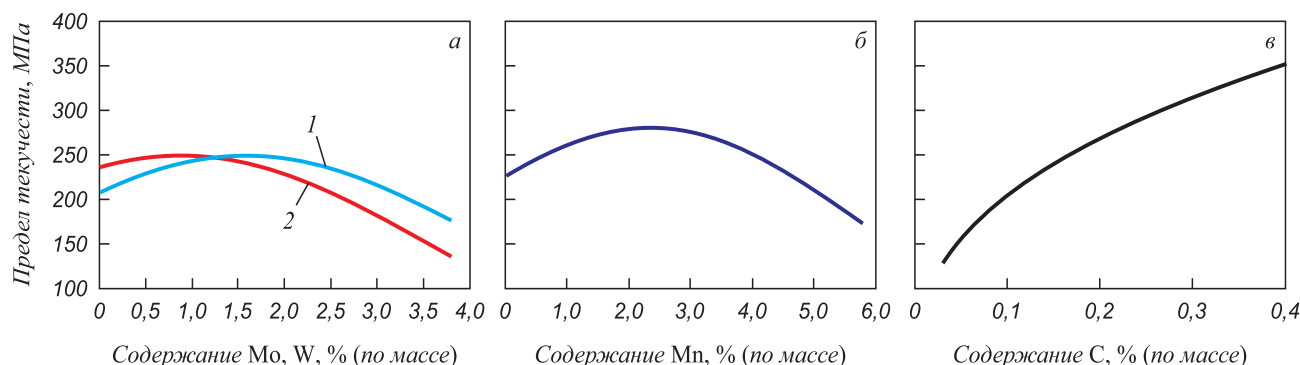


Рис. 4. Расчетные зависимости предела текучести от содержания:
 а – вольфрама (при $C_{Mo} = 0,1$ % (по массе) (1) и при $C_{Mo} = 0,5$ % (по массе) (2)); б – марганца; в – углерода

Fig. 4. Calculated dependences of the yield strength depending on the content of:
 а – tungsten at $C_{Mo} = 0.1$ (% mass.) (1) and $C_{Mo} = 0.5$ (% mass.) (2); б – manganese; в – carbon

состава проведен анализ парного влияния элементов, входящих в уравнения (1) – (7), на предел текучести при 700 °С. На рис. 4, а показаны рассчитанные по уравнению (1) кривые, демонстрирующие изменение предела текучести при варьировании содержания вольфрама и молибдена при различном их содержании. На рис. 4, б, в показаны аналогичные зависимости при изменении содержания марганца и углерода.

Из рис. 4, а видно, что влияние Mo и W экстремально и максимальное упрочнение достигается в районе 2 % их совместного эквивалентного содержания.

Рис. 4, б показывает, что с ростом содержания марганца прочность увеличивается вплоть до $C_{Mn} \approx 2$ %, после чего начинает снижаться. Данные [40, 41] близки к полученным результатам. Из рис. 4, в видно, что в целом с ростом содержания углерода в исследованных пределах $\sigma_{0,2}$ при 700 °С растет, но скорость увеличения предела текучести постоянно снижается. По мнению авторов работ [1], [42] содержание углерода в ХФМС с 12 % хрома не должно превышать 0,2 % (по массе). Практически к такому же результату привели авторов [8] расчеты по нейросетевой модели пластичности ХФМС. Опыты, проведенные в данной работе по испытанию на сжатие образцов сталей с содержанием углерода 0,09, 0,24 и 0,35 % показали, что при температурах испытаний 20 – 550 °С повышение содержания углерода в указанных пределах ведет к постоянному росту предела текучести (700, 1100, 1400 МПа соответственно). Однако при 720 °С рост предела текучести с увеличением содержания углерода сверх 0,18 % менее значим (305, 320, 335 МПа для тех же позиций). По мнению автора, с учетом данных испытаний на ползучесть, оптимальное содержание углерода в составе ХФМС с 12 % хрома должно быть на уровне 0,2 % (по массе).

Выводы

Проведен анализ предела текучести и предела прочности опытных сталей ферритно-мартенситного класса

с 12 % хрома, в результате которого разработаны адекватные нелинейные регрессионные уравнения, связывающие предел текучести и предел прочности с температурой испытания, обобщенными показателями химического состава и содержанием углерода, марганца, молибдена и вольфрама в составах новых сталей. Показана принципиальная возможность поиска химического состава стали с повышенной жаропрочностью при помощи найденных уравнений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ланская К.А. Высокохромистые жаропрочные стали. – М.: Металлургия, 1976. – 216 с.
2. High chromium ferritic and martensitic steels for nuclear applications / R. Klueh, D. Harries eds. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2001. – 217 p.
3. 9-12Cr Heat-Resistant Steels / Yan Wei, Wang Wei, Shan Yiyin etc. – Springer. Ser.: Engineering Materials, 2015. – 223 p.
4. Structural materials for liquid metal cooled fast reactor fuel assemblies: operational behaviour. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012. – 87 p.
5. Горский В.Г. Прикладная математическая статистика – наш профиль // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1997. № 1. С. 96 – 100.
6. Дубров А.М. Обработка статистических данных методом главных компонент. – М.: Статистика, 1978. – 135 с.
7. Рачков В.И., Беломытцев М.Ю., Конобеев Ю.В. и др. Анализ предела текучести ферритно-мартенситной стали методами нейросетевого моделирования и главных компонент // Вопросы материаловедения. 2014. № 1(77). С.11 – 19.
8. Образцов С.М., Биржевой Г.А., Конобеев Ю.В. и др. Нейросетевая модификация стали ферритно-мартенситного класса ЭП-450 по критерию максимума прочности и пластичности // Перспективные материалы. 2005. № 4. С. 14 – 19.
9. Образцов С.М., Биржевой Г.А., Конобеев Ю.В. и др. Нейросетевые эксперименты по взаимовлиянию легирующих элементов на механические свойства 12% Cr ферритно-мартенситных сталей // Изв. вуз. Ядерная энергетика. 2008. № 3. С. 119 – 124.
10. Sangiovanni D.G., Hultman L., Chirita V. Supertoughening in B1 transition metal nitride alloys by increased valence electron concentration // Acta Materialia. 2011. Vol. 59. No. 5. P. 2121 – 2134.
11. Brachet J.-C., Gavard L., Boussidan C. etc. Modelling of phase transformations occurring in low activation martensitic steels // Journal of Nuclear Materials. 1998. Vol. 258 – 263. Part B. P. 1307 – 1311.

12. KeJia-Hong, KeHuibin, Odette G.R., Morgan D. Cluster dynamics modeling of Mn-Ni-Si precipitates in ferritic-martensitic steel under irradiation // *Journal of Nuclear Materials*. 2018. Vol. 498. P. 83 – 88.
13. Беломятцев М.Ю., Михайлов М.А., Образцов С.М. и др. Экспериментальное исследование влияния марганца на прочностные свойства сталей ферритно-мартенситного класса с 12 % содержанием хрома // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2011. № 3. С. 45 – 47.
14. Рачков В.И., Образцов С.М., Соловьев В.А. и др. Оптимизация химического состава ферритно-мартенситной стали в целях повышения кратковременных механических свойств // *Атомная энергия*. 2013. Т. 115. Вып. 1. С. 22 – 27.
15. Ланская К.А. Жаропрочные стали. – М.: Металлургия, 1967. – 247 с.
16. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали. – М.: Металлургия, 1967. – 799 с.
17. Химушин Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1969. – 752 с.
18. Klueh R.L. Elevated-temperature ferritic and martensitic steels and their application to future nuclear reactors // *International Materials Reviews*. 2005. Vol. 50. No. 5. P. 287 – 310.
19. Roy A.K., Kukatla S.R., Yarlagadda B. etc. Tensile properties of martensitic stainless steels at elevated temperatures // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2005. Vol. 14. No. 2. P. 212 – 218.
20. Zhongfei Ye, Wang Pei, Li Dianzhong etc. Effect of carbon and niobium on the microstructure and impact toughness of a high silicon 12 % Cr ferritic/martensitic heat resistant steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2014. Vol. 616. P. 12 – 19.
21. Ye Zhongfei, Wang Pei, Li Dianzhong, Li Yiyi. $M_{23}C_6$ precipitates induced inhomogeneous distribution of silicon in the oxide formed on a high-silicon ferritic/martensitic steel // *Scripta Materialia*. 2015. Vol. 97. P. 45 – 48.
22. Fujita S.N., Ohmura K., Kikuchi M. etc. Effect of Nb on high-temperature properties for ferritic stainless steel // *Scripta Materialia*. 1996. Vol. 35. No. 6. P. 705 – 710.
23. Ule B., Nagode A. The improved power-law, stress-dependent, energy-barrier model of 9Cr-1Mo-0.2V steel using short-term creep data // *Scripta Materialia*. 2007. Vol. 57. No. 5. P. 405 – 408.
24. Sawada K., Takeda M., Maruyama K. etc. Effect of W on recovery of lath structure during creep of high chromium martensitic steels // *Materials Science and Engineering A*. 1999. Vol. 267. No. 1. P. 19 – 25.
25. Helisa L., Todaa Y., Harab T. etc. Effect of cobalt on the microstructure of tempered martensitic 9Cr steel for ultra-supercritical power plants // *Materials Science and Engineering: A*. 2009. Vol. 510 – 511. P. 88 – 94.
26. Li S., Zhou Z., Jang J. etc. The influence of Cr content on the mechanical properties of ODS ferritic steels // *Journal of Nuclear Materials*. 2014. Vol. 455. No. 1 – 3. P. 194 – 200.
27. Klueh R.L., Alexander D.J., Sokolov M.A. Effect of chromium, tungsten, tantalum, and boron on mechanical properties of 5-9Cr-WVTaB steels // *Journal of Nuclear Materials*. 2002. Vol. 304. No. 2 – 3. P. 139 – 152.
28. Беломятцев Ю.С., Ляшенко В.С., Абрамович М.Д. Влияние легирующих элементов на жаропрочность хромокремнистой малоуглеродистой стали // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1964. № 7. С. 27 – 30.
29. Рачков В.И., Образцов С.М., Биржевой Г.А. и др. Нейросетевой анализ пластичности ферритно-мартенситной стали ЭП-450 при различной концентрации легирующих элементов // *Атомная энергия*. 2004. Т. 96. Вып. 2. С. 121 – 126.
30. Chen S., Rong L. Effect of silicon on the microstructure and mechanical properties of reduced activation ferritic/martensitic steel // *Journal of Nuclear Materials*. 2015. Vol. 459. P. 13 – 19.
31. Das C.R., Albert S.K., Bhaduri A.K., Murty B.S. Effect of boron and Ni addition and initial heat-treatment temperature on microstructure and mechanical properties of modified 9Cr-1Mo steels under different heat-treatment conditions // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013. Vol. 44A. P. 2171 – 2186.
32. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч. 2. Деформация. – М.: МИСН, 1997. – 527 с.
33. He M.Y., Odette G.R., Yamamoto T., Klingensmith D. A universal relationship between indentation hardness and flow stress // *Journal of Nuclear Materials*. 2007. Vol. 367 – 370. Part A. P. 556 – 560.
34. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
35. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. Металлофизика высокопрочных сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 312 с.
36. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля: Пер. с англ. Кн. 1 / Под ред. Р.Е. Шалина. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.
37. Логунов А.В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин. – Рыбинск: ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2017. – 854 с.
38. Pauling L. The nature of the interatomic forces in metals // *Physical Review* II. December 1938. Vol. 54. P. 899 – 904.
39. Мельниченко А.С. Статистический анализ в металлургии и материаловедении. – М.: ИД МИСН, 2009. – 268 с.
40. Hong S.G., Lee W.B., Park C.G. The effects of tungsten addition on the microstructural stability of 9Cr-Mo steels // *Journal of Nuclear Materials*. 2001. Vol. 288. No. 2 – 3. P. 202 – 207.
41. Hamilton M.L., Gelles D.S. Tensile response of low activation ferritic steels irradiated in ORR at temperatures in the range 60 – 400 °C // *Journal of Nuclear Materials*. 2002. Vol. 307. Part A. P. 256 – 259.
42. Yan W., Hu P., Deng L. etc. Effect of carbon reduction on the toughness of 9CrWVTaB steels // *Metallurgical and materials transactions A*. 2012. Vol. 43 A. P. 1921 – 1933.

Поступила в редакцию 12 сентября 2019 г.

После доработки 18 января 2020 г.

Принята к публикации 2 июня 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 6, pp. 458–468.

MATHEMATICAL MODELING OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF CHROMIUM FERRITIC-MARTENSITIC STEELS

M. Yu. Belomytsev

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),
Moscow, Russia

Abstract. To predict the chemical composition of heat-resistant high-chromium steels with ferritic-martensitic structure (HFMS) (with the number of alloying elements up to 10 and the same number of parameters of production and heat treatment technology), a mathematical model

is needed. In this work, I searched for the dependences of the yield strength and ultimate strength of HFMS on the content of alloying elements and test temperature without analyzing technological factors due to their uniformity. Analysis of the samples from ten steel grades was carried out on the basis of the experimental data including 63 tensile tests at 20 – 720 °C. Regression multiplicative dependencies are proposed to take into account exponential and power-law form through the corresponding factors: solid solution and dispersion hardening, total temperature softening of the steel, carbon content, total molyb-

denum and tungsten content, and strengthening effect of manganese. Estimates of the effect of nitrogen and silicon on the predicted strength characteristics have shown that a factor that takes into account the effect of nitrogen improves the model and is necessary in the general formula, and introduction of a factor that takes into account silicon content, worsens the model. Introduction of a silicon factor in the formula may be necessary in analysis of steels with high silicon content (type EP-823). The experimental fact of a close relationship between yield strengths and tensile strengths for the studied HFMS steels made it possible to use for the yield strength the form of equation and forecast for the ultimate strength, which differs only by coefficients in variables. Deviation of the calculated model yield strengths and tensile strengths from experimental is 13 – 18 %. An example of analysis of the yield strength behavior of steels with experimental chemical compositions is given. It is shown that the dependences found for the yield strength and tensile strength are stable with respect to the increase of experimental data matrix: with an increase in the number of experiments from 94 and higher, the coefficient of variation V monotonously decreases up to a maximum array size of 299 experiments.

Keywords: mathematical modeling, multifactor analysis, nonlinear regression, ferritic-martensitic steels, yield strength, ultimate strength, chemical composition.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-458-468

REFERENCES

- Lanskaya K.A. *Vysokokhromistye zharoprochnye stali* [High-chromium heat-resistant steels]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 216 p. (In Russ.).
- High chromium ferritic and martensitic steels for nuclear applications*. Klueh R., Harries D. eds. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2001, 217 p.
- Yan Wei, Wang Wei, Shan Yiyin, Yang Ke, Sha Wei. *9-12Cr Heat-Resistant Steels*. Springer, Ser.: Engineering Materials. 2015, 223 p.
- Structural Materials for Liquid Metal Cooled Fast Reactor Fuel Assemblies: Operational Behaviour*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012, 87 p.
- Gorskii V.G. Applied mathematical statistics – our profile. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 1997, no. 1, pp. 96–100. (In Russ.).
- Dubrov A.M. *Obrabotka statisticheskikh dannykh metodom glavnnykh component* [Statistical data processing by a method of principle components]. Moscow: Statistika, 1978, 135 p. (In Russ.).
- Rachkov V.I., Belomytsev M.Yu., Konobeev Yu.V., Obratsov S.M., Pyshin I.V. Yield strength research of ferritic-martensitic steel with the help of neural-net and principal component analysis. *Voprosy materialovedeniya*. 2014, no. 1(77), pp. 11–19. (In Russ.).
- Obratsov S.M., Birzhevoi G.A., Konobeev Yu.V., Solov'ev V.A., Rachkov V.I. Neural-net improvement of ferritic-martensitic steel of EP-450 type by maximum of strength and plasticity. *Perspektivnye materialy*. 2005, no. 4 pp. 14–19. (In Russ.).
- Obratsov S.M., Birzhevoi G.A., Konobeev Yu.V., Rachkov V.I., Solov'ev V.A. Neural-net experiments on mutual influence of alloying elements on mechanical properties of 12 % Cr ferritic-martensitic steels. *Izv. vuz. Yadernaya energetika*. 2008, no. 3 pp. 119–124. (In Russ.).
- Sangiovanni D.G., Hultman L., Chirita V. Supertoughening in B1 transition metal nitride alloys by increased valence electron concentration. *Acta Materialia*. 2011, vol. 59, no. 5, pp. 2121–2134.
- Brachet J.-C., Gavard L., Boussidan C., Lepoittevin C., Denis S., Servant C. Modelling of phase transformations occurring in low activation martensitic steels. *Journal of Nuclear Materials*. 1998, vol. 258-263, part B, pp. 1307–1311.
- Ke Jia-Hong, Ke Huibin, Odette G.R., Morgan D. Cluster dynamics modeling of Mn-Ni-Si precipitates in ferritic-martensitic steel under irradiation. *Journal of Nuclear Materials*. 2018, vol. 498, pp. 83–88.
- Belomytsev M.Yu., Mikhailov M.A., Obratsov S.M., Solov'ev V.A., Rachkov V.I. Influence of manganese on strength properties of ferritic-martensitic steels with 12 % of chromium. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 3, pp. 45–47. (In Russ.).
- Rachkov V.I., Obratsov S.M., Solov'ev V.A., Belomytsev M.Yu., Mikhailov M.A., Chizhikov K.E. Optimization of the chemical composition of ferrite-martensite steel to increase short-time mechanical properties. *Atomic Energy*. 2013, vol. 115, no. 1, pp. 26–31.
- Lanskaya K.A. *Zharoprochnye stali* [Heat-resistant steels]. Moscow: Metallurgiya, 1967, 247 p. (In Russ.).
- Khimushin F.F. *Nerzhavayushchie stali* [Stainless steels]. Moscow: Metallurgiya, 1967, 799 p. (In Russ.).
- Khimushin F.F. *Zharoprochnye stali i splavy* [Heat-resistant steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1969, 752 p. (In Russ.).
- Klueh R. L. Elevated-temperature ferritic and martensitic steels and their application to future nuclear reactors. *International Materials Reviews*. 2005, vol. 50, no. 5, no. 287–310.
- Roy A. K., Kukatla S. R., Yarlagadda B., Potluri V. N., Lewis M., O'Toole B. Tensile properties of martensitic stainless steels at elevated temperatures. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2005, vol. 14, no. 2, pp. 212–218.
- Zhongfei Ye, Wang Pei, Li Dianzhong, Zhang Yutuo, Li Yiyi. Effect of carbon and niobium on the microstructure and impact toughness of a high silicon 12% Cr ferritic/martensitic heat resistant steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2014, vol. 616, pp. 12–19.
- Ye Zhongfei, Wang Pei, Li Dianzhong, Li Yiyi. $M_{23}C_6$ precipitates induced inhomogeneous distribution of silicon in the oxide formed on a high-silicon ferritic/martensitic steel. *Scripta Materialia*. 2015, vol. 97, pp. 45–48.
- Fujita S.N., Ohmura K., Kikuchi M., Suzuki T., Funaki S., Hiroshige I. Effect of Nb on high-temperature properties for ferritic stainless steel. *Scripta Materialia*. 1996, vol. 35, no. 6, pp. 705–710.
- Ule B., Nagode A. The improved power-law, stress-dependent, energy-barrier model of 9Cr-1Mo-0.2V steel using short-term creep data. *Scripta Materialia*. 2007, vol. 57, no. 5, pp. 405–408.
- Sawada K., Takeda M., Maruyama K., Ishii R., Yamada M., Nagae Y., Komine R. Effect of W on recovery of lath structure during creep of high chromium martensitic steels. *Materials Science and Engineering: A*. 1999, vol. 267, no. 1, pp. 19–25.
- Helisa L., Todaa Y., Harab T., Miyazaki H., Abe F. Effect of cobalt on the microstructure of tempered martensitic 9Cr steel for ultra-supercritical power plants. *Materials Science and Engineering: A*. 2009, vol. 510 – 511, pp. 88–94.
- Li S., Zhou Z., Jang J., Wang M., Hu H., Sun H., Zou L., Zhanga G., Zhanga L. The influence of Cr content on the mechanical properties of ODS ferritic steels. *Journal of Nuclear Materials*. 2014, vol. 455, no. 1-3, pp. 194–200.
- Klueh R.L., Alexander D.J., Sokolov M.A. Effect of chromium, tungsten, tantalum, and boron on mechanical properties of 5–9Cr-WVTaB steels. *Journal of Nuclear Materials*. 2002, vol. 304, no. 2-3, pp. 139–152.
- Belomytsev Yu.S., Lyashenko V.S., Abramovich M.D. Effect of alloyed elements on the heat resistance of chromium-silicon low-carbon steel. *Metal Science and Heat Treatment*. 1964, no. 7, pp. 427–429.
- Rachkov V.I., Obratsov S.M., Birzhevoi G.A., Konobeev Yu.V., Solov'ev V.A., Silkina O.S. Neural-net analysis of the plasticity of ÉP-450 ferrite-martensite steel with different alloying element concentrations. *Atomic Energy*. 2004, vol. 96, no. 2, pp. 111–116.
- Chen S., Rong L. Effect of silicon on the microstructure and mechanical properties of reduced activation ferritic/martensitic steel. *Journal of Nuclear Materials*. 2015, vol. 459, pp. 13–19.
- Das C.R., Albert S.K., Bhaduri A.K., Murty B.S. Effect of boron and Ni addition and initial heat-treatment temperature on microstructure and mechanical properties of modified 9Cr-1Mo steels under different heat-treatment conditions. *Metallurgical and materials transactions A*. 2013, vol. 44A, pp. 2171–2186.
- Shtremel' M.A. *Prochnost' splavov. Ch. 2: Deformatsiya* [Alloy strength. Part 2. Deformation]. Moscow: Izd. MISIS, 1997, 527 p. (In Russ.).

33. He M.Y., Odette G.R., Yamamoto T., Klingensmith D. A universal relationship between indentation hardness and flow stress. *Journal of Nuclear Materials*. 2007, vol. 367–370, part A, pp. 556–560.
34. Gol'dshtein M.I., Grachev S.V., Veksler Yu.G. *Spetsial'nye stali* [Special steels]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 408 p. (In Russ.).
35. Gol'dshtein M.I., Litvinov V.S., Bronfin B.M. *Metallofizika vysokoprochnykh splavov* [Metal physics of high-strength alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 312 p. (In Russ.).
36. *Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power*. Chester T. Sims, Stoloff N.S., Wolliam C. Hagel eds. New York: Wiley, 1987, 615 p. (Russ.ed.: *Supersplavy II: Zharoprochnye materialy dlya aerokosmicheskikh i promyshlennykh energoustanovok*. Sims Ch.T. Stoloff N.S., Hagel W.C. eds. Moscow: Metallurgiya, 1995, 384 p.).
37. Logunov A.V. *Zharoprochnye nikelovye splavy dlya lopatok i diskov gazovykh turbin* [Heat-resistant nickel alloys for gas turbine blades and discs]. Rybinsk: ID Gazoturbinnye tekhnologii, 2017, 854 p. (In Russ.).
38. Pauling L. The nature of the interatomic forces in metals. *Physical Review II*. December 1938, vol. 54, pp. 899–904.
39. Mel'nichenko A.S. *Statisticheskii analiz v metallurgii i materialovedenii* [Statistical analysis in metallurgy and material science]. Moscow: ID MISiS, 2009, 268 p. (In Russ.).
40. Hong S.G., Lee W.B., Park C.G. The effects of tungsten addition on the microstructural stability of 9Cr-Mo steels. *Journal of Nuclear Materials*. 2001, vol. 288, no. 2-3, pp. 202–207.
41. Hamilton M.L., Gelles D.S. Tensile response of low activation ferritic steels irradiated in ORR at temperatures in the range 60–400 °C. *Journal of Nuclear Materials*. 2002, vol. 307, part A, pp. 256–259.
42. Yan W., Hu P., Deng L., Wang W., Sha W., Shan Y., Yang K., Effect of carbon reduction on the toughness of 9CrWVTaN steels. *Metallurgical and materials transactions A*. 2012, vol. 43A, no. 6, pp. 1921–1933.

Information about the author:

M.Yu. Belomyttsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metallography and Physics of Strength” (myubelom@yandex.ru)

Received September 12, 2019

Revised January 18, 2020

Accepted June 2, 2020

УДК 621.791.927.5

СТРУКТУРА И ТВЕРДОСТЬ НАПЛАВЛЕННЫХ НА НИЗКОУГЛЕРОДИСТУЮ СТАЛЬ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ НИЗКОЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ТОКА*

Сараев Ю.Н., д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории композиционных материалов

Безбородов В.П., к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории композиционных
материалов (val@ispms.tsc.ru)

Перовская М.В., к.т.н., научный сотрудник лаборатории композиционных материалов

Семенчук В.М., инженер лаборатории композиционных материалов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

(634021, Россия, Томск, Академический просп., 2/4)

Аннотация. Исследовано влияние режимов ручной электродуговой наплавки покрытий электродами Т-590 на низколегированную сталь 09Г2С на их структуру и твердость. Показано, что при импульсно-дуговой наплавке покрытий электродами формируется мелкодендритная структура наплавленного металла. Микроструктура зоны термического влияния после наплавки состоит из нескольких участков: зона перегрева с видманштеттовой структурой и зона нормализации с характерной мелкозернистой феррито-перлитной структурой. В исходном состоянии основной металл (сталь 09Г2С) имеет твердость ~2500 МПа. Твердость материала наплавленного покрытия из-за сильного перемешивания с металлом стали равна примерно 2700 – 3000 МПа, а зоны термического влияния составляет 2100 – 2300 МПа. При нанесении покрытия на режиме постоянного тока температура нагрева наплавочной ванны выше, что, как следствие, вызывает рост зерна. При нанесении покрытия на импульсных режимах, путем направленного низкочастотного высокоэнергетического воздействия электрической дуги на формируемый металл, за счет постоянного возвратно-поступательного движения расплава с частотой модуляции тока формируется структура, имеющая меньшие размеры составляющих. Установлено, что применение метода импульсно-дуговой наплавки позволяет сохранить в наплавленных покрытиях сформированные ранее упрочняющие фазы.

Ключевые слова: сталь, структура, свойство, покрытие, наплавка, износостойкость, электрод, дуга, источник, элемент.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-469-473

ВВЕДЕНИЕ

Электродуговая наплавка электродами является экономичным и широко применяемым в промышленности методом восстановления деталей машин и механизмов, придания высокой износостойкости их рабочей поверхности [1, 2]. В настоящее время наиболее распространенные износостойкие наплавочные материалы включают сплавы с хромом, вольфрамом, бором, молибденом и др. Износостойкость этих наплавочных материалов сильно зависит от их структуры, типа и количества упрочняющих фаз в сплавах. Процессы наплавки из-за различий величин вложений тепла и свойств электродных материалов оказывают специфическое влияние на свойства покрытий [3 – 13]. Снижение свойств наплавленного металла, как правило, происходит из-за дефектов, которые могут возникнуть в процессе наплавки [13 – 16]. Это может приводить к ускоренному разрушению наплавленных покрытий [17 – 20]. Современные способы наплавки позволяют регламентировать скорость охлаждения материала наносимых покрытий и

управлять процессами их плавления и кристаллизации, формированием структуры и повышением физико-механических свойств [1, 2, 19, 20].

Важной задачей является исследование влияния технологического режима наплавки электродами на характеристики наносимых покрытий за счет применения импульсного процесса, снижающего вложение тепла и структурную неоднородность металла.

Цель работы – повышение твердости наплавленных электродами Т-590 покрытий применением импульсно-дугового метода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе проведены исследования покрытий, полученных ручной дуговой наплавкой электродами Т-590 диаметром 4 мм. В качестве подложки, на которую производилась наплавка, применялись образцы из стали 09Г2С толщиной 6 мм. Наплавка покрытий осуществлялась с применением источника питания ФЕБ-315 «МАГМА» с пультом «Пульс» для реализации импульсно-дугового процесса. Для наплавки покрытий применялись два способа: на постоянном токе и импульсном режиме с частотой модуляции тока

* Работа выполнена в рамках Программ фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2018 – 2020 гг., проект III.23.2.1

в пределах от 1 до 5 Гц. Регистрация параметров процесса наплавки электродов осуществлялась с помощью цифрового осциллографа АКИП 4122/IV. Микроструктуру образцов исследовали на оптическом микроскопе НЕОРНОТ-21 в сечениях, перпендикулярных продольной оси наплавленного покрытия. Микротвердость наплавленных покрытий, зоны термического влияния и основного металла измеряли на микротвердомере Leika при нагрузке на индентор 0,5 Н. Химический состав используемых электродов Т-590, %: 2,0 – 2,5 Si; 1 – 2 Mn; 25,0 Cr; 2,9 – 3,5 C; 1,0 В.

Параметры режимов наплавки покрытий электродами Т-590 показаны ниже.

На постоянном токе: $I \sim 150$ А; $U \sim 25$ В; скорость наплавки $V_n \sim 6,99$ м/ч; уровень погонной энергии 1642 кДж/м (погонная энергия рассчитывалась по общепринятой методике, учитывающей скорость наплавки, равную 2 – 3 мм/с и затрачиваемую энергию, составляющую 3 – 5 Вт).

В режиме импульсного питания: ток импульса $I_n \sim 180$ А; ток паузы $I_p = 50$ А; время импульса $t_n = 0,3$ с; погонная энергия ~ 1606 кДж/м; скорость наплавки $V_n = 6$ м/ч.

Возможность получения необходимого состава покрытий определяется исходной концентрацией элементов и степенью усвоения этих элементов металлом при формировании капли и ванны расплава.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характерные осциллограммы тока и напряжения на дуге при наплавке электродами с покрытием приведены на рис. 1.

Исследования микроструктуры проводились в центральных частях первого и второго слоев наплавки электродами, в переходной зоне от покрытия к основному металлу – на участках перегрева и нормализации.

Микроструктура основного металла 09Г2С представляет собой перлит и феррит с величиной зерна $\sim 4,7$ мкм. Объемная доля перлита составляет ~ 20 %.

При импульсно-дуговой наплавке покрытий электродами формируется мелкодендритная структура наплавленного металла. Микроструктура зоны термического влияния (ЗТВ) состоит после наплавки из нескольких участков: зона перегрева с видманштеттовой структурой и зона нормализации с характерной мелкозернистой феррито-перлитной структурой.

В исходном состоянии основной металл – сталь 09Г2С имеет твердость ~ 2500 МПа. Твердость материала покрытия, наплавленного покрытыми электродами, равна примерно 2700 – 3000 МПа. Твердость ЗТВ составляет 2100 – 2300 МПа. В результате применения импульсного режима наплавки размер зерна покрытия и ширина ЗТВ меньше. Это свидетельствует о повышении качества наплавленного покрытия. При нанесении

покрытия на режиме постоянного тока температура нагрева наплавочной ванны выше, что, как следствие, вызывает рост зерна. При нанесении покрытия на импульсных режимах путем направленного низкочастотного высокоэнергетического воздействия электрической дуги на формируемый металл, за счет постоянного возвратно-поступательного движения расплава с частотой модуляции тока формируется более однородная структура, имеющая меньшие размеры структурных составляющих. Такое формирование металла покрытия является следствием активного перемешивания расплава, что способствует выравниванию его тепло содержания за счет управления движением металла в наплавочной ванне, а также регулирует количество расплавленного металла под дугой к началу действия импульса тока, способствуя тем самым уменьшению глубины проплавления. Периодическое движение металла в расплаве способствует также более равномерному распределению легирующих элементов по объему расплавленного металла. Использование технологии

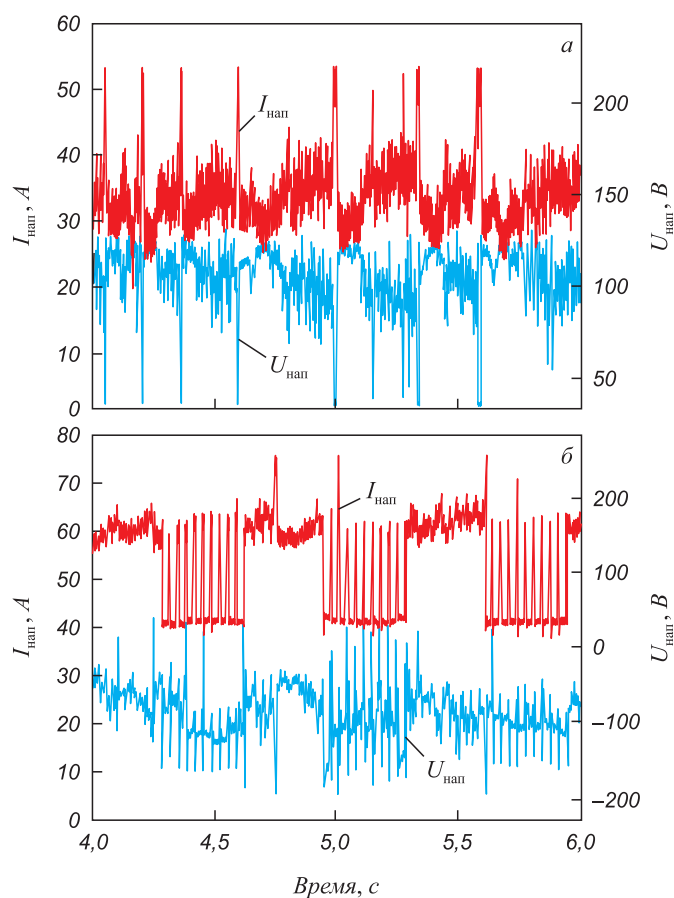


Рис. 1. Характерные осциллограммы тока и напряжения при наплавке электродами с покрытием:
а – режим наплавки на постоянном токе, б – режим наплавки с модуляцией тока; $I_{\text{нап}}$ – ток наплавки, $U_{\text{нап}}$ – напряжение наплавки

Fig. 1. Typical oscillograms of current and voltage when surfacing with coated electrodes:

а – mode of surfacing with direct current, б – mode of surfacing with modulated current; $I_{\text{нап}}$ – current of surfacing, $U_{\text{нап}}$ – voltage of surfacing

импульсно-дуговой наплавки покрытыми электродами позволяет через программируемый ввод тепла в зону покрытия управлять процессами кристаллизации расплавленного металла и, как следствие, измельчать структуру металла покрытия и повышать его свойства. При наплавке углеродистых сталей упрочнение происходит за счет формирования нового поверхностного слоя. Свойства наплавленной поверхности сталей зависят от типа легирующих элементов, определяющих фазовый состав, границы фазовых переходов и механические характеристики. На структуру наплавленного металла и его свойства оказывают влияние технологические параметры процесса наплавки электродами, количество и размер легирующих элементов. На свойства покрытий, наплавленных электродами, оказывает влияние содержание углерода, сохранность в процессе наплавки упрочняющих фаз (карбидов, боридов и т.д.), размеры и их расположение в матричном материале. Наплавленные электродами Т-590 покрытия имеют ледебуритную структуру (рис. 2).

В процессе термомеханического цикла наплавки покрытий электродами может иметь место образование трещин (горячих и холодных), что приводит к снижению свойств, которые тем ниже, чем выше структурная

неоднородность в наносимом покрытии. При измельчении структуры и снижении структурной неоднородности наоборот, свойства покрытий повышаются. Измельчение структуры покрытия, полученного с применением импульсного режима, приводит к повышению его свойств: твердости, износостойкости и других показателей [1 – 5].

Это может происходить за счет изменения температуры в зоне действия источника тепла в процессе наплавки, часто превышающей температуру плавления даже тугоплавких соединений при наплавке на постоянном токе. Как следствие, это приводит к их растворению в расплаве ванны. В случае применения импульсного режима наплавки может быть достигнуто формирование металла, независимо от марки применяемого электрода, с более однородной и мелкозернистой структурой. График изменения микротвердости покрытий электродом Т-590, наплавленных на импульсном режиме, зоны термического влияния и основы представлен на рис. 3.

Усредненное значение микротвердости металла покрытия составляет выше 5000 МПа. Аналогичная зависимость наблюдается после наплавки на режиме постоянного тока, только с меньшими значениями микротвердости покрытия.

Выводы

Изучено влияние модифицирования электродуговым воздействием при импульсно-дуговой наплавке электродами Т-590 на структуру и твердость покрытий. Модифицирование материалов наплавляемых покрытий на низкоуглеродистую сталь 09Г2С позволяет повы-

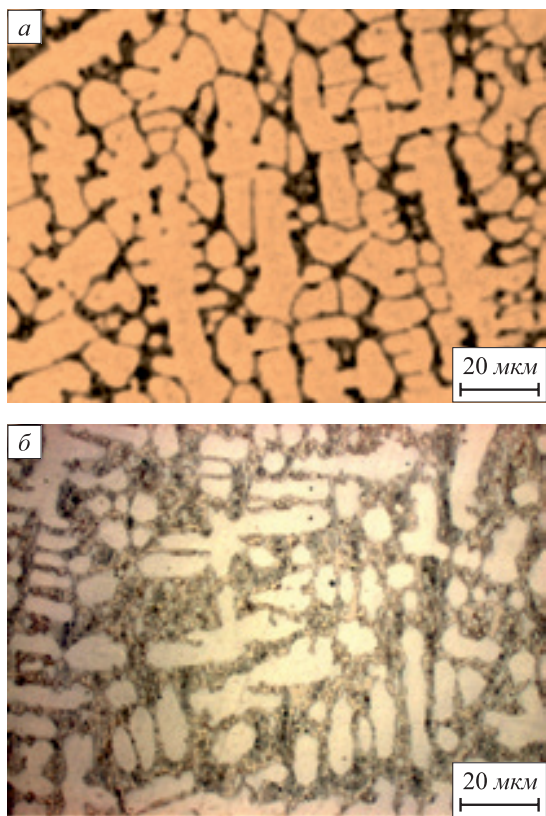


Рис. 2. Структура наплавленного покрытия электродами Т-590 на режимах: постоянного тока (а); импульсного изменения энергетических параметров режима (б)

Fig. 2. Structure of the coating deposited with electrodes T-590 on the modes: of DC (a), of pulse changes in the mode energy parameters (b)

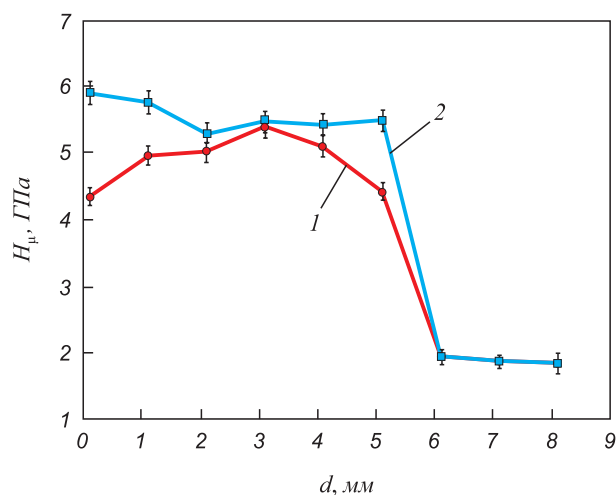


Рис. 3. Изменение микротвердости по глубине стальной основы и наплавленных покрытий:

1 – на постоянном токе; 2 – с импульсным изменением энергетических параметров режима

Fig. 3. Change in microhardness along the depth of the steel base and the deposited coatings:

1 – at DC, 2 – with a pulse change in the mode energy parameters

ситель однородность и дисперсность структуры, а также твердость. Использование метода импульсно-дуговой наплавки покрытий, наплавленных электродами Т-590, дает возможность сохранять в них упрочняющие фазы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2004. Vol. 375 – 377. No. 1. P. 213 – 218.
2. Zhou Y.J., Zhang Y., Wang F.J. etc. Effect of Cu addition on the microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNiTi0.5 solid-solution alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2008. Vol. 466. No. 1 – 2. P. 201 – 204.
3. Guo Sheng, Chun Ng, Jian Lu, Liu C. T. Effect of valence electron concentration on stability of FCC or BCC phase in high entropy alloys // *Journal of Applied Physics*. 2011. Vol. 109. No. 10. Article 103505.
4. Guo Sheng, Liu C.T. Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase // *Progress in Science: Materials International*. 2011. Vol. 21. No. 6. P. 433 – 446.
5. Yeh Jien-Wei, Chang Shou-Yi, Hong Yu-Der etc. Anomalous decrease in X-ray diffraction intensities of Cu–Ni–Al–Co–Cr–Fe–Si alloy systems with multi-principal elements // *Materials Chemistry and Physics*. 2007. Vol. 103. No. 1. P. 41 – 46.
6. Mahlalela S.S., Pistorius P.G.H. Microstructural characterization of laser beam and gas tungsten arc welded zirconium-2.5Nb // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017. Vol. 117. No. 10. P. 947 – 953.
7. Gao X.-L., Liu J., Zhang L.-J., Zhang J.-X. Effect of the overlapping factor on the microstructure and mechanical properties of pulsed Nd: YAG laser welded Ti6Al4V sheets // *Materials Characterization*. 2014. Vol. 93. P. 136 – 149.
8. Ram V., Kohn G., Stern A. CO₂ laser beam weldability of Zircaloy-2 // *Welding Journal*. 1986. Vol. 65. No. 7. P. 33 – 38.
9. Wan Q., Bai X., Zhang X. Impact of high dose krypton ion irradiation on corrosion behavior of laser beam welded Zircaloy-4 // *Materials Research Bulletin*. 2006. Vol. 41. No. 2. P. 387 – 395.
10. Song K.-N., Kim S.-S., Lee S.-H., Lee S.-B. Laser welding unit for intersection line welding of spacer grid inner straps and its appli-

cation // *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*. 2009. Vol. 4. No. 1. P. 11 – 17.

11. Song K.-N., Lee S.-H. Effect of weld properties on the crush strength of the PWR spacer grid // *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2012. Vol. 2012. Spec. issue. Article 540285.
12. Jeong D.H., Kim J.H. Fatigue characteristics of laser welded Zircaloy thin sheet // *Int. J. Mod. Phys.: Conference Series*. 2012. Vol. 6. P. 367 – 372.
13. Han Q., Kim D., Kim D. etc. Laser pulsed welding in thin sheets of Zircaloy-4 // *J. Mater. Process. Technol.* 2012. Vol. 212. P. 1116 – 1122.
14. Kim S., Lee W., Kim D. One-step distortion simulation of pulsed laser welding with multi-physics information // *Int. Journal of Simulation Modelling, Model.* 2015. Vol. 1. P. 85 – 97.
15. Cai C., Tao W., Li L., Chen Y. Weld bead formation and corrosion behavior of pulsed laser welded zirconium alloy // *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 77. P. 621 – 628.
16. Cai C., Li L., Tao W. etc. Weld bead size, microstructure and corrosion behavior of zirconium alloys joints welded by pulsed laser spot welding // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016. Vol. 25. P. 3783 – 3792.
17. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Grigoryeva A.A. etc. Distribution of residual stresses in welded joints in 09G2S steel produced by adaptive pulsed-arc welding // *Welding International*. 2015. Vol. 29. No. 2. P. 131 – 134.
18. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P. Effect of the energy parameters of the welding process on the structure and properties of welded joints in low-alloy steels // *Welding International*. 2013. Vol. 27. No. 9. P. 678 – 680.
19. Bezborodov V.P., Saraev Y.N. Use of coatings for protection of welded joints of steels, their structure and properties // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 857. No. 1. Article 012005.
20. Bezborodov V.P., Saraev Yu.N. Microstructure and mechanical properties of eutectic nickel alloy coatings // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. «International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems»*. 2016. Vol. 124. Article 012119.

Поступила в редакцию 16 октября 2019 г.

После доработки 2 декабря 2019 г.

Принята к публикации 24 января 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 6, pp. 469–473.

STRUCTURE AND HARDNESS OF WEAR-RESISTANT COATINGS WITH LOW-FREQUENCY CURRENT MODULATION DEPOSITED ON LOW CARBON STEEL

Yu.N. Saraev, V.P. Bezborodov, M.V. Perovskaya, V.M. Semenchuk

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia

Abstract. Influence of the modes of manual electric arc surfacing of coatings with T-590 electrodes on low-alloy steel 09G2S on their structure and hardness was investigated. It is shown that the pulsed arc surfacing of coatings by electrodes forms a fine-dendritic structure of the deposited metal. Microstructure of the heat-affected zone after surfacing consists of several sections: the overheating zone with a widmanstett structure and the normalization zone with a characteristic fine-grained ferrite-perlite structure. In the initial state, the base metal (steel 09G2S) has a hardness of ~2500 MPa. The hardness of the deposited coating material due to strong mixing with the steel metal is ~2700 – 3000 MPa, and of thermal impact zone: 2100 – 2300 MPa. When applying the coating on DC mode, heating temperature of the surfacing bath is higher; this, as a consequence, causes grain growth. When coating on pulse modes, a structure with smaller component

sizes is formed by directed low-frequency high-energy impact of the electric arc on the formed metal and due to the constant reciprocating motion of the melt with the frequency of current modulation. It was established that the application of the pulse-arc surfacing method allows preserving the previously formed hardening phases in the deposited coatings.

Keywords: steel, structure, property, coating, surfacing, wear resistance, electrode, arc, source, element.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-469-473

REFERENCES

1. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2004, vol. 375-377, no. 1, pp. 213-218.
2. Zhou Y.J., Zhang Y., Wang F.J., Wang Y.L., Chen G.L. Effect of Cu addition on the microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNiTi0.5 solid-solution alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008, vol. 466, no. 1-2, pp. 201–204.

3. Guo Sheng, Chun Ng, Jian Lu, Liu C. T. Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys. *Journal of Applied Physics*. 2011, vol. 109, no. 10, article 103505.
 4. Guo Sheng, Liu C. T. Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase. *Progress in Science: Materials International*. 2011, vol. 21, no. 6, pp. 433–446.
 5. Yeh Jien-Wei, Chang Shou-Yi, Hong Yu-Der, Chen Swe-Kai, Lin Su-Jien. Anomalous decrease in X-ray diffraction intensities of Cu–Ni–Al–Co–Cr–Fe–Si alloy systems with multi-principal elements. *Materials Chemistry and Physics*. 2007, vol. 103, no. 1, pp. 41–46.
 6. Mahlalela S.S., Pistorius P.G.H. Microstructural characterization of laser beam and gas tungsten arc welded zirconium-2.5Nb. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017, vol. 117, no. 10, pp. 947–953.
 7. Gao X.-L., Liu J., Zhang L.-J., Zhang J.-X. Effect of the overlapping factor on the microstructure and mechanical properties of pulsed Nd: YAG laser welded Ti6Al4V sheets. *Materials Characterization*. 2014, vol. 93, pp. 136–149.
 8. Ram V., Kohn G., Stern A. CO₂ laser beam weldability of Zircaloy-2. *Welding Journal*. 1986, vol. 65, no. 7, pp. 33–38.
 9. Wan Q., Bai X., Zhang X. Impact of high dose krypton ion irradiation on corrosion behavior of laser beam welded Zircaloy-4. *Materials Research Bulletin*. 2006, vol. 41, no. 2, pp. 387–395.
 10. Song K.-N., Kim S.-S., Lee S.-H., Lee S.-B. Laser welding unit for intersection line welding of spacer grid inner straps and its application. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*. 2009, vol. 4, no. 1, pp. 11–17.
 11. Song K.-N., Lee S.-H. Effect of weld properties on the crush strength of the PWR spacer grid. *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2012, vol. 2012, Spec. issue, article 540285.
 12. Jeong D.H., Kim J.H. Fatigue characteristics of laser welded Zircaloy thin sheet. *Int. J. Mod. Phys.: Conference Series*. 2012, vol. 6, pp. 367–372.
 13. Han Q., Kim D., Kim D., Lee H., Kim N. Laser pulsed welding in thin sheets of Zircaloy-4. *J. Mater. Process. Technol.* 2012, vol. 212, pp. 1116–1122.
 14. Kim S., Lee W., Kim D. One-step distortion simulation of pulsed laser welding with multi-physics information. *Int. Journal of Simulation Modelling*. 2015, vol. 1, pp. 85–97.
 15. Cai C., Tao W., Li L., Chen Y. Weld bead formation and corrosion behavior of pulsed laser welded zirconium alloy. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, vol. 77, pp. 621–628.
 16. Cai C., Li L., Tao W., Peng G., Wang X. Weld bead size, microstructure and corrosion behavior of zirconium alloys joints welded by pulsed laser spot welding. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016, vol. 25, pp. 3783–3792.
 17. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Grigoryeva A.A., Golikov N.I., Dmitriev V.V., Sannikov I.I. Distribution of residual stresses in welded joints in 09G2S steel produced by adaptive pulsed-arc welding. *Welding International*. 2015, vol. 29, no. 2, pp. 131–134.
 18. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P. Effect of the energy parameters of the welding process on the structure and properties of welded joints in low-alloy steels. *Welding International*. 2013, vol. 27, no. 9, pp. 678–680.
 19. Bezborodov V.P., Saraev Y.N. Use of coatings for protection of welded joints of steels, their structure and properties. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017, vol. 857, no. 1, article 012005.
 20. Bezborodov V.P., Saraev Yu.N. Microstructure and mechanical properties of eutectic nickel alloy coatings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems"*. 2016, vol. 124, article 012119.
- Acknowledgements.** The work was performed as part of the Basic Scientific Research Programs of the State Academies of Sciences for 2018–2020, project III.23.2.1.
- Information about the authors:**
- Yu.N. Saraev**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Composite Materials
- V.P. Bezborodov**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Composite Materials (val@ispm.s.tsc.ru)
- M.V. Perovskaya**, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Laboratory of Composite Materials
- V.M. Semenchuk**, Engineer of the Laboratory of Composite Materials

Received October 16, 2019
 Revised December 2, 2019
 Accepted January 24, 2020

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛА ПО ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЛУОГРАНИЧЕННОГО ТЕЛА

*Соколов А.К., д.т.н., профессор кафедры безопасности
жизнедеятельности (sokolov@bjd.ispu.ru)*

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
(153003, Россия, Иваново, ул. Рабфаковская, 34)

Аннотация. Предложено математическое описание процесса теплопроводности в полуограниченном теле и сравнительно простой алгоритм численно-аналитического расчета температуропроводности a_t материала путем решения обратной задачи теплопроводности. Для решения задачи необходимы значения температур поверхностей неограниченной пластины, полученные в результате теплофизического эксперимента. Пластину можно условно считать полуограниченным телом, пока число Фурье $Fo \leq Fo_k$ ($Fo_k \approx 0,04 - 0,06$). Принято, что распределение температур по сечению прогретого слоя пластины R достаточно точно описывается степенной функцией, показатель которой линейно зависит от числа Фурье. Получено простое алгебраическое выражение для расчета a_t в интервале времени Δt по динамике изменения температуры $T(R_n, \tau)$ поверхности пластины толщиной R_n , нагреваемой при граничных условиях второго рода. Температура второй поверхности пластины $T(0, \tau)$ используется только для определения момента времени окончания эксперимента τ_k . Момент времени τ_k , в который температурное возмущение достигнет адиабатной поверхности $x = 0$, можно установить по условию $T(R_n, \tau_k) - T(0, \tau = 0) = 0,1$ К. Предложена методика приближенного расчета динамики изменения глубины прогретого слоя R по значениям R_n , τ_k и τ . Вычисление a_t для интервала времени Δt сводится к итерационному решению системы из трех алгебраических уравнений путем подбора числа Фурье, например, используя стандартную процедуру Microsoft Excel. Выполнена оценка точности расчета a_t по тестовому (исходному) температурному полю пластины из огнеупорного материала толщиной $R_n = 0,05$ м, рассчитанному методом конечных разностей при начальном условии $T(x, \tau = 0) = 300$ ($0 \leq x \leq R_n$) при радиационно-конвективном нагреве. Время нагрева τ_k составило 260 с. Расчет $a_{t,i}$ выполнен для десяти моментов времени $\tau_{i+1} = \tau_i + \Delta t$, $\Delta t = 26$ с. Среднемассовая температура прогретого слоя за все время τ_k составила $T = 302$ К. Среднеарифметическое абсолютное отклонение a_t ($T = 302$) от исходного значения a_n при такой же температуре составило 2,8 %. Применение метода позволит значительно упростить проведение и обработку экспериментов для определения температуропроводности материалов.

Ключевые слова: эксперимент, полуограниченное тело, температурное поле, математическое описание, обратная задача, температуропроводность, численно-аналитический метод, огнеупорный материал.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-474-480

Теплофизические характеристики материалов используются при моделировании температурных полей в элементах оборудования, материалов, подвергающихся тепловой обработке или использующихся в ограждениях печей. Достоверность математического моделирования температурных полей в значительной степени зависит от точности значений теплофизических характеристик материалов.

Задачи определения теплофизических характеристик материалов не теряют своей актуальности, поскольку появляются новые материалы, число которых непрерывно растет, изменяются свойства известных материалов в ходе их эксплуатации.

Методы определения теплофизических характеристик материалов в основном основаны на решениях обратных задач теплопроводности по параметрам температурных полей, полученным в результате теплофизического эксперимента.

Обзор и анализ методов определения температуропроводности по нестационарным температурным полям дан в монографиях В.М. Фокина и В.Н. Чернышова

ва [1], Н.П. Жукова и Н.Ф. Майникова [2]. В работе [1] представлена методика для комплексного определения теплофизических характеристик строительных материалов и изделий методом неразрушающего контроля. Обширные обзоры методов решения обратных задач теплопроводности представлены в [3, 4]. В работе [5] показаны решения обратных задач, включая оценку изменения во времени межфазной проводимости между литьем и пресс-формой во время затвердевания алюминия. В монографиях [6, 7] описана методика определения теплофизических свойств материалов металлургического производства [6] и высокопористых строительных материалов [7].

В работах [8, 9] приведены аналитические решения обратной задачи теплопроводности для полуограниченного тела.

Многие методы, описанные в [1, 2], требуют довольно строгого соблюдения граничных условий теплообмена, что усложняет технику проведения эксперимента. Большая часть методов [7 – 20] основана на использовании сложного математического аппарата:

специальных функций, конечных элементов, процедур оптимизации и приближения, решения систем дифференциальных и алгебраических уравнений и др. Применение таких методов в инженерной практике вызывает серьезные затруднения, так как требует специальной физико-математической подготовки.

В работах [21 – 25] для определения величин теплофизических характеристик по известному температурному полю предложено применять довольно простой (инженерный) метод численно-аналитического моделирования процессов теплопроводности, описанный в [23 – 25]. В этом методе используются аналитические решения дифференциального уравнения теплопроводности в виде алгебраических выражений, полученные для расчетного интервала времени Δt .

В данной работе предлагается сравнительно простой метод определения температуропроводности a_T по динамике температур двух поверхностей пластины $T(R_n, \tau)$ и $T(0, \tau)$ толщиной R_n , м. Такой подход позволит значительно упростить подготовку и проведение экспериментального нагрева тела.

Значения a_T определяются решением обратной задачи теплопроводности по математической модели полуграниченного тела в форме неограниченной пластины, которая в начальной стадии нагрева при числе Фурье меньше $Fo \approx 0,06$ может считаться полуграниченным телом.

Для создания адиабатных условий на поверхности рабочей пластины $T(x=0, \tau)$ предлагается использовать вторую смежную пластину с большей термической массивностью, например пластину из того же материала, но большей толщины. В плоскости сопряжения, в которой установлена вторая термopapa (рис. 1), температура изменится только в момент времени τ_k , когда температурное возмущение в рабочей пластине достигнет плоскости сопряжения $x=0$. Температурное

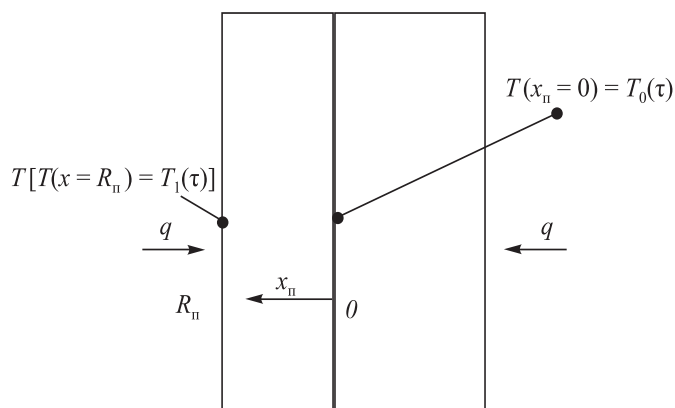


Рис. 1. Схема расположения пластины толщиной R_n , у которой измеряются температуры граней $T(x_n = R_n)$ и $T(x_n = 0)$, и пластины для создания адиабатных условий на поверхности $x_n = 0$

Fig. 1. Layout of the plate with thickness R_n , for which the temperature of the faces $T(x_n = R_n)$ is measured, and $T(x_n = 0)$ and the plate for creation of adiabatic conditions on the surface of the $x_n = 0$

возмущение от второй пластины достигнет плоскости сопряжения позднее, при $\tau > \tau_k$.

Измерения температур $T(R_n, \tau)$ и $T(x=0, \tau)$ выполняются, пока $\tau \leq \tau_k$. По одному экспериментальному нагреву при начальном условии $T(x_n, \tau=0) = T_n (0 \leq x_n \leq R_n)$ можно рассчитать только одно значение $a_T (T \approx T_n)$. Для получения табличной зависимости $a_T(T)$ потребуются несколько опытов с другими начальными условиями.

Рассмотрим математическое описание температурного поля неограниченной пластины толщиной R_n , нагреваемой только со стороны $x_n = R_n$. Примем, что в моменты времени τ_i , в которые измеряется температура поверхности $T(R_n, \tau_i) = T_{1,i}$, распределение температур в прогревом слое толщиной R описывается степенной функцией

$$T(X) = a_0 + a_1 X^n, \quad 0 \leq X \leq 1, \quad X = \frac{x}{R}. \quad (1)$$

Запишем дифференциальное уравнение теплопроводности только для прогретого слоя пластины

$$c \frac{\partial T}{\partial \tau}(X, \tau) = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial X} \lambda \frac{\partial T}{\partial X}(X, \tau) \quad (2)$$

с начальным

$$T(X, \tau=0) = T_n, \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (3)$$

и граничными условиями:

$$\frac{\partial T}{\partial X}(X=0, \tau) = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial X}(1, \tau) = \frac{R}{\lambda} q, \quad (5)$$

где c – объемная теплоемкость, Дж/(м³·К); x – координата, м; X – относительная координата, $X = \frac{x}{R}$; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); q – удельный поток теплоты на поверхность $X=1$ ($x=R, x_n=R_n$), Вт/м².

Отметим, что в непрогретом слое $0 < x_n < R_n - R$, пока $\tau < \tau_k$ температура будет равна начальной, следовательно

$$T(x=0) = T(X=0) = T(x_n=0) = T_n = \text{const.}$$

На рис. 2. показано распределение температур по толщине пластины для нескольких моментов времени, вычисленное по уравнению (1) для примера расчета, приведенного в конце данной работы.

В общем случае теплоемкость, теплопроводность и удельный поток теплоты могут изменяться во времени и зависеть от температур $T(X=1, \tau)$ и условий теплообмена.

Пусть по данным теплофизического эксперимента известны температуры поверхностей пластины $T_1(\tau_{i+1}) = T(x_n = R_n) = T(x=R) = T(X=1)$ и $T_0(\tau_{i+1}) = T(x=0) =$

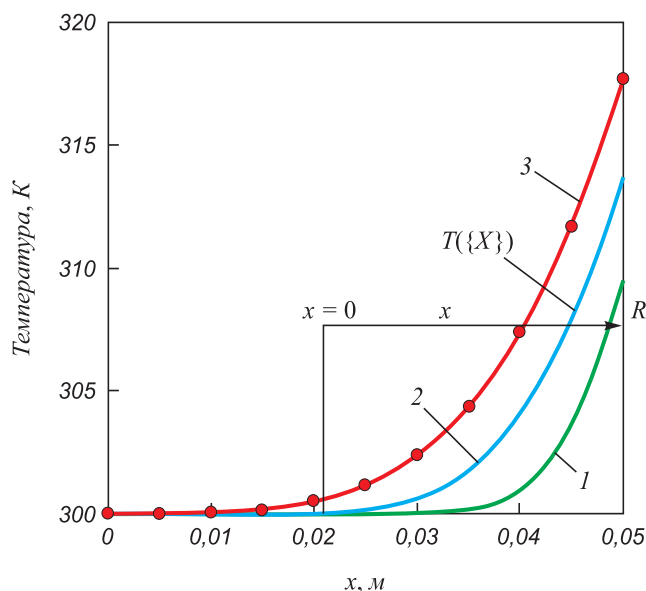


Рис. 2. Распределение температур по толщине пластины для моментов времени $\tau = 52$ (1), 130 (2), 260 (3) с и глубина прогрева пластины для $\tau = 130$ с ($\tau_k = 260$ с)

Fig. 2. Temperature distribution over the plate thickness for time points $\tau = 52$ (1), 130 (2), 260 (3) s and the plate warm-up depth for $\tau = 130$ s ($\tau_k = 260$ s)

$= T(X=0) = T(x_n=0)$ соответственно при $X=1$ и $X=0$ в моменты времени τ_i ($i = 0, 1, 2, \dots$).

При описании распределения температур по толщине прогретого слоя в конце расчетного интервала времени $\Delta\tau_{i+1} = \tau_{i+1} - \tau_i$ функцией (1) [21–24] граничное условие (5) запишется в виде

$$\frac{\partial T}{\partial X}(X=1, \tau) = \frac{R}{\lambda} q = na_1. \quad (6)$$

Из него получим выражение для определения q :

$$q = \frac{\lambda}{R} na_1. \quad (7)$$

Составим уравнение баланса теплоты прогретого слоя пластины ($0 \leq x \leq R$, $0 \leq X \leq 1$) для расчетного i -го интервала времени $\Delta\tau$:

$$cR(T_{\text{ср}} - T_{\text{ср,ни}}) = q\Delta\tau, \quad (8)$$

где $T_{\text{ср,ни}}$, $T_{\text{ср}}$ – среднемассовые температуры прогретого слоя R в начале $T_{\text{ср,ни}}$ и конце $T_{\text{ср}}$ расчетного интервала времени $\Delta\tau$ (здесь и далее для упрощения записи пока не используются индексы, обозначающие номер момента времени).

Для распределения температур (1) величина $T_{\text{ср}}$ в конце интервала $\Delta\tau$ найдется интегрированием:

$$T_{\text{ср}} = \int_0^1 T(X) dX = \int_0^1 (a_0 + a_1 X^n) dX = a_0 + \frac{a_1}{n+1}. \quad (9)$$

Преобразуем уравнение баланса теплоты (8), подставив в него выражения (7) и (9) для q и $T_{\text{ср}}$:

$$a_0 + \frac{a_1}{n+1} - T_{\text{ср,ни}} = \frac{\lambda \Delta\tau}{cR^2} na_1. \quad (10)$$

Принимая во внимание, что температуропроводность a_T равна отношению λ и c ($a_T = \frac{\lambda}{c}$), из уравнения (10) получим выражение для определения температуропроводности:

$$a_T = \frac{a_0 + \frac{a_1}{n+1} - T_{\text{ср,ни}}}{na_1 \frac{\Delta\tau}{R^2}}. \quad (11)$$

Коэффициенты a_0 и a_1 в формуле (11) легко найти по известным из эксперимента температурам $T_0(\tau_{i+1})$ и $T_1(\tau_{i+1})$ решением системы двух уравнений (1), записанных для $X=0$ и $X=1$:

$$a_0 = T_0(\tau_{i+1}); \quad a_1 = T_1(\tau_{i+1}) - T_0(\tau_{i+1}). \quad (12)$$

В течение времени, пока пластину можно считать полуграничным телом, температура $T_0(\tau) = T(X=0, \tau_{i+1}) = T_n$ останется неизменной ($\tau < \tau_k$), так как она находится на границе прогретого и непрогретого слоев пластины. Тогда коэффициенты a_0 и a_1 определятся по формулам

$$a_0 = T_n; \quad a_1 = T_1(\tau_{i+1}) - T_n (\tau < \tau_k), \quad (13)$$

где τ_k – момент времени, в который температура $T_0(\tau_k)$ превысит T_n на ΔT .

Величина τ_k определится по условию

$$T_0(\tau_k) = T_n + \Delta T, \quad (14)$$

где ΔT – чувствительность или погрешность измерения $T(x_n=0, \tau) = T_0$ (в ходе эксперимента следует лишь засечь время, когда $T(x_n=0, \tau) = T_0$ возрастет на величину более, чем ΔT (см. рис. 2)).

Таким образом, получено сравнительно простое выражение (11) для определения a_T для расчетного интервала $\Delta\tau$ времени.

В формуле для расчета a_T имеются пока неизвестные параметры:

- n (показатель степени в уравнениях (1) и (11);
- R – толщина прогретого слоя, зависящая от числа Fo , которое, в свою очередь, зависит от a_T , R и τ :

$$Fo = \frac{a_T \tau}{R^2}. \quad (15)$$

Основная задача работы заключалась в установлении взаимосвязи параметров n , R и Fo с известной из эксперимента функцией $T_1(\tau)$.

Для получения приемлемого решения обратной задачи рассмотрены и опробованы различные способы определения n , R и Fo .

Возможные методы расчета n по динамике температурного поля рассмотрены в работах [23, 25]. Значения n можно определить [23, 25]:

- по функции $n(Fo)$;
- по трем температурам $T(X, \tau)$, $X = 0, Z, 1$ ($0 < Z < 1$);
- по решению дифференциального уравнения теплопроводности для плоскости пластины для $X = 1$;
- по двум решениям дифференциального уравнения теплопроводности для $X = 1$ и $0 \leq X \leq 1$ [23, 25].

Для принятых условий в большей степени подошла функция $n(Fo)$ [23, 25], которая была аппроксимирована двумя выражениями:

$$n(Fo) = 8,2052 - 82,74Fo, 0,025 \leq Fo \leq 0,05; \quad (16)$$

$$n(Fo) = 0,7244 Fo^{-0,577}, 0,01 \leq Fo \leq 0,075. \quad (17)$$

Функция (16) построена по двум точкам $n(Fo_1 = 0,025)$ и $n(Fo_2 = 0,05)$. Закономерность изменения $R(\tau_i)$ удалось определить, допустив, что число Fo и теплопроводность a_t для всех моментов времени τ_i постоянны. Тогда из соотношений

$$Fo = \frac{a_{t,1} \tau_1}{R_1^2} = \dots = \frac{a_{t,i} \tau_i}{R_i^2} = \frac{a_{t,i+1} \tau_{i+1}}{R_{i+1}^2} = \dots = \frac{a_{t,k} \tau_{i,k}}{R_{i,k}^2}$$

получим

$$R_{i+1}^2 = R_i^2 \frac{\tau_{i+1}}{\tau_i}; R_i^2 = R_{\pi}^2 \frac{\tau_i}{\tau_k}. \quad (18)$$

Поскольку толщина пластины R_{π} известна, а момент времени τ_k определится по условию $T(0, \tau_k) - T_n = \Delta T$ ($\Delta T \approx 0,1$ К), то по формуле (18) можно рассчитать толщину прогретого слоя R_i для каждого момента времени τ_i , в который выполнялось измерение температуры $T_1(\tau_i)$.

Коэффициент теплопроводности λ_t можно рассчитать по преобразованной формуле (7)

$$\lambda_t = \frac{qR}{na_1}, \quad (19)$$

но только для тех экспериментов, в которых будет измерен удельный поток теплоты q .

Процедуру определения теплопроводности a_t рассмотрим на примере расчета a_t по температурам поверхности пластины $R_{\pi} = 0,05$ м, нагреваемой от $T_n = 300$ К, если $\tau_i = 0, 26, 52, \dots$ с, $T_1(\tau_i) = 300, 307,1, 309,5, \dots$ К.

1. Пусть по достижению значения температуры $T(x_{\pi} = 0, \tau_k) = 300,1$ К определено $\tau_k = 260$ с.

2. Вычислим по уравнению (18) толщину прогретого слоя R_1 для $\tau_1 = 26$ с

$$R_1 = R_{\pi} \left(\frac{\tau_1}{\tau_k} \right)^{1/2} = 0,05 \left(\frac{26}{260} \right)^{1/2} = 0,0158 \text{ м.}$$

3. Определим коэффициенты a_0 и a_1 по уравнению (12)

$$a_0 = T_n = 300, a_1 = T_1(\tau_{i+1}) - T_n = 307,1 - 300,0 = 7,1.$$

3. Решим нелинейную систему из трех уравнений путем итерационного подбора числа Fo

$$n(Fo) = 8,2052 - 82,74Fo;$$

$$a_t = \frac{a_0 + \frac{a_1}{n+1} - T_{\text{ср,ни}}}{na_1 \frac{\Delta \tau}{R^2}} = \frac{300 + \frac{7,1}{n+1} - 300}{7,1n \frac{(26-0)}{0,0158^2}};$$

$$Fo = a_t \frac{\tau_1}{R_1^2} = a_t \frac{26}{0,0158^2}.$$

Зависимость $n(Fo)$ описывалась формулой (16), так как применение (17) усложняло итерационный процесс.

Для нахождения Fo с точностью 0,0001 на каждом интервале времени использовалась функция «Сервис»/«Подбор параметра» Microsoft Excel. Решением системы уравнений было получено $Fo = 0,0516$, а затем определены $n = 3,934$ и $a_t = 4,954 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

4. Рассчитаем среднемассовую температуру прогретого слоя $R_1 = 0,0158$ по уравнению (9)

$$T_{\text{ср,1}} = 300 + \frac{7,1}{3,934 + 1} = 301,4,$$

среднемассовую температуру всей пластины

$$T_{\text{ср,пл}} = \frac{T_{\text{ср,1}} R_1 + T_n (R_{\pi} - R_1)}{R_{\pi}} = \frac{301,4 \cdot 0,0158 + 300(0,05 - 0,0158)}{0,05} = 1200,7,$$

толщину прогретого слоя в конце второго интервала $R_2 = 0,05 \left(\frac{52}{260} \right)^{1/2} = 0,0224$ и среднемассовую температуру в начале второго интервала времени

$$T_{\text{ср,ни,2}} = \frac{T_{\text{ср,1}} R_1 + T_n (R_2 - R_1)}{R_2} = \frac{301,4 \cdot 0,0158 + 300(0,0224 - 0,0158)}{0,0224} = 301,0 \text{ К.}$$

Параметр $T_{\text{ср,пл}}$ необязательный, его можно использовать для контроля правильности расчета, так как при $\tau = \tau_k$ должно выполняться равенство $T_{\text{ср,пл}} = T_{\text{ср,к}}$.

5. Расчеты второго и последующих периодов нагрева выполняются аналогично, начиная с п. 3. Например,

для второго периода с $\tau_2 = 52$ получены следующие результаты: $\Delta\tau_2 = 52 - 26 = 26$ с; $a_0 = 300$; $a_1 = 9,5$ К; $Fo = 0,0532$; $n = 3,805$; $a_T = 5,103 \cdot 10^{-7}$; $T_{ср, 2} = 302,0$; $T_{ср, пл} = 300,9$; $R_3 = 0,0274$; $T_{ср, нн, 3} = 301,6$.

Для оценки точности метода расчета теплопроводности a_T решением обратной задачи теплопроводности проведено его тестирование. Для тестирования использовалось заранее рассчитанное температурное поле огнеупорного материала с заданными теплофизическими свойствами $a_{и}$, c и $\lambda_{и}$:

$$\lambda_{и}(T) = 0,7416 + 0,00069T, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \quad (21)$$

$$c_{и}(T) = 2100 \cdot (7,688 + 0,25T), \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}; \quad (22)$$

$$a_{и}(T) = 4,701 \cdot 10^{-7} + 2,347 \cdot 10^{-10}T - 3,624 \cdot 10^{-14}T^2, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (23)$$

Расчет температурного поля неограниченной пластины $R_{и} = 0,05$ м выполнен при $T_{и} = 300$ К, температуре газа $T_r = 350$ К и коэффициентах радиационного $d = 4 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) и конвективного $\alpha = 30$ Вт/(м²·К) теплообмена с помощью диалоговой программы TRT [23] для моделирования температурных полей.

Решением обратной задачи теплопроводности следовало определить a_T , а затем сравнить их с исходными значениями $a_{и}$ (23), при которых рассчитано исходное (тестовое) температурное поле.

Результаты расчета $T(X=1) = T_1(\tau_i)$, $T(X=0) = T(x_{и}=0) = T_0(\tau_i)$, $T_{ср, пл}(\tau_i)$ приведены в таблице. В следующих строках таблицы приведены результаты определения a_T предложенным методом.

Температура $T(x_{и}=0, \tau) = T_0(\tau)$ изменилась на 0,1 К в момент времени $\tau_k = 260$ с (см. таблицу). Коэффициенты a_0 и a_1 определены по уравнению (12), а величины R_i рассчитаны по значению $\tau_k = 260$ с и τ_i по (18). Величина ΔFo_j определялась как абсолютная разность между j -м Fo_j и последующим Fo_{j+1} приближением. Исходные и рассчитанные по уравнению (20) значения $T_{ср, пл}$ практически совпали, следовательно функция (1) довольно точно описывала распределение температур по толщине прогретого слоя пластины (см. рис. 2).

Среднеарифметические величины десяти значений a_T были отнесены к среднемассовой температуре прогретого слоя за время 260 с: $T_a = (300 + 303,9)/2 = 302$ К и получились равными $a_T(T=302) = 5,25 \cdot 10^{-7}$. Отклонение δ от исходного значения $a_{и}(T=302) = 5,395 \cdot 10^{-7}$, рассчитанного по уравнению (23), составило $\delta_{а, ср} = 2,8$ %. Для получения a_T при других значениях температур потребуются проведение экспериментов при иных начальных и граничных условиях.

Поскольку представленный метод является приближенным, при его практическом использовании рекомендуется отработать технику эксперимента (граничные условия) на материалах с известной теплопроводностью.

Выводы. Предложено математическое описание взаимосвязи теплопроводности материала a_T на интервале времени нагрева Δt с известными из физического эксперимента температурами поверхностей пластины $T(x_{и}=R_{и}, \tau)$ и $T(x_{и}=0, \tau)$ и алгоритм поэтапного численно-аналитического расчета a_T .

Для оценки точности метода выполнены расчеты a_T для десяти моментов времени по предварительно

Температуры неограниченной пластины и результаты расчета теплопроводности материала

Temperatures of the unbounded plate and the results of calculation of the material thermal diffusivity

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время, с	0	26	52	78	104	130	156	182	208	234	260
$T(X=1)$	300,0	307,1	309,5	311,3	312,6	313,8	314,8	315,6	316,4	317,1	317,8
$T(X=0)$	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	300,1
$T_{ср, пл}$	300,0	300,5	300,9	301,3	301,7	302,1	302,5	302,9	303,2	303,6	303,9
a_0	—	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	300,1
a_1	0	7,1	9,5	11,3	12,6	13,8	14,8	15,6	16,4	17,1	17,7
Fo_j	—	0,0516	0,0532	0,0537	0,0546	0,0549	0,0553	0,0559	0,0561	0,0564	0,0554
R_{i+1}	—	0,0158	0,0224	0,0274	0,0316	0,0354	0,0387	0,0418	0,0447	0,0474	0,0500
n	—	3,934	3,805	3,761	3,686	3,664	3,632	3,583	3,565	3,541	3,619
$T_{ср, нн, i}$	300,0	300,0	301,0	301,6	302,1	302,4	302,7	303,0	303,2	303,4	303,6
$T_{ср}(\tau_i)$	300,0	301,4	302,0	302,4	302,7	303,0	303,2	303,4	303,6	303,8	303,9
$T_{ср, пл}$	300,0	300,5	300,9	301,3	301,7	302,1	302,5	302,8	303,2	303,6	303,9
$a_T \cdot 10^7$	—	4,954	5,103	5,156	5,242	5,268	5,305	5,361	5,383	5,411	5,320
Fo_{j+1}	—	0,0515	0,0531	0,0536	0,0545	0,0548	0,0552	0,0558	0,0560	0,0563	0,0553
$\Delta Fo_j \cdot 10^4$	—	1,009	1,008	1,000	1,000	0,999	0,999	0,996	0,998	1,000	0,997

рассчитанному (тестовому) температурному полю неограниченной пластины как полуограниченного тела ($Fo < 0,6$) при $T_n = 300$ К, температуре газа $T_g = 350$ К и радиационно-конвективном теплообмене. Показано, что для принятых условий теплообмена среднее значение температуропроводности $a_T (T = 302)$ определено с погрешностью 2,8 %.

Применение метода позволит значительно упростить проведение и обработку экспериментов для определения теплофизических характеристик теплоизоляционных и огнеупорных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фокин В.М., Чернышов В.Н. Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов. – М.: Издательство Машиностроение-1, 2004. – 212 с.
2. Жуков Н.П., Майникова Н.Ф. Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий. – М.: Издательство Машиностроение-1, 2004. – 288 с.
3. Savija I., Culham J.R., Yovanovich M.M., Marotta E.E. Review of thermal conductance models for joints incorporating enhancement materials // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2003. Vol. 17. No. 1. P. 43 – 52.
4. Zhao D.L., Qian X., GuX.K. etc. Measurement techniques for thermal conductivity and interfacial thermalconductance of bulk and thin film materials // *Journal of Electronic Packaging*. 2016. Vol. 138. No. 4. Article 040802.
5. Grysa Kr. Inverse heat conduction problems. – In book: Heat Conduction – Basic Research. Intech Open. Available at URL: <https://www.intechopen.com/books/heat-conduction-basic-research/inverse-heat-conduction-problems>.
6. Определение теплофизических свойств материалов металлургического производства / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.И. Матюхин, О.Ю. Шешуков. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 180 с.
7. Bouguerra A., Ait-Mokhtar A., Amiri O., Diop M. B. Measurement of thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity of highly porous building materials using transient plane source technique // *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*. 2001. Vol. 28. No. 8. P. 1065 – 1078.
8. Еремин А.В., Стефанюк Е.В., Абишева Л.С. Идентификация источника теплоты на основе аналитического решения задачи теплопроводности // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 5. С. 339 – 346.
9. Зверев В.Г., Назаренко В.А., Теплоухов А.В. Определение теплофизических характеристик материалов при тепловом воздействии постоянной мощности // *Теплофизика и аэромеханика*. 2011. Т. 18. № 3. С. 493 – 502.
10. Lin J.H., Chen C.K., Yang Y.T. Inverse method for estimating thermal conductivity in one-dimensional heat conduction problems // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2001. Vol. 15. No. 1. P. 34 – 41.
11. Tervola P. A method to determine the thermal conductivity from measured temperature profiles // *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 1989. No. 32. P. 1425 – 1430.
12. Yang C.Y. Estimation of the temperature-dependent thermal conductivity in inverse heat conduction problems // *Applied Mathematical Modelling*. 1999. Vol. 23. No. 6. P. 469 – 478.
13. Alhama F., Zueco J., González Fernández C.F. An efficient method for simultaneously determining thermal conductivity and specific heat solids in the form of an inverse problem // *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*. 2004. Vol. 31. No. 7. P. 929 – 937.
14. Zueco J., Alhama F., González-Fernández C.F. Inverse determination of temperature-dependent thermal conductivity using network simulation method // *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. Vol. 174. No. 1 – 3. P. 137 – 144.
15. Liu C.S. One-step GPS for the estimation of temperature-dependent thermal conductivity // *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006. Vol. 49. No. 17 – 18. P. 3084 – 3093.
16. Kim S., Kim M.C., Kim K.Y. Non-iterative estimation of temperature-dependent thermal conductivity without internal measurements // *Int. Journal Heat and Mass Transfer*. 2003. Vol. 46. No. 10. P. 1801 – 1810.
17. Chen H.T., Lin J.Y. Simultaneous estimations of temperature-dependent thermal conductivity and heat capacity // *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 1998. Vol. 41. No. 14. P. 2237 – 2244.
18. Changa Chia-Lung, Chang Ming. Inverse determination of thermal conductivity using semi-discretization method // *Applied Mathematical Modelling*. 2009. Vol. 33. No. 3. P. 1644 – 1655.
19. Weizhen Pan, Fajun Yi, Songhe Meng. Temperature-dependent thermal properties measurement by solving inverse heat transfer problems // *Measurement Science and Technology*. 2016. Vol. 27. No. 7. Article 075005.
20. Rostamian M., Shahrezaee A. Application of meshless methods for solving an inverse heat conduction problem // *European Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2016. Vol. 9. No. 1. P. 64 – 83.
21. Соколов А.К. Определение температуропроводности материалов численно-аналитическим методом // *Заводская лаборатория*. 2014. № 11. С. 36 – 39.
22. Соколов А.К. Решение обратной задачи теплопроводности для симметричного температурного поля пластины, аппроксимированного степенными функциями // *Известия АН. Энергетика*. 2017. № 6 – 1. С. 108 – 118.
23. Соколов А.К. Математическое моделирование нагрева металла в газовых печах. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2011. – 396 с.
24. Соколов А.К. Численно-аналитический метод расчета температурного поля неограниченной пластины при малых числах Фурье // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2007. № 3. С. 23 – 28.
25. Соколов А.К. Численно-аналитический метод расчета температурных полей многослойных пластин в начальной стадии нагрева // *Изв. АН. Энергетика*. 2009. № 1. С. 138 – 151.

Поступила в редакцию 10 октября 2019 г.

После доработки 4 февраля 2020 г.

Принята к публикации 2 июня 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 6, pp. 474–480.

DETERMINATION OF THERMAL DIFFUSIVITY OF THE MATERIAL BY NUMERICAL-ANALYTICAL MODEL OF A SEMI-BOUNDED BODY

A.K. Sokolov

Lenin Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia

Abstract. A mathematical description of the material thermal diffusivity a_T in a semi-bounded body is proposed with a relatively simple algorithm

for its numerical and analytical by solving the inverse problem of thermal conductivity. To solve the problem, it is necessary to obtain the temperature values of the unbounded plate as a result of a thermophysical experiment. A plate can be conditionally considered as a semi-bounded body as long as the Fourier number $Fo \leq Fo_k$ ($Fo_k \approx 0.04-0.06$). It is assumed that the temperature distribution over cross-section of the

heated layer of the plate R is sufficiently described by a power function whose exponent depends linearly on the Fourier number. A simple algebraic expression is obtained for calculating a_τ in the time interval $\Delta\tau$ from the dynamics of temperature change $T(R_n, \tau)$ of a plate surface with thickness R_n heated under boundary conditions of the second kind. Temperature of the second surface of the plate $T(0, \tau)$ is used only to determine the time of the end of experiment τ_k . The moment of time τ_k , in which the temperature perturbation reaches the adiabatic surface $x = 0$, can be set by the condition $T(R_n, \tau_k) - T(0, \tau = 0) = 0,1$ K. The method of approximate calculation of dynamics of changes in depth of the heated layer R by the values of R_n , τ_k , and τ is proposed. Calculation of a_τ for the time interval $\Delta\tau$ is reduced to an iterative solution of a system of three algebraic equations by matching the Fourier number, for example, using a standard Microsoft Excel procedure. Estimation of the accuracy of a_τ calculation was made by the test (initial) temperature field of the refractory plate with the thickness $R_n = 0.05$ m, calculated by the finite difference method under the initial condition $T(x, \tau = 0) = 300$ ($0 \leq x \leq R_n$) at radiation-convective heating. The heating time was 260 s. Calculation of a_{τ_i} was performed for 10 time moments $\tau_{i+1} = \tau_i + \Delta\tau$, $\tau = 26$ s. Average mass temperature of the heated layer for the whole time was $T = 302$ K. The arithmetic-mean absolute deviation of a_τ ($T = 302$ K) from the initial value at the same temperature was 2.8 %. Application of the method will simplify the conduct and processing of experiments to determine the thermal diffusivity of materials.

Keywords: experiment, semi-bounded body, temperature field, mathematical description, inverse problem, thermal diffusivity, numerical-analytical method, refractory material.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-474-480

REFERENCES

1. Fokin V.M., Chernyshov V.N. *Nerazrushayushchii kontrol' teplofizicheskikh kharakteristik stroitel'nykh materialov* [Nondestructive control of thermophysical characteristics of building materials]. Moscow: Izdatel'stvo Mashinostroenie-1, 2004, 212 p. (In Russ.).
2. Zhukov N.P., Mainikova N.F. *Mnogomodel'nye metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoistv materialov i izdelii* [Multi-model methods and means of nondestructive control of materials and products thermophysical properties]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2004, 288 p. (In Russ.).
3. Savija I., Culham J.R., Yovanovich M.M., Marotta E.E. Review of thermal conductance models for joints incorporating enhancement materials. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2003, vol. 17, no. 1, pp. 43–52.
4. Zhao D.L., Qian X., Gu X.K., Jajja S.A., Yang R.G. Measurement techniques for thermal conductivity and interfacial thermal conductance of bulk and thin film materials. *Journal of Electronic Packaging*. 2016, vol. 138, no. 4, article 040802.
5. Grysa Kr. Inverse heat conduction problems. In: *Heat Conduction – Basic Research*. IntechOpen. Available at URL: <https://www.intechopen.com/books/heat-conduction-basic-research/inverse-heat-conduction-problems>
6. Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A., Matyukhin V.I., Sheshukov O.Yu. *Opreделение teplofizicheskikh svoistv materialov metallurgicheskogo proizvodstva: Nauchnaya monografiya* [Determination of thermophysical properties of metallurgical production materials: Sci. Monograph]. Ekaterinburg: OOO "UIPTs", 2014, 180 p. (In Russ.).
7. Bouguerra A., Ait-Mokhtar A., Amiri O., Diop M. B. Measurement of thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity of highly porous building materials using transient plane source technique. *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*. 2001, vol. 28, no. 8, pp. 1065–1078.
8. Eremin A.V., Stefanyuk E. V., Abisheva L. S. Heat source identification based on analytical solutions of the heat-conduction problem. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 5, pp. 339–346.
9. Zverev V. G., Nazarenko V. A., Teploukhov A.V. Determination of thermophysical characteristics of materials under thermal influence of constant power. *Teplofizika i aeromekhanika*. 2011, vol. 18, no. 3, pp. 493–502. (In Russ.).
10. Lin J.H., Chen C.K., Yang Y.T. Inverse method for estimating thermal conductivity in one-dimensional heat conduction problems. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2001, vol. 15, no. 1, pp. 34–41.
11. Tervola P. A method to determine the thermal conductivity from measured temperature profiles. *Int. Journal of Heat and Mass*. 1989, no. 32, pp. 1425–1430.
12. Yang C.Y. Estimation of the temperature-dependent thermal conductivity in inverse heat conduction problems. *Applied Mathematical Modelling*. 1999, vol. 23, no. 6, pp. 469–478.
13. Alhama F., Zueco J., González Fernández C.F. An efficient method for simultaneously determining thermal conductivity and specific heat solids in the form of an inverse problem. *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*. 2004, vol. 31, no. 7, pp. 929–937.
14. Zueco J., Alhama F., González-Fernández C.F. Inverse determination of temperature-dependent thermal conductivity using network simulation method. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, vol. 174, no. 1–3, pp. 137–144.
15. Liu C.S. One-step GPS for the estimation of temperature-dependent thermal conductivity. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006, vol. 49, no. 17–18, pp. 3084–3093.
16. Kim S., Kim M.C., Kim K.Y. Non-iterative estimation of temperature-dependent thermal conductivity without internal measurements. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003, vol. 46, no. 10, pp. 1801–1810.
17. Chen H.T., Lin J.Y. Simultaneous estimations of temperature-dependent thermal conductivity and heat capacity. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 1998, vol. 41, no. 14, pp. 2237–2244.
18. Changa Chia-Lung, Chang Ming. Inverse determination of thermal conductivity using semi-discretization method. *Applied Mathematical Modelling*. 2009, vol. 33, no. 3, pp. 1644–1655.
19. Weizhen Pan, Fajun Yi, Songhe Meng. Temperature-dependent thermal properties measurement by solving inverse heat transfer problems. *Measurement Science and Technology*. 2016, vol. 27, no. 7, article 075005.
20. Rostamian M., Shahrezaee A. Application of meshless methods for solving an inverse heat conduction problem. *European Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2016, vol. 9, no. 1, pp. 64–83.
21. Sokolov A.K. Determination of thermal diffusivity of materials by numerical-analytical method. *Zavodskaya laboratoriya*. 2014, no. 11, pp. 36–39. (In Russ.).
22. Sokolov A.K. Thermal conductivity problem solution by numerical analytical method of temperature fields conjunction. *Izvestiya AN. Energetika*. 2017, no. 6–1, pp. 108–118. (In Russ.).
23. Sokolov A.K. *Matematicheskoe modelirovanie nagreva metalla v gazovykh pechakh* [Mathematical modeling of metal heating in gas furnaces]. Ivanovo: Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet, 2011, 396 p. (In Russ.).
24. Sokolov A.K. Numerical-analytical method for calculating the temperature field of an unbounded plate at small Fourier numbers. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, no. 3, pp. 23–28.
25. Sokolov A.K. Numerical-analytical method for calculating temperature fields of multilayer plates in the initial stage of heating. *Izv. AN Energetika*. 2009, no. 1, pp. 138–151. (In Russ.).

Information about the author:

A.K. Sokolov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Life Safety (sokolov@bjd.ispu.ru)

Received October 10, 2019

Revised February 4, 2020

Accepted June 2, 2020

УДК 621.73

ОЦЕНКА ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Орлов Г.А., д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением» (gor1@mail.ru)

Орлов А.Г., аспирант кафедры «Обработка металлов давлением»

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Предложен вариант количественной оценки обрабатываемости металлов давлением по стандартным методам испытаний механических свойств. Использован комплексный показатель, определяемый как средневзвешенное геометрическое трех показателей, характеризующих пластичность, упрочняемость и энергоёмкость деформации сплавов. Получены связи научных и инженерных характеристик оценки деформируемости для использования результатов научных исследований в заводской практике, ориентируясь на стандартные методы испытаний. Приведен пример использования полученных формул для ряда сталей и сплавов в процессах обработки металлов давлением. Проведена проверка предложенной методики по известным данным. Оценка комплексных показателей обрабатываемости сделана по шкале желательности Харрингтона. Предложенная методика может использоваться для оценки обрабатываемости новых сталей и сплавов.

Ключевые слова: обрабатываемость металлов давлением, квалиметрия, комплексный показатель, механические свойства.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-481-483

В последние годы развивается подход к оценке качества изделий и отдельных характеристик с помощью комплексных показателей, базирующийся на методах квалиметрии [1 – 4]. Комплексные показатели и отдельные единичные свойства нормируются в диапазоне 0...1, где 1 соответствует наилучшему (эталонному), 0 – наихудшему качеству (браку). В настоящей работе этот подход применен для количественной оценки обрабатываемости металлов при обработке металлов давлением (ОМД) по результатам испытаний стандартных механических свойств.

В теории ОМД обрабатываемость металла оценивают пластичностью как способностью деформироваться без разрушения и сопротивлением деформации, определяющим энергоёмкость деформирования. Однако в производственных условиях обычно отсутствует оборудование для определения диаграмм пластичности и кривых упрочнения, поэтому обрабатываемость давлением оценивается через стандартные механические свойства металла при комнатной температуре. Пластические свойства определяются относительным удлинением δ и сужением ψ , а энергоёмкость деформирования – временным сопротивлением σ_b и пределом текучести σ_T . Оценка обрабатываемости делается обычно на качественном уровне (высокая, низкая и др.) [5], что не позволяет оценивать пригодность к ОМД новых сталей и сплавов. В настоящей статье предложен вариант количественной оценки обрабатываемости металлов по стандартным методам испытаний.

В соответствии с методикой расчета комплексных показателей [1] представим обрабатываемость по 100-балльной шкале как средневзвешенное значение трех показателей:

$$Q = 100 \prod_{i=1}^3 K_i^{a_i}, \quad (1)$$

где $K_1 = \frac{\delta + \psi}{(\delta + \psi)_3} = \frac{\delta + \psi}{130}$ – показатель, учитывающий пластичность металла; $(\delta + \psi)_3$ – эталонная, максимально возможная пластичность, принятая за 130 %, что примерно соответствует очень пластичным сплавам (например, по данным [5], для стали 08 – 93 %, для латуни Л68 – 125 %, для алюминиевого сплава АД1 –

$$115 \%); K_2 = \frac{1 - \frac{\sigma_b / \sigma_T}{(\sigma_b / \sigma_T)_{\max}}}{1 - \frac{(\sigma_b / \sigma_T)_3}{(\sigma_b / \sigma_T)_{\max}}} = \frac{1 - 0,25 \frac{\sigma_b}{\sigma_T}}{0,75} - \text{показатель,}$$

учитывающий интенсивность упрочнения металла по отношению $\frac{\sigma_b}{\sigma_T}$: чем больше это отношение, тем хуже об-

рабатываемость металла; эталонное значение $\left(\frac{\sigma_b}{\sigma_T} \right)_3 = 1$;

максимально возможное отношение $\left(\frac{\sigma_b}{\sigma_T} \right)_{\max} = 4$ (по данным [5], для латуни Л68 оно равно 3,52, для нержавеющей стали X18H10T – 2,75); $K_3 = \frac{1 - \frac{\sigma_b + \sigma_T}{(\sigma_b + \sigma_T)_{\max}}}{1 - \frac{(\sigma_b + \sigma_T)_3}{(\sigma_b + \sigma_T)_{\max}}} =$

$$= \frac{1 - 0,00045(\sigma_b + \sigma_T)}{0,955} - \text{показатель, оценивающий энер-}$$

гоёмкость деформирования по сумме $\sigma_b + \sigma_T$, от чего зависит усилие деформации и обрабатываемость; эталонное (минимально возможное) значение суммы

Оценка обрабатываемости давлением некоторых сплавов

Assessment of fabricability by pressure for some alloys

Марка стали (сплава)	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	δ, %	Ψ, %	Обрабатываемость давлением	
					балл	качественная оценка
Стали						
20	250	420	25	55	70	в
45	360	610	16	40	58	у
50ХН	900	1100	9	40	32	н
Алюминиевые сплавы						
АД1	30	80	35	80	73	в
Д1	250	410	15	30	58	у
Бронза						
Бр. ОФ10-1	200	350	10	10	45	у
Титановый сплав						
ОТ4	600	800	20	52	57	у

$(\sigma_b + \sigma_T)_s = 100$ МПа. Например, для сплава АД1 эта сумма равна 110 МПа, для АД31 – 140 МПа, для АМц – 180 МПа [5]; максимально возможное значение выбрано $(\sigma_b + \sigma_T)_{\max} = 2200$ МПа, что соответствует, например, стали 50ХН; a_i – весовые коэффициенты, сумма которых должна быть равна 1.

В первом приближении можно принять влияние всех показателей равным $a_i = 0,33$, тогда формула (1) даст расчет среднего геометрического значения.

Для оценки работоспособности предложенной методики провели сравнение качественных оценок обрабатываемости некоторых сплавов по справочнику [5] с расчетом по формуле (1), приведенное в таблице. Шкала оценок деформируемости по формуле (1) выбрана соответствующей известной шкале оценок Харрингтона [6]: 80 – 100 – весьма высокая обрабатываемость (вв); 60 – 80 – высокая (в); 40 – 60 – удовлетворительная (у); 20 – 40 – низкая (н); менее 20 – не обрабатывается ОМД.

Выводы. Расчеты показали, что предложенная балльная оценка совпадает с качественной оценкой по

справочнику [5], т. е. предложенная методика может быть использована для оценки обрабатываемости давлением новых сталей и сплавов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Азгальдов Г.Г., Костин А.В., Садовов В.В. Квалиметрия для всех: Учеб. пособие. – М.: ИД ИнформЗнание, 2012. – 165 с.
2. Гун Г.С. Управление качеством высокоточных профилей. – М.: Металлургия, 1984. – 152 с.
3. Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун Г.С. и др. Разработка теории квалиметрии метизного производства // Черные металлы. 2012. № 7. С. 15 – 21.
4. Orlov G.A., Orlov A.G. Qualimetry rating of hot-rolled pipes // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. P. 1349 – 1354.
5. Краткий справочник металлста / Под ред. А.Н.Маслова. – М.: Машиностроение, 1971. – 767 с.
6. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение, 1980. – 304 с.

Поступила в редакцию 23 декабря 2019 г.
После доработки 23 декабря 2019 г.
Принята к публикации 5 июня 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 6, pp. 481–483.

ASSESSMENT OF METALS FABRICABILITY BY PRESSURE

G.A. Orlov, A.G. Orlov

Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. A variant of quantitative assessment of metals fabricability by pressure is offered according to the standard tests on mechanical properties. The complex parameter is used, defined as geometrical mean of three parameters characterizing plasticity, hardening and energy intensity of alloys deformation. Relations of scientific and engineering characteristics of deformability assessment for the use of scientific researches results in factory practice are determined, being guided on the standard test methods. Examples of the use of received equations are resulted for a number of steels in processes of metal forming. Testing

of the proposed method was carried out according to the known data. Estimation of the complex parameters was made in accordance with Harrington desirability scale. The offered technique can be used for an assessment of fabricability of new steels and alloys.

Keywords: metals fabricability by pressure, qualimetry, complex parameter, mechanical properties.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-481-483

REFERENCES

1. Azgaldov G.G., Kostin A.V., Sadovov V.V. *Kvalimetriya dlya vseh: Ucheb. posobie* [Qualimetry for everyone: Tutorial]. Moscow: ID InformZnanie, 2012, 165 p. (In Russ.).

2. Gun G.S. *Upravlenie kachestvom vysokotochnykh profilei* [Quality management of high-precision sections]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 152 p. (In Russ.).
3. Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun G.S., Zakirov D.M., Gun I.G. Development of qualimetry theory for metalware products. *Chernye Metally*. 2012, no.7, pp. 15–21. (In Russ.).
4. Orlov G.A., Orlov A.G. Qualimetry rating of hot-rolled pipes. *Solid State Phenomena*. 2018, vol. 284, pp. 1349–1354.
5. *Kratkii spravochnik metallista* [Brief handbook of metallist]. Maslov A.N. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1971, 767 p. (In Russ.).
6. Novik F.S., Arsov Ya.B. *Optimizatsiya protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniya eksperimentov* [Optimization of metals technology processes by experiment planning]. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 304 p. (In Russ.).

Information about the authors:

G.A. Orlov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metal Forming” (grorl@mail.ru)

A.G. Orlov, Postgraduate of the Chair “Metal Forming”

Received December 23, 2019

Revised December 23, 2019

Accepted June 6, 2020

С 75-ЛЕТИЕМ МИХАИЛА ИОСИФОВИЧА ЗИНИГРАДА



24 июня 2020 г. исполнилось 75 лет известному российскому и израильскому ученому, профессору, доктору химических наук, члену редколлегии журнала «Известия ВУЗов. Черная металлургия» Михаилу Иосифовичу Зиниграду.

М.И. Зиниград родился в пос. Быстрый Исток, Алтайский край. Окончил школу в пос. Ёрки Черкасской области и Днепропетровский металлургический институт (Украина). После окончания института переехал в Свердловск (ныне Екатеринбург) и поступил в аспирантуру в Уральский политехнический институт (ныне УрФУ). Успешно защитил кандидатскую, потом и докторскую диссертации, стал профессором, заведующим кафедрой наплавки. В 1992 г. М.И. Зиниград переехал с семьей в Израиль, где с 1994 г. сначала работал профессором, потом был избран деканом факультета естественных наук в Академическом колледже Иудеи и Самарии (г. Ариэль). Здесь, благодаря энтузиазму группы единомышленников, в которую входил и профессор М.И. Зиниград, удалось превратить Колледж Иудеи и Самарии сначала в Университетский центр Самарии, а затем и в Ариэльский университет. Здесь М.И. Зиниград организовал и возглавил Центр материаловедения, а в 2008 г. возглавил университет в качестве ректора.

Профессор М.И. Зиниград известен своими работами в области теоретических и экспериментальных исследований высокотемпературных процессов, в частности, разработки новых материалов и технологий на основе математического моделирования.

В последние годы были проведены многочисленные исследования твердо-оксидных топливных элементов, а также работы в направлении упрочнения металлических материалов путем введения наночастиц.

По инициативе М.И. Зиниграда и академика Л.И. Леонтьева, начиная с 2002 г. ежегодно проводится Международная Российско-Израильская конференция «Оптимизация состава, структуры и свойств металлических, оксидных, композиционных, нано- и аморфных материалов» (Israeli-russian bi-national Workshop “The optimization of composition, structure and properties of metals, oxides, composites, nano- and amorphous materials”). В результате были установлены прочные научные контакты между учеными России и Израиля. Проведены многочисленные совместные научные исследования, часть из которых поддержана научными грантами, в частности, Российским фондом фундаментальных исследований, Министерством образования и науки РФ.

М.И. Зиниград является Почетным доктором Российской академии наук; Почетным профессором педагогического университета им. Ушинского, г. Одесса (Украина); действительным членом Международной академии наук высшей школы (Россия); членом Американского общества по сварке и др., а также членом редколлегии ряда российских научных журналов.

Коллектив редколлегии журнала поздравляет юбиляра и желает ему крепкого здоровья и долгих лет успешной научной работы.

НАУКОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЖУРНАЛА

В 2017 году международная база данных Scopus возобновила индексирование журнала «Известия ВУЗов. Черная металлургия». На инфографике отражены текущие показатели.

Данные предоставлены сайтами www.scopus.com и www.scimagojr.com.



Над номером работали:

Леонтьев Л.И., главный редактор

Ивани Е.А., заместитель главного редактора

Потапова Е.Ю., заместитель главного редактора по развитию

Долицкая О.А., научный редактор

Расенец В.В., верстка, иллюстрации

Кузнецов А.А., системный администратор

Острогорская Г.Ю., менеджер по работе с клиентами

Подписано в печать 25.06.2020. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,75. Заказ 10961. 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

ANALYSIS OF THE USE OF RARE EARTH METALS IN FERROUS METALLURGY OF RUSSIA AND WORLD

EFFECT OF MODIFIED HUMIC ACID (MHA) BINDER ON ROASTING BEHAVIOR OF MONGOLIAN "TUMURTEI" IRON ORE CONCENTRATE BRIQUETTES

PHYSICAL MODELING OF FILTRATION PROCESSES OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS DURING CASTING IN A VACUUM INDUCTION INSTALLATION

EFFECT OF FLUMAG M FLUX ON STRENGTH PROPERTIES OF IRON ORE PELLETS

APPLICATION OF ELECTRIC ARC SURFACING IN MANUFACTURE OF THREE-DIMENSIONAL STEEL OBJECTS

ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF GAS PURIFICATION AND ASH COLLECTION IN RUSSIAN MINING AND METALLURGICAL INDUSTRY

MATHEMATICAL MODELING OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF CHROMIUM FERRITIC-MARTENSITIC STEELS

STRUCTURE AND HARDNESS OF WEAR-RESISTANT COATINGS WITH LOW-FREQUENCY CURRENT MODULATION DEPOSITED ON LOW CARBON STEEL

DETERMINATION OF THERMAL DIFFUSIVITY OF THE MATERIAL BY NUMERICAL-ANALYTICAL MODEL OF A SEMI-BOUNDED BODY

ASSESSMENT OF METALS FABRICABILITY BY PRESSURE

TO THE 75TH ANNIVERSARY OF MIKHAIL IOSIFOVICH ZINIGRAD